

11-12
1980

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

МАТЕРИАЛЫ

ИССЛЕДОВАНИЯ
КОНТРОЛЬ
ПРОИЗВОДСТВО



1980

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР-НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. А. Чернышев
(главный редактор)
В. А. Афанасьев
Ф. И. Бусол
А. А. Васенков
И. Н. Воженин
Г. Г. Горбунова
(ответственный секретарь)
Г. Я. Гуськов
Н. Д. Девятков
В. И. Иванов
А. Ф. Казаков
А. А. Константинов
Ю. Г. Кувшинников
Э. А. Лукин
А. А. Маклаков
В. И. Машкин
Ю. Б. Митюшин
А. А. Орлов
Ю. П. Поцелуев
В. М. Пролейко *(зам.
главного редактора)*
Ю. А. Райнов
А. И. Савин
А. А. Сорокин
В. Д. Степанов
Ю. Б. Степанов
В. Н. Сретенский
П. М. Стуколов *(зам.
главного редактора)*
И. Ф. Фадеев
В. А. Федоров
Я. А. Федотов
О. В. Филатов
С. К. Цаллагов

• В настоящем выпуске рассмотрены основные методы исследования химического состава и структуры материалов электронной техники, контроля полупроводниковых пластин и эпитаксиальных слоев.

Совершенствование процесса изготовления изделий микроэлектроники в значительной мере зависит от вооруженности технологов разнообразными аналитическими методами контроля чистоты технологических сред и поверхностей, химического и фазового состава материалов на различных стадиях технологического процесса. В связи с этим необходимо развивать и совершенствовать такие современные методы анализа химического состава, как оптические, ядерные, масс-спектральные, электрохимические.

Для контроля структурного совершенства и ориентации монокристаллов перспективны рентгеновские методы, характеризующиеся прецизионностью и наглядностью. Анализ вторичных излучений, возникающих при дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке, дает возможность с высокой чувствительностью исследовать структуру тонких поверхностных слоев.

Среди методов неразрушающего контроля заметное место занимают методы физической акустики, позволяющие с достаточной высокой точностью исследовать структуру твердого тела (распределение дислокаций, их взаимодействие с примесными атомами и т.д.).

Интенсивные научные исследования ведутся также в направлении создания инструментальных неразрушающих методов обнаружения и регистрации дефектов полупроводниковых пластин и эпитаксиальных структур.

• Применение автоматизированного комплекса «Оксин-3» для низкотемпературного осаждения диэлектрических пленок позволяет получать слои высокого качества, которые могут быть использованы в производстве интегральных схем и полупроводниковых приборов.

• В разделе «Технический прогресс и кадры» рассказывается о лучших производственниках отрасли, которые своим трудом внесли большой вклад в успешное завершение десятой пятилетки.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ПРОЛЕТАРИИ ВСЕХ СТРАН, СОЕДИНЯЙТЕСЬ!

1980 11-12
ГОД ИЗДАНИЯ ОДИННАДЦАТЫЙ-ВЫПУСК(95-96)

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Исследование химического состава и структуры материалов

- 3 Журавлев Г.И. Перспективы развития основных методов контроля химического состава материалов микроэлектроники
- 9 Белоусов В.И., Журавлев Г.И., Шипатов В.Т. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия в исследовании материалов электронной техники
- 12 Журавлев Г.И., Карамов А.Г., Саламатин Б.А. Применение радиоактивных изотопов в электронном материаловедении
- 17 Пережогин Г.А. Нейтронно-активационный анализ материалов в планарной технологии
- 20 Прилипко В.И., Прокопьев Е.П. Позитронная аннигиляция – новый метод неразрушающего контроля качества материалов
- 22 Белоусов В.И., Муравьев В.В., Новожилов А.Ф. Масс-спектральное исследование технологических процессов микроэлектроники
- 27 Белоусов В.И., Гладской В.М. Лазерно-плазменная масс-спектрометрия высокого разрешения
- 30 Бескова Э.С., Кульбеда Т.А., Токарева Л.Б. Определение микропримесей неметаллов в особо чистых соединениях бора, фосфора и мышьяка
- 32 Афанасьев А.К., Волков А.С., Пелипас В.П. Исследование анодных окислов на поверхности полупроводников $A^{III}B^V$ методом инфракрасной спектроскопии
- 35 Белый В.И., Захарчук Н.Ф., Смирнова Т.П., Юделевич И.Г. Электрохимические методы анализа технологических сред и тонких слоев
- 41 Геркен В.А., Казуров Б.К., Пахомов В.И., Сильницкая Г.Б. Рентгеновский контроль монокристаллических элементов
- 47 Афанасьев А.М., Захаров Б.Г., Имамов Р.М., Ковальчук М.В., Лобанович Э.Ф. Исследование тонких кристаллических слоев полупроводниковых материалов

- 55 Барышев В.Н., Батырев В.А., Кудояров М.В., Марин В.П., Меньшенин Ю.В. Исследование структуры металлокерамического катода на основе $W-Y_2O_3-Al_2O_3$
- 59 Пестов Б.Е. Ультразвуковая исследовательская установка "Эхо-М"

Контроль пластин и эпитаксиальных слоев

- 61 Батавин В.В., Прилипко В.И. Контроль качества пластин полупроводниковых материалов
- 66 Вихлянцева О.Ф., Егоров Н.Н., Сидоров А.И., Чумаков В.Д. Анализ качества эпитаксиальных структур по электрофизическим параметрам
- 68 Белоусов В.С., Зотов В.В., Козлов Ю.Ф., Сидоров А.И. Измерение температурных полей с использованием имплантированных слоев
- 69 Бредихин В.И., Генкин В.Н., Салманов А.Р., Щелоков А.Н. Неразрушающий контроль времени жизни неравновесных носителей заряда в структурах арсенида галлия

ОБОРУДОВАНИЕ

- 75 Горяжина И.И., Иванова Г.А., Кириллов Ю.В., Стадник А.М. Автоматизированный комплекс "Оксин-3"
- 78 Александров А.Е., Алексеев М.Н., Мясников Б.И. Установка 02 ЭЖС 40-1 для эпитаксиального наращивания арсенида индия
- 78 Александров А.Е., Алексеев М.Н., Ильичева А.А. Блок газонапуска
- 79 Васильев И.Е., Коровин Ю.А. Установка приготовления паст
- 79 Филатов В.Н., Щербаков Л.В. Установка нанесения паст

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И КАДРЫ

- 81 Лучшие технологи
- 88 Лучшие по профессии

СООБЩЕНИЯ

- 90 Новикова Л.С. Выставка-смотр "Научно-техническая информация в СССР"
- 92 Перечень материалов, опубликованных в сборнике "Электронная промышленность" за 1980 год

Контроль качества и достоверность измерений выходных параметров материалов и изделий электронной техники являются неотъемлемой частью технологии и во многом определяют развитие микроэлектроники. Создание прогрессивных технологий на базе исследования состояния, миграции и роли примесей, изучение источников неконтролируемых загрязнений, условий герметизации, хранения и установления взаимосвязи химического состава используемых материалов и готовой продукции с их электрофизическими параметрами сдерживаются не только серьезными техническими трудностями, но и недостаточным уровнем развития инструментальных методов контроля и исследования химического состава и электрофизических свойств. Поэтому одной из важнейших задач электронного материаловедения является развитие этих методов контроля качества, которое осуществляется в основном по трем направлениям:

- совершенствование методов измерения;
- совершенствование измерительной техники и аппаратуры;
- создание автоматизированных комплексов, обеспечивающих не только контроль параметров, но также связь с устройствами, регулируемыми технологические процессы и ответственными за соблюдение технологических режимов и, в конечном счете, за гарантированное качество продукции.

Широкий спектр технических характеристик материалов и изделий электронной техники, высокие критерии их оценки и чрезвычайно узкий диапазон варьирования предъявляют особенно жесткие требования к методам контроля качества. В условиях массового производства помимо основных технических характеристик этих методов (предела обнаружения, погрешности и достоверности измерения), особую актуальность приобретает их экспрессность. Необходимость измерения большого количества параметров обуславливает создание унифицированных методов контроля, гарантирующих качество материалов и изделий электронной техники. Совмещение экспрессности и унификации методов возможно только на базе широкого использования микропроцессоров и мини-ЭВМ, направления развития которых предусмотрены решением межотраслевого совещания по их применению.

Учитывая изложенное, научный совет постановил:

- считать развитие инструментальных методов контроля химического состава и электрофизических свойств материалов актуальной проблемой электронного материаловедения;
- одобрить направления работ по развитию методов контроля качества материалов;
- шире развернуть работы по автоматизации методов измерения состава и свойств материалов;
- обратить особое внимание на создание принципиально новых автоматизированных методов контроля качества материалов и изделий электронной техники;
- организовать широкую стандартизацию методов измерения состава и свойств материалов;
- усилить взаимодействие производства материалов и приборостроения с целью обеспечения электронного материаловедения новейшим измерительным и исследовательским оборудованием.

*ИЗ РЕШЕНИЯ МЕЖВЕДОМСТВЕННОГО НАУЧНОГО
СОВЕТА ПО ПРОБЛЕМАМ ИЗМЕРЕНИЙ*

ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.317.799:[621.315.592:54]

Г. И. Журавлев

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Для исследования химического состава материалов, применяемых в микроэлектронике, используются оптические, ядерные и резонансные методы, характеризующиеся избирательностью и высокой чувствительностью.

Быстрое развитие твердотельной электроники, повышение уровня интеграции микросхем, прогресс в комплексной микроминиатюризации значительно повысили уровень технических требований к химическому составу материалов для изделий электронной техники.

В настоящее время большинство основных материалов микроэлектроники лимитируется не менее чем по 20 элементам-примесям. Допустимое массовое содержание этих примесей составляет 10^{-7} – 10^{-6} %, а концентрация электроактивных примесей ограничена еще более низким уровнем, поэтому необходим постоянный контроль химического состава материалов и изделий микроэлектроники в процессе изготовления.

Исследования состояния и роли примесей, их миграции, влияния легирующих добавок и источников неконтролируемых загрязнений, условий герметизации, хранения, установление взаимосвязи химического состава используемых материалов и готовой продукции с их электрофизическими параметрами требуют развития избирательных методов контроля и исследования химического состава. Некоторые высокочувствительные инструментальные методы, часто называемые электрофизическими (например, основанные на измерении ЭДС Холла, удельного сопротивления при низких температурах, фотопроводимости или вольт-фарадных характеристик p - n переходов), неизбирательны и полученная с их помощью аналитическая информация не позволяет идентифицировать примеси. Этого недостатка не имеют оптические, ядерные и резонансные методы (см. таблицу), совершенствование

которые является одной из основных задач электронного материаловедения.

Технические характеристики основных инструментальных методов контроля химического состава материалов микроэлектроники

Метод контроля	Предел обнаружения массового содержания		Относительная погрешность определения, %	Число одновременно определяемых элементов	Среднее время проведения анализа, ч	Число исследуемых объектов
	г	о				
Атомно-абсорбционный анализ графитовая кювета печь Массмана пламя	10^{-12} – 10^{-13}	10^{-7} – 10^{-10}	7–10	1	1–6	10
	10^{-7} – 10^{-9}	10^{-6} – 10^{-7}	3–7	1	1–6	7
		определение макроколичеств (20–60%)	0,7–1	1	6	8
Спектральный (горячий полярный катод)	10^{-10} – 10^{-13}	10^{-6} – 10^{-10}	15	24	14	24
Спектральный (дуга)	10^{-7} – 10^{-10}	10^{-6} – 10^{-6}	20	30	8–14	40
Химико-спектральный	10^{-7} – 10^{-10}	10^{-7} – 10^{-8}	25	20	15–20	50
Спектрофотометрический микропримеси химический состав	10^{-6}	10^{-6}	10	1	2–3	50
	1 – 10^{-6}	–	2–7	1–3	2	40
Инфракрасная спектроскопия примесный состав фазовый состав	–	10^{-6} – 10^{-4}	2–10	1–3	1–14	32
	10^{-6} – 10^{-12}	–	2–10	1–3 фазы	1–14	15
Спектроскопия комбинационного рассеяния	10^{-11} – 10^{-13}	–	1–10	1–3 фазы	1–8	1
Ядерная гамма-резонансная спектроскопия	10^{-10}	10^{-4}	–	1	17	11
Метод радиоактивных индикаторов	10^{-10} – 10^{-13}	–	5	3	2	40
Электронный парамагнитный резонанс	10^{12} спинов	$2 \cdot 10^{-9}$	5	1–2	14	15
	10^{-10} – 10^{-12}	$3 \cdot 10^{-7}$	20	70	6	30

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Атомно-абсорбционный анализ (ААА) с различными вариантами атомизации (в графитовой кювете, печи Массмана, в пламени) находит в настоящее время все более широкое применение в различных областях науки и техники как самостоятельный метод анализа и как метод определения концентрата примесей. ААА характеризуется высокой селективностью и низкими пределами обнаружения (см. таблицу), экспрессностью, позволяет определять большое число элементов и обеспечивает возможность практически полной автоматизации процесса анализа.

Этот метод используется в основном для сложного определения легирующих компонентов в эпитаксиальных структурах кремния и арсенида галлия (в частности, при ионном легировании), для выявления поверхностных загрязнений монокристаллических пластин кремния, арсенида и фосфида галлия и индия, гадолиний-галлиевых гранатов, для определения ряда элементов в исходных материалах эпитаксиальной технологии. Например, изучение этим методом распределения легирую-

шего компонента в области $p-n$ перехода с разрешением по глубине до 0,1 мкм позволяет уточнить температурный режим проведения процесса диффузии.

ААА с атомизацией в пламени начинает все шире применяться для точного определения основных компонентов в резистивных материалах, стеклах сложного состава, пастах, электролитах, металлоорганических соединениях. Совершенствование метода в настоящее время возможно посредством создания закрытых атомизаторов, двухлучевых спектрофотометров (для повышения точности определения больших концентраций), применения лазера и изучения механизма взаимодействия излучения с атомным паром.

Спектральный метод с использованием разряда с горячим полым катодом (ГПК) в качестве источника возбуждения находит все более широкое применение при анализе особых материалов для полупроводниковой технологии. Новая конструкция полого катода, имеющего полость переменного диаметра [1], позволяет получать абсолютные пределы обнаружения для 24 исследованных элементов на уровне 10^{-10} – 10^{-13} г, что сравнимо с результатами анализа, полученными таким высокочувствительным методом, как атомно-абсорбционный (см. таблицу). От ААА спектральный метод с использованием разряда с ГПК отличается многоэлементностью, а от нейтронно-активационного и масс-спектрального методов – применением более простого и дешевого оборудования.

Однако реализовать низкие пределы обнаружения этим методом возможно только при определении примесей в труднолетучих основах, так как интенсивное поступление пробы в разряд приводит к ухудшению не только пределов обнаружения метода, но и сходимости результатов анализа. Наибольшие требования предъявляются к чистоте веществ, используемых в производстве эпитаксиальных структур. Эти вещества в основном обладают средней или даже высокой летучестью, поэтому при их контроле для успешного применения разряда с горячим полым катодом необходимо предварительное отделение примесей от основы. Наиболее полно разработаны методы химического отделения основы, однако их использование вносит неконтролируемые загрязнения из посуды, атмосферы и реактивов на стадии химической подготовки пробы, поэтому для реализации возможностей метода необходимо снизить уровень "холодной пробы".

Применение разряда с ГПК к анализу концентратов примесей позволило разработать ряд методик контроля материалов микроэлектроники с наиболее низкими из известных относительными пределами обнаружения, которые были использованы при отработке технологии получения материалов повышенной степени чистоты (например, триметилгаллия и эфирата триметилгаллия, применяемых при получении субмикронных слоев арсенида галлия), при анализе примесей в особых веществах (трихлориде мышьяка, борном ангидриде, трибромиде бора, тетраэтоксисилане), на

поверхности пластин (кремния, арсенида галлия, антимонида и фосфида индия), в тонких слоях эпитаксиальных структур кремния и арсенида галлия при послойном определении легирующих элементов.

Разработанная конструкция катода обеспечивает снижение абсолютных пределов обнаружения метода в основном за счет увеличения времени пребывания атомов в зоне возбуждения. Однако температура, достигаемая в таком катоде, значительно ниже температуры нагрева пробы в дуге постоянного тока. Поэтому для дальнейшего снижения пределов обнаружения необходимо повышать скорость испарения примесей в зону разряда. Это относится в основном к элементам с относительно низкой летучестью. Решить эту задачу можно путем разработки конструкции катода, допускающей большой нагрев его при неизменном токе, путем применения импульсного питания разряда, позволяющего создавать в импульсе значительно больший ток без срыва разряда на дугу, или посредством использования термохимических реакций для повышения летучести определяемых элементов. Поскольку в разряде с ГПК возбуждается интенсивный спектр молекулярных полос, то применение прибора с большой разрешающей способностью также должно улучшить пределы определения элементов.

Спектральный метод с использованием дуги. Простота, экспрессность, возможность почти полной автоматизации и многоинформативность обусловили широкое применение метода. Однако при анализе сверхчистых материалов микроэлектроники в настоящее время этот метод применяется ограниченно и не имеет тенденции к расширению из-за недостаточности низких пределов обнаружения.

Для улучшения пределов обнаружения метода необходимо создание новых источников возбуждения спектров (например, СВЧ плазмотронов), устранение влияния "третьих" элементов и сохранение линейности калибровочного графика в пределах пяти-шести порядков.

Химико-спектральный метод. Спектральный анализ широко используется в сочетании с предварительным концентрированием примесей из анализируемой основы. В этом случае в зависимости от массы пробы удается снизить пределы обнаружения на один-два порядка величины.

Рост требований к чистоте используемых материалов обусловил необходимость дальнейшего развития химических методов концентрирования примесей. Химическая обработка объектов анализа была использована для удаления мешающих компонентов, а также для перевода анализируемого вещества в удобную для анализа форму. Методы химической подготовки сравнительно просты, существенная часть анализа (при пределах обнаружения до 10^{-5} – 10^{-7} %) может быть выполнена при незначительном переоборудовании обычной химической лаборатории, обеспечивающем фильтрацию поступающего воздуха, использование вытяжных шкафов, боксов, простых приспособлений, посуды и т.п., позволяющих избежать загрязнения проб в процессе анализа, применение хорошо очищенных

реактивов, деионизованной воды с удельным сопротивлением 10–20 МОм·см, создание режима, позволяющего снизить уровень загрязнений. При более низком содержании примесей требования ужесточаются: необходимо проведение работ в пылезащитных камерах или комнатах с ламинарным потоком очищенного воздуха, ограничение числа работающих, улучшение очистки, условий хранения, транспортировки очищенных веществ и т.п. Выполнение этих требований позволяет снизить уровень "холостого" опыта, который во многих случаях лимитирует предел обнаружения химико-спектрального анализа. К недостаткам метода химического концентрирования примесей относятся: сокращение числа одновременно определяемых элементов, возможность потери определяемых элементов и увеличение длительности анализа.

Наиболее часто для концентрирования используется отгонка летучей основы (например, воды, кислот, органических растворителей), экстракция, реже электролиз, ионный обмен и методы осаждения. Число методов концентрирования увеличивается. Некоторые из них требуют довольно сложной аппаратуры, применение которой оправдано лишь при проведении большого числа анализов одного вида.

Пути снижения уровня "холостого" опыта (и соответственно пределов обнаружения) помимо повышения чистоты атмосферы и реактивов, сводятся к выбору наиболее рациональной схемы концентрирования, к уменьшению числа используемых реактивов и операций, упрощению методики, сокращению длительности анализа и т.п.

При анализе нестойких на воздухе веществ (высокорекционных, способных самовоспламеняться или взрываться при контакте с водой) приходится работать в атмосфере инертного газа и применять методы разложения, обеспечивающие безопасное проведение процесса. В настоящее время достигнуты определенные успехи в улучшении условий работы с подобными веществами. Например, был упрощен анализ эфира триметилгаллия: сокращено число операций, исключено применение серной кислоты, значительно уменьшена длительность анализа. Сочетание химического концентрирования с высокочувствительным методом определения (полый катод) позволило достичь весьма низких пределов обнаружения [2].

Спектрофотометрический метод в настоящее время является наиболее доступным и широко распространенным инструментальным методом анализа химического состава. Он позволяет определять практически все элементы (металлы и неметаллы), ионы (катионы и анионы), молекулы в широком диапазоне концентраций (10–10⁻⁷ % по массе) с высокой относительной точностью (0,5–0,7%). Среди инструментальных методов спектрофотометрический по точности определения уступает лишь кулонометрии. Надежность, простота и малая стоимость аппаратуры, достаточная экспрессность и низкая стоимость анализа обеспечивают высокую экономическую эффективность метода.

В электронной технике спектрофотометрический метод применяется в основном при контроле качества материалов, для обеспечения разработок технологий, требующих повышенной точности анализа, а также для определения элементов, неопределимых другими методами анализа. Рассматриваемый метод практически незаменим при высокоточном определении сложного химического состава микрообъектов – тонких слоев многокомпонентных полупроводниковых соединений и их твердых растворов, тонких слоев резистивных и проводящих сплавов, окислов, керметов, халькогенидных и окисных полупроводниковых стекол, отдельных современных микроэлектронных приборов, а также при точном контроле содержания легирующих примесей (мышьяка, фосфора, бора, серы, селена, кремния и др.) в различных материалах электронной техники.

Улучшение пределов обнаружения массового содержания до 10⁻⁸ % вполне реально и может быть осуществлено путем использования и разработки новых методов высокоточного измерения малых величин оптических плотностей растворов, путем применения многоходовой кюветы, "умножающих" и высокочувствительных кинетических реакций. Вполне реально улучшение точности метода в 2–5 раз в результате использования и синтеза новых высокоселективных органических реагентов, обеспечивающих полноту выделения определяемого элемента и высокий коэффициент разделения, а также благодаря совершенствованию аппаратуры и техники измерения, использованию интеграторов и накопителей спектров, автоматизации измерений.

Методы молекулярной спектроскопии (в частности инфракрасной спектроскопии), являясь неразрушающими методами контроля, позволяют с высокой эффективностью исследовать объекты до и после воздействия на них различных полей, сил, реактивов. Это определило высокую эффективность применения метода инфракрасной спектроскопии (ИКС) для исследования диффузатов и процесса диффузии, имплантированных слоев различных элементов в монокристаллах полупроводников, адсорбционных явлений и т.п.

Современные ИК спектрофотометры высшего класса позволяют исследовать тонкие диэлектрические пленки предельно малых толщин (до нескольких молекулярных слоев). Методы отражения дают возможность успешно анализировать тонкие пленки, нанесенные на непрозрачные для ИК излучения подложки, что существенно расширяет область применения ИКС. Особенно эффективно использование в этом случае лазерных спектрофотометров, с помощью которых можно сканировать поверхность изучаемого объекта сфокусированным пучком света диаметром всего несколько десятков микрон, чрезвычайно сильно повышать чувствительность методов многократного нарушенного полного внутреннего отражения, существенно снизить массу необходимого для анализа вещества или объекта (до нескольких микрограмм). Сейчас имеется возможность создать прибор, объ-

единяющий преимущества различных устройств и позволяющий методом ИКС анализировать тонкие диэлектрические пленки (из неорганических веществ толщиной до одного молекулярного слоя), диффузионные и имплантированные в полупроводниковые материалы слои с эффективной толщиной 0,1 молекулярного слоя и менее, т.е. чувствительность некоторых методов ИКС приближается к чувствительности оптической спектроскопии. Однако сравнивая методы ИКС с другими аналитическими и структурно-чувствительными методами, необходимо учитывать индивидуальные, характерные только для данного метода особенности, которые, как правило, определяют его ценность, область применения и вклад в анализ и исследование материалов. Особенностью методов молекулярной спектроскопии является их высокая чувствительность к свойствам химических связей атомов и симметрии их расположения в молекулах и кристаллах. Поэтому при исследовании примесных центров в монокристаллах полупроводников методы колебательной спектроскопии будут незаменимы и в ближайшее время станут обязательными методами анализа примесного и фазового составов эпитаксиальных одно- или многокомпонентных слоев. ИКС анализ концентрации примесных кислорода и углерода в монокристаллах кремния, кислорода в германии в настоящее время широко применяется в производстве. При этом чувствительность определения кислорода в кремнии и германии достигает 10^{14} см⁻³ и за счет применения новой более совершенной техники в ближайшее время может быть доведена до 10^{11} см⁻³, причем и это значение не является предельным. Расширяется номенклатура примесных центров, которые выявляются с помощью методов колебательной спектроскопии, чему в немалой степени способствует расширение доступного спектрального диапазона за счет применения усовершенствованных фурье-спектрометров, снабженных мини-ЭВМ и различными приставками.

До последнего времени использование метода спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР) в исследовании материалов микроэлектроники сдерживалось его недостаточной чувствительностью. Однако с созданием лазерного микрозонда стал возможным эффективный анализ тонких пленок, прозрачных полупроводниковых материалов и дефектных образований на поверхности полупроводников. Сформированное возбуждающее лазерное излучение вызывает достаточный для регистрации полезный сигнал в объеме 1 мкм³ исследуемого вещества массой до 10^{-13} г, что обеспечивает проведение анализа соответствующих дефектных участков микросхем. Важным преимуществом этого прибора является возможность прямого наблюдения распределения примесной фазы на экране ЭЛТ, что обеспечивается электронно-оптическим преобразованием сигналов от комбинационно-рассеянного излучения определенной длины волны. Следует отметить, что ИКС с наибольшей чувствительностью регистрирует спектры, связанные с изменением дипольного момента гетерополярного ве-

щества, а СКР — гомеополярного вещества. Результаты информации, полученные обоими методами, существенно дополняют друг друга.

Развитие техники СКР на основе более широкого использования перестраиваемых лазерных систем в ближайшее время сделает возможным применение микрозондового лазерного метода СКР практически для любых неметаллических материалов электронной техники.

Следует отметить, что лазерный метод СКР лучше других сочетается с технологическими установками, используемыми в микроэлектронной технике, в частности с реакторами для выращивания эпитаксиальных слоев. Такая совместная система обеспечит более глубокое изучение технологических процессов (например, эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев) на молекулярном уровне. Устройства СКР могут выполнять роль многоинформативных и малоинерционных датчиков в автоматических системах управления сложными технологическими процессами при контроле используемых парогазовых смесей, оперативном анализе и коррекции изготавливаемого материала.

ЯДЕРНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ

Ядерная гамма-резонансная спектроскопия (ЯГРС) основана на резонансном испускании и поглощении гамма-квантов ядрами некоторых химических элементов. Экспериментально определяются следующие параметры спектральных линий:

- величина эффекта и ее температурная зависимость (эти параметры связаны с динамикой кристаллической решетки, ядерными характеристиками мессбауэровских атомов и их концентраций в образце);

- изомерный химический сдвиг, соответствующий определенному химическому состоянию мессбауэровских атомов в источнике и поглотителе гамма-квантов;

- квадрупольное расщепление спектральных линий, возникающее вследствие отличия кристаллического окружения мессбауэровского атома от кубического;

- магнитное сверхтонкое расщепление спектральных линий, вызванное взаимодействием магнитного дипольного момента ядра с магнитными моментами электронов атома или внешними магнитными полями;

- ширина спектральной линии, зависящая от диффузионного движения атомов, а также от релаксационных процессов в твердом теле.

К настоящему времени эффект Мессбауэра наблюдался у 44 элементов, в число которых входят изотопы таких широко используемых в электронном материаловедении элементов, как железо, теллур, олово, сурьма, золото, тантал, вольфрам, РЗЭ. Метод ЯГРС позволяет определять валентное состояние и кристаллографическое окружение мессбауэровских атомов, магнитную структуру материалов. С его помощью можно проводить также количественный анализ фазового состава многокомпонентных систем.

К достоинствам метода относятся: универсальный характер получаемой информации, возможность исследования структуры некристаллических и рентгеноаморфных материалов (стекло, рентгеноаморфных пленок, пластмасс, элементоорганических соединений); возможность получения информации о состоянии мессбауэровских атомов при предельно малых концентрациях этих атомов в материалах, когда чувствительность других спектральных методов недостаточна; неразрушаемость образца в процессе исследования.

Примером применения метода ЯГРС может служить исследование фазового состава железокислых покрытий цветных фотошаблонов, проведенное с целью отработки оптимального технологического режима их получения [3], а также исследование монокристаллов фосфида галлия, легированных железом.

Совершенствование метода ЯГРС в настоящее время осуществляется в направлениях:

- расширения номенклатуры и увеличения удельной активности мессбауэровских источников;
- разработки спектрометров ЯГР, позволяющих получать спектры образцов при температурах от 4,2 до 1000 К, со стабилизацией режима их работы во времени и высокой скоростью набора спектров;
- создания компактных приборов для фазового анализа материалов в производственных условиях;
- создания математического обеспечения для обработки результатов на ЭВМ с использованием методов планирования эксперимента.

Целью этих работ является увеличение числа исследуемых элементов и объектов, а также повышение чувствительности, экспрессности метода и достоверности получаемых результатов.

Метод может быть использован для исследования и контроля всех основных материалов электронной техники, а также некоторых технологических процессов их получения и обработки, в первую очередь для контроля фазового состава пленок резистивных и диэлектрических материалов, прозрачных электродов для жидко-кристаллических индикаторов, покрытий фотошаблонов, ферритов-гранатов и ферритов-шпинелей, для изучения состояния примесных атомов в монокристаллах и эпитаксиальных структурах кремния $A^{III}B^{V}A^{II}B^{VI}$ структуры и переходов в магнито-упорядоченное состояние материалов, используемых в устройствах на ЦМД, структуры полупроводниковых стекол и ее изменений под воздействием теплового и лазерного облучения в устройствах для электрической и оптической записи информации.

Метод радиоактивных индикаторов (РИ) основан на адекватности химических свойств изотопов одного и того же элемента. В электронном материаловедении этот метод используется в основном для исследования распределения и миграции практически всех элементов периодической системы в различных объектах. Высокие селективность и экспрессность, точность, достоверность и возможность проведения неразрушающего контроля

обуславливают исключительную универсальность метода РИ, а в некоторых случаях этот метод является единственным, позволяющим решать важные вопросы полупроводникового материаловедения. Метод РИ предпочтителен при исследовании источников и кинетики загрязнения полупроводниковых материалов и изделий электронной техники, незаменим при разработке технологии обособленных материалов и процессов очистки поверхности. Так, например, только применение метода РИ позволило оптимизировать состав плазмы и время обработки при создании ионно-плазменной технологии очистки поверхности кремниевых пластин для больших интегральных схем [4]. Высокие результаты получены от применения метода РИ в технологии выращивания монокристаллов арсенида и фосфида галлия, фосфида индия, трихлорида мышьяка, халькогенидов и т.п., причем уровень контролируемых элементов примесей на поверхности составлял $10^8 - 10^{11}$ см⁻², в объеме – $10^{12} - 10^{15}$ см⁻³ и соответствовал лучшим достижениям (см. таблицу). Метод наиболее эффективен при исследовании диффузии примесей в полупроводниковых соединениях, их твердых растворах и эпитаксиальных слоях, в маскирующих покрытиях нитрида и двуокиси кремния, окислах алюминия, тантала и ниобия.

Пути совершенствования метода заключаются в улучшении точности и чувствительности индикации, полной автоматизации многоканальных анализаторов импульсов, обеспечивающей одновременный контроль ряда радиоактивных изотопов, и в разработке новых разновидностей метода, например, криптоноавтордиографии, позволяющей контролировать микродефекты поверхности (сколы, царапины, поры и т.п.) с шириной раскрытия до 0,01 мкм.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) в настоящее время применяется в заводских и исследовательских лабораториях в ряде отраслей народного хозяйства. В отличие от оптической эмиссионной спектроскопии, масс-спектрометрии, хроматографии и других методов, дающих информацию о присутствии и количестве примесного элемента, метод ЭПР позволяет определять концентрации локальной (различные виды обменно-связанных кластеров) и среднестатистической (обменно не связанные, случайно распределенные частицы) парамагнитной примеси в твердом теле или жидкости, зарядовое состояние ее частиц, природу ближайших соседних атомов и локальную симметрию кристаллического поля. Поэтому метод ЭПР прежде всего применим для изучения структуры твердого и жидкого тела, обратимого и необратимого изменения ее в результате тех или иных внешних воздействий, кинетики и механизмов этих превращений. В аналитических целях он может быть использован для исследования и контроля качества парамагнетиков и веществ с магнитным упорядочением, например магнитных диэлектриков (ферро- и ферримагнетиков) и полупроводников (халькохромитов металлов со структурой шпинели) [5].

Широкое использование метода ЭПР сдерживается техническими трудностями изучения парамагнетизма металлов и полупроводников, необходимостью применения в некоторых случаях низких температур (4,2–77 К).

Методом ЭПР впервые было показано, что дихлорпроизводные фталоцианинов кремния, германия и олова, некоторое время применявшиеся для формирования путем сублимации диэлектрических слоев в изделиях микроэлектроники, характеризуются энантиотропным фазовым переходом в диапазоне температур 180–350 К, сопровождающимся изменением диэлектрических параметров этих материалов.

Более того, методом ЭПР (и другими методами) установлено, что элементоорганические соединения ряда фталоцианина являются полупроводниками, а не диэлектриками.

На основании результатов исследования фоторезистов и их компонентов методом ЭПР, а также методами фотолиза и термолиза выявлены механизмы протекания процессов, оптимизированы состав позитивного фоторезиста (марки ФП-617М) и технологические режимы термоструктурирования, широко внедрены способы термического и плазменного удаления защитных полимерных масок и очистки поверхности твердых тел.

Основным направлением совершенствования метода является автоматизация процессов снятия температурных и угловых зависимостей параметров спектров ЭПР с применением счетно-решающих устройств, интегрированием и многоканальным накоплением спектра. Это позволит сократить время получения необходимой информации и улучшить предел обнаружения количества парамагнитных центров до величины $2 \cdot 10^{12}$ спинов (теоретический предел обнаружения равен 10^{11} спинов).

Новым применением метода ЭПР является исследование и контроль качества магнитных полупроводников и диэлектриков. Для контроля качества [6] и выбора магнитного полупроводника с необходимой собственной добротностью разработана методика, которая применяется для исследования ферритов-гранатов. Она учитывает суммарный эффект, обусловленный отклонением от стехиометрии состава, наличием примесей и несовершенством структуры монокристалла. Поэтому изучать электрофизические, оптические и другие свойства этих материалов целесообразно после того, как будет установлено их качество методом ЭПР.

Масс-спектральный метод. В настоящее время наиболее перспективным является метод лазерно-плазменной спектроскопии [7], основанный на взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом, которое приводит к образованию низкотемпературной плазмы, являющейся источником ионов. Образующиеся ионы лазерной плазмы ускоряются электрическим полем и направляются в анализатор масс-спектрометра с двойной фокусировкой. Регистрация ионов осуществляется с помощью фотопластинки.

Основными достоинствами лазерной масс-спектрометрии являются:

- возможность анализа любых твердых веществ (металлов, полупроводников, диэлектриков) без использования эталонов;
- абсолютно чистый отбор пробы;
- одновременная информация о содержании в пробе практически всех элементов периодической системы;
- широкий диапазон определяемых концентраций ($10 \div 3 \cdot 10^{-7}$ % по массе);
- низкий предел обнаружения (до 10^{-11} – 10^{-12} г).

Лазерная масс-спектрометрия применяется в основном для определения элементного состава полупроводниковых монокристаллов, эпитаксиальных структур, ионно-имплантированных слоев, содержания примесей во всех твердых материалах, используемых в микроэлектронике. Этот метод наиболее эффективен при определении редкоземельных элементов в окислах галлия и гадолиния с чувствительностью $1 \cdot 10^{-4}$ % по массе (требуется не более 1 ч приборного времени для набора необходимых экспозиций при определении всех редкоземельных элементов), а также при проведении обзорных анализов содержания микропримесей с чувствительностью до $3 \cdot 10^{-7}$ % по массе.

Основными направлениями совершенствования метода являются разработка электронной системы регистрации (на первом этапе — одноканальной, в дальнейшем — многоканальной, что приведет к увеличению чувствительности на два порядка величины и экспрессности не менее чем в 10 раз), а также полная автоматизация.

Одно из перспективных направлений развития метода — разработка способов послойного и локального определения примесей в материалах с повышенной чувствительностью и разрешающей способностью по толщине объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабатовская В.Л., Кузовлев И.А., Юделевиц И.Г. Снижение пределов обнаружения микропримесей при химико-спектральном анализе веществ высокой чистоты. — ЖПС, 1977, т. 26, № 2, с. 207–212.
2. Применение разряда в горячем полом катоде для определения примесей в эфире триметилгаллия / В.С. Соломатин, В.С. Власов, В.Л. Сабатовская, И.А. Кузовлев — Заводская лаборатория, 1978, вып. 11, с. 1346–1347.
3. Состав и структура карбонильных пленок окиси железа / В.Т. Шипатов, А.В. Кошкинко, Б.Г. Грибов и др. — Электронная техника, Сер. 6, Материалы, 1977, вып. 5, с. 111–114.
4. Поведение микропримесей металла в процессе обработки кремниевых пластин в поле галогеносодержащей высокочастотной плазмы / Н.В. Ванюкова, В.П. Суходаева, А.Г. Карамов, В.Г. Красов — Электронная техника, Сер. 6, Материалы, 1979, вып. 4, с. 83–86.
5. Мартыненко А.П., Журавлев Г.И. О некоторых применениях электронного и ядерного магнитных резонансов в микроэлектронике — РИПОРТ, РИ.76.04.ДЗ-1593, М., 1976.
6. Экспрессный контроль качества магнитных полупроводников методом ЭПР / А.П. Мартыненко, Г.И. Журавлев, А.В. Антонов и др. — Заводская лаборатория, 1979, вып. 8, с. 752–754.
7. Белоусов В.И., Журавлев Г.И. Элементная масс-спектрометрия в электронном материаловедении — Электронная промышленность, 1977, вып. 3, с. 26–29.

УДК 543.42:621.315.5/61

В. И. Белоусов, Г. И. Журавлев, В. Т. Шипатов

ЯДЕРНАЯ ГАММА-РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Метод, основанный на эффекте Мессбауэра, используется для неразрушающего высокочувствительного контроля основных электротехнических материалов, включая некристаллические и рентгеноаморфные.

Многие проблемы изучения химического состояния основных и примесных атомов в материалах не могут быть решены без использования метода ядерной гамма-резонансной спектроскопии (эффекта Мессбауэра), основанной на явлении резонансного испускания и поглощения гамма-квантов ядрами некоторых химических элементов. К настоящему времени этот эффект наблюдался у 44 элементов периодической системы, в число которых вошли такие широко используемые в электронной технике, как Fe, Sn, Te, Sb, Au. При исследовании материалов измеряют величину эффекта и ее температурную зависимость, изомерный химический сдвиг, квадрупольное расщепление, внутреннее магнитное поле и ширину спектральных линий. На основании этих измерений определяют валентное состояние мессбауэровских атомов в материалах и внутрикристаллические электрические и магнитные поля, исследуют динамику кристаллической решетки, проводят количественный анализ фазового состава гетерогенных систем. К достоинствам метода, обеспечивающим все возрастающий интерес к нему технологий, относятся:

- большое число анализируемых материалов;
- универсальный характер получаемой информации (данные о физической структуре и химическом составе);
- возможность контроля фазового состава и структуры материалов на всех стадиях их получения и обработки;
- высокая чувствительность, превосходящая в некоторых случаях чувствительность других спектральных методов (атомное содержание $10^{-2}\%$ для абсорбционной и на несколько порядков выше для эмиссионной мессбауэровской спектроскопии);
- неразрушаемость образцов в процессе их исследования и контроля.

Применение метода ядерной гамма-резонансной спектроскопии позволило решить ряд вопросов в технологии получения некоторых материалов и изделий электронной техники.

В производстве интегральных схем в настоящее время широкое распространение получили полупрозрачные фотошаблоны с железистоокисными маскирующими слоями на стеклянных подложках. Их получают окислительным пиролизом карбониллов железа или реактивным катодным распылением железной мишени. Маскирующий слой фотошаблонов должен обладать хорошей адгезией к подложке, быть устойчивым к механическому истиранию, иметь высокую скорость химического травления, высокое разрешение, малую плотность дефектов, большую величину светопоглощения в области спектральной чувствительности фоторезистов (300–450 нм) и минимальное поглощение за порогом их чувствительности (500 нм). Эти качества маскирующих слоев определяются их фазовым составом, контроль которого является сложной аналитической задачей в связи с тем, что маскирующие слои могут включать наряду с окислами железа его карбонаты и карбиды, а также неокислившееся железо, иметь небольшую толщину порядка нескольких сотен нанометров и рентгеноаморфную структуру, что затрудняет использование для контроля их фазового состава таких методов, как рентгеноструктурный анализ и электронография.

Поэтому для решения задачи контроля был выбран метод ядерной гамма-резонансной спектроскопии на ядрах ^{57}Fe [1]. Фазовый состав и размер зерен маскирующих слоев определялся по их спектрам ядерного гамма-резонанса и сопоставлялся с техническими характеристиками фотошаблонных заготовок. Установлено, что лучшие характеристики имеют фотошаблонные заготовки с маскирующим слоем окиси железа ($\alpha, \gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$) со средним размером зерна 5–10 нм, полученные пиролизом пентакарбонила железа в окислительной атмосфере.

На рис. 1 представлены спектры ядерного гам-

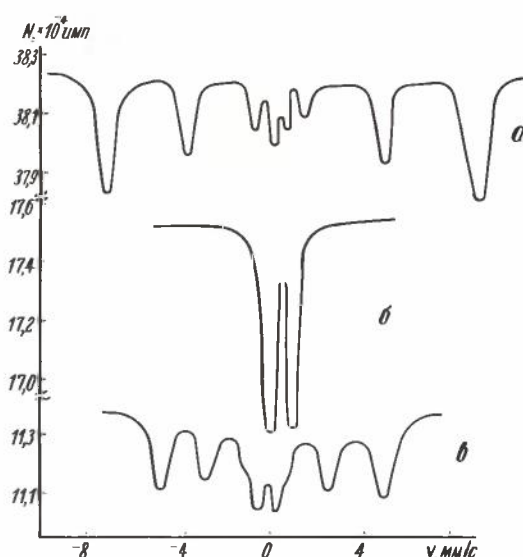


Рис. 1. Спектры ядерного гамма-резонанса пленок окиси железа (v - скорость движения источника), полученных окислением пентакарбонила железа при температурах 150°C (а) и 105°C (б), а также при малых концентрациях кислорода в реакционной газовой смеси (в). Источник — ^{57}Co в паллади

ма-резонанса пиролизных маскирующих слоев, осажденных при различных технологических режимах. Спектр маскирующего слоя, полученного при 105°C (рис. 1, б), имеет вид дублета, параметры которого указывают на присутствие в слое парамагнитной окиси железа. Размер зерен слоя, оцененный по величине квадрупольного расщепления дублета, составил ~ 5 нм. С повышением температуры процесса размер зерен окиси железа увеличивался до нескольких десятков нанометров и в спектрах ядерного гамма-резонанса появлялось шесть линий магнитного дипольного расщепления, характерных для спектра крупнозернистой ферромагнитной окиси железа (рис. 1, а). Уменьшение расхода кислорода приводило согласно спектрам (рис. 1, в) к образованию в маскирующих слоях частиц неокислившегося металлического железа. Рост среднего размера зерна с повышением температуры процесса сопровождался резким увеличением времени травления маскирующих слоев (рис. 2) и их дефектности, а также ухудшением разрешающей способности маскирующего слоя. Аналогичные исследования были прове-

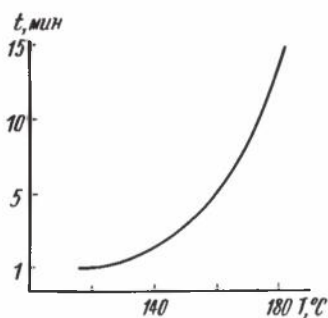


Рис. 2. Зависимость времени травления пленки окиси железа от температуры процесса осаждения

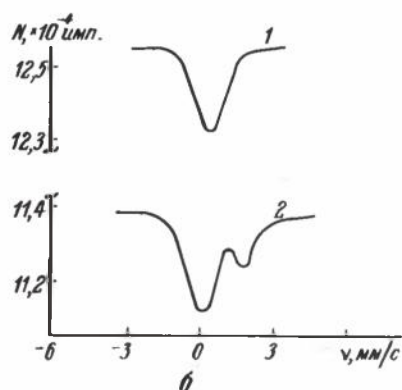
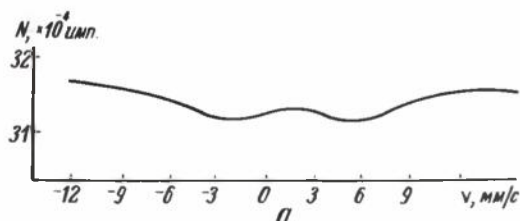


Рис. 3. Спектры ядерного гамма-резонанса стекла $\text{Si}_{10}\text{Te}_4$ на ядрах ^{125}Te с источником $\beta\text{-}^{125\text{m}}\text{TeO}_2$ (а), стекла $\text{Si}_{10}\text{Te}_4$ ^{119}Sn на ядрах ^{119}Sn (б) для объемного (1) и пленочного (2) образцов с источником $^{119\text{m}}\text{Sn}$ в палладию

дены по выяснению влияния длительности процесса, расхода аргона, добавок в реакционную газовую смесь небольшого количества углекислого газа, паров воды и перекиси водорода на фазовый состав маскирующих слоев и качество полученных фотошаблонных заготовок.

Использовались два способа получения спектров ядерного гамма-резонанса: трансмиссионная мессбауэровская спектроскопия и спектроскопия в геометрии рассеяния с применением специального газопроточного пропорционального счетчика [2]. Второй способ позволил анализировать материал маскирующего слоя на глубину $10^2\text{--}10^4$ нм, не удаляя его с поверхности подложек. На базе подобного рода детекторов рассеянного излучения и мессбауэровских источников высокой удельной активности можно создать анализаторы фаз, пригодные для эксплуатации в условиях производства и предназначенные для неразрушающего экспрессного контроля качества некоторых материалов и изделий электронной техники (полупрозрачных фотошаблонных заготовок, электродов для цифровых индикаторов и солнечных элементов на основе окислов олова, пленок железо-иттриевого граната и других магнитных материалов для запоминающих устройств). Испытание в производственных условиях установки, предназначенной для контроля процессов переработки железных руд, показало, что погрешность измерения каждой из трех анализируемых фаз может составлять несколько процентов при общем времени анализа ~ 20 мин [3].

Поскольку эффект ядерного гамма-резонанса можно наблюдать в любой системе сильно взаимодействующих частиц с ограниченным тепловым движением, данный метод является одним из немногих прямых методов контроля структуры некристаллических материалов (стекло, стеклоклеи, пластмасс, аморфных полупроводников, жидких кристаллов). Халькогенидные полупроводниковые стекла — один из перспективных материалов для полупостоянных запоминающих устройств с электрической и оптической перезаписью информации. Решение проблемы получения пленок халькогенидных стекол, воспроизводимых не только по составу, но и по структуре, обуславливает возможность серийного выпуска приборов на их основе с малым разбросом рабочих характеристик и с хорошей временной и температурной стабильностью.

Исследования объемных и пленочных образцов полупроводниковых стекол в системе кремний-теллур, проведенные методом ядерного гамма-резонанса на ядрах ^{125}Te и ^{119}Sn (рис. 3), используемых в качестве "зонда", позволили построить структурную модель стекол этой системы. Согласно этой модели структурная сетка стекла состоит из тетраэдров $[\text{SiTe}_4]$, связанных друг с другом непосредственно или через мостики из одного, двух и более атомов теллура. Процесс получения пленок этого халькогенидного стекла методом вакуум-термического напыления сопровождался образованием микрокристаллических включений других фаз. В спектре ядерного гамма-резонанса

пленочного образца наряду с синглетной линией атомов олова в тетраэдрическом окружении из атомов теллура $[SnTe_4]$, изоморфно замещающих тетраэдры $[SiTe_4]$ в структурной сетке стекла (рис. 3, кривая 1), появляется дополнительная линия спектра ядерного гамма-резонанса теллурида олова (рис. 3, кривая 2). Размер этих микровключений по данным электронно-микроскопических исследований составляет несколько десятков нанометров. Появление их вызвано менее жесткими условиями закалки и в ряде случаев отжигом материала пленки при его напылении на подложки, а также кристаллизацией стекла перед началом испарения и переносом на подложку молекул теллурида олова.

Практический интерес представляют исследования структурных превращений, происходящих в пленках стекол при воздействии на них электрического поля или светового облучения. Знание механизмов этих превращений необходимо для целенаправленного поиска и прогнозирования новых составов халькогенидных стекол, позволяющих получать приборы с лучшими характеристиками.

Проведенные исследования пленок стекол $As_{2,9}Se_{6,9}Sn_{0,5}$ подвергнутых воздействию лазерного и УФ излучения, показали, что валентное состояние и ближайшее окружение атомов олова в структурной сетке стекол сохраняется неизменным после их облучения. Изменения величины эффекта Мессбауэра и ее температурной зависимости после облучения могут быть связаны с процессами фотодиссоциации и фотополимеризации стекол (увеличением длин полимерных цепей, появлением поперечно увязанных структурных образований).

Высокая чувствительность эмиссионной мессбауэровской спектроскопии и характер получаемой информации (валентное состояние примесных атомов, их положение в кристаллической решетке, образование с их участием дополнительных кристаллических фаз и ассоциатов с дефектами кристаллической решетки) позволяют использовать ее для исследования и контроля процессов легирования материалов, от качества которого зависят такие важнейшие электрофизические свойства полупроводниковых материалов, как тип носителей заряда, их концентрация и подвижность. При легировании материалов $A^{III}B^V$ элементами переходной группы наблюдается резкое расхождение между количеством введенной и электрически активной примеси. Исследование процесса легирования монокристаллов GaAs атомами железа до концентрации $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии на ядрах ^{57}Fe показало, что атомы железа встраиваются в кристаллическую решетку $A^{III}B^V$, замещая атомы галлия [4]. Спектр атомов железа в GaAs ($n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) имеет вид одиночной линии с изомерным химическим сдвигом, отвечающим $3d^5$ — электронной конфигурации этих атомов в симметричном тетраэдрическом окружении (рис. 4, а). Все атомы железа электрически ак-

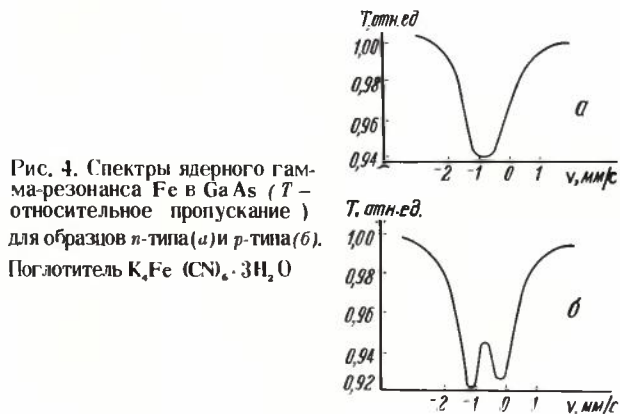


Рис. 4. Спектры ядерного гамма-резонанса Fe в GaAs (T — относительное пропускание) для образцов n -типа (а) и p -типа (б). Поглотитель $K_2Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$

тивны. Появление квадрупольного расщепления в спектре для GaAs ($p = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) вызвано искажением тетраэдрического окружения атомов железа (рис. 4, б) и может быть связано с образованием ассоциатов этих атомов с вакансиями или другими примесными атомами. Атомы железа в этом случае являются электрически неактивной примесью в GaAs.

Методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии было исследовано влияние технологических режимов на характеристики магнитных материалов, в состав которых входят атомы железа. Метод применим и к материалам, в решетке которых имеются кристаллографические узлы с разными внутренними магнитными полями, например ферриты-гранаты и ферриты-шпинели, содержащие ионы железа в различных кристаллографических узлах (тетра- и октаэдрических). Изменения в мессбауэровских спектрах феррита $Mg_{0,8}Mn_{0,2}Ni_{0,6}Fe_{1,4}O_{3,9}$ позволили сделать вывод о переходе ионов Fe^{3+} из октаэдрических узлов в процессе его термической обработки (закалка—исходное состояние—отжиг), что объясняет изменение магнитных характеристик данного материала.

Таким образом, применение метода ядерной гамма-резонансной спектроскопии в технологии материалов и изделий электронной техники способствует решению задач, направленных на повышение их качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Состав и структура карбонильных пленок окиси железа/В.Т.Шипатов, А.В.Коциенко, Б.Г.Грибов и др. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1977, вып. 5, с. 111—114.
2. Шипатов В.Т., Журавлев Г.И. Контроль фазового состава железоокисных покрытий цветных фотошаблонов методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии. — Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством и стандартизация, 1975, вып. 11, с. 45—48.
3. Доленко А.В., Кутилин С.А., Шамов А.И. Гамма-резонансный метод и промышленная автоматизированная установка для фазового анализа железосодержащих материалов. — Вопросы атомной науки и техники. Ядерное приборостроение, 1979, вып. 1, с. 26—33.
4. Эффект Мессбауэра на примесных атомах железа в полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ /Б.И.Болтакс, А.А.Ефимов, П.П.Сергеич, В.Т.Шипатов. — ФТТ, 1970, т. 12, с. 2004—2008.

УДК 621.039.8:620.22:621.382

Г. И. Журавлев, А. Г. Карамов, Б. А. Саламатин

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ЭЛЕКТРОННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Метод радиоактивных индикаторов является универсальным, высоко селективным, экспрессным, неразрушающим методом исследования различных процессов, позволяющим проследить за поведением изучаемых элементов (примесей).

Одной из основных форм применения радиоактивных изотопов является метод радиоактивных индикаторов (РИ), о некоторых аспектах использования которого в электровакуумной технологии уже сообщалось [1].

Как известно, метод РИ является разновидностью метода меченых атомов и основан на тождественности физико-химического поведения изотопов одного и того же элемента. В электронном материаловедении приходится сталкиваться главным образом со специфическими задачами исследования процессов миграции и перераспределения элементов в различных объектах. Поэтому обычно анализ проводят путем введения радиоизотопа изучаемого элемента (примеси) в идентичной с элементом форме в исследуемый объект с последующим определением его методом детектирования излучения. Таким образом, метод РИ является универсальным методом исследования различных процессов, позволяющим проследить за поведением элементов. Его универсальность обусловлена тем, что в настоящее время известны радиоактивные изотопы практически для всех элементов периодической системы. Кроме того, индивидуальные ядерно-физические свойства изотопов (период полураспада, вид и энергия излучения), позволяющие их строго идентифицировать, делают метод высоко селективным, экспрессным и дают возможность осуществлять неразрушающий контроль материалов и проводить автордиографические исследования. К положительным свойствам метода относятся простота и высокая надежность, обусловленные простотой схемы "введено-найдено", снижающей количество мешающих факторов до минимума и ликвидирующей "холостой" опыт.

Основные метрологические характеристики метода РИ (чувствительность и точность индикации) прямо пропорциональны удельной активности используемых препаратов, которая колеблется для различных изотопов от тысячных долей до единиц кюри в грамме и зависит (при оптимальном времени облучения исходного сырья) от степени обогащения исходной смеси нужным стабильным изотопом, от сечения активации ядерной реакции получения и времени "охлаждения" готовых препа-

ратов. Обычно степень обогащения менее критична, чем другие упомянутые факторы, так как колеблется в сравнительно небольшом диапазоне (~ 50–100%).

Поскольку исследования проводятся с использованием преимущественно готовых радиоактивных препаратов, изготовляемых централизованно, то главными факторами, регулирующими чувствительность и точность индикации, следует считать такие, которые непосредственно связаны с радиометрией, а именно: эффективность счета детектора, соотношение между активностями фона и измеряемой пробы и продолжительность радиометрии.

Измерив эталонные пробы (с известным содержанием изотопа), можно оценить чувствительность индикации данного изотопа при заданных допустимых ошибках регистрации активности. Как показали эксперименты, при измерении малоактивных проб целесообразно задаваться оптимальной относительной ошибкой индикации не более $\pm 20\%$ (рис. 1.). Абсолютная чувствительность индикации для различных групп изотопов колеблется в пределах нескольких порядков (табл. 1.). Это необходимо учитывать при постановке конкретных задач исследования и выборе изотопов. Как видно из рис. 1, за счет потери точности можно повысить чувствительность индикации на 1,5–2 порядка.

Несмотря на ряд ограничивающих факторов (например, защита персонала от излучений, требования радиохимической чистоты изотопов и т.п.), можно сказать, что метод РИ является единственным возможным для решения некоторых важных вопросов полупроводникового материаловедения. Так, известно, что примеси оказывают определяющее влияние на свойства полупроводников, поэтому про-

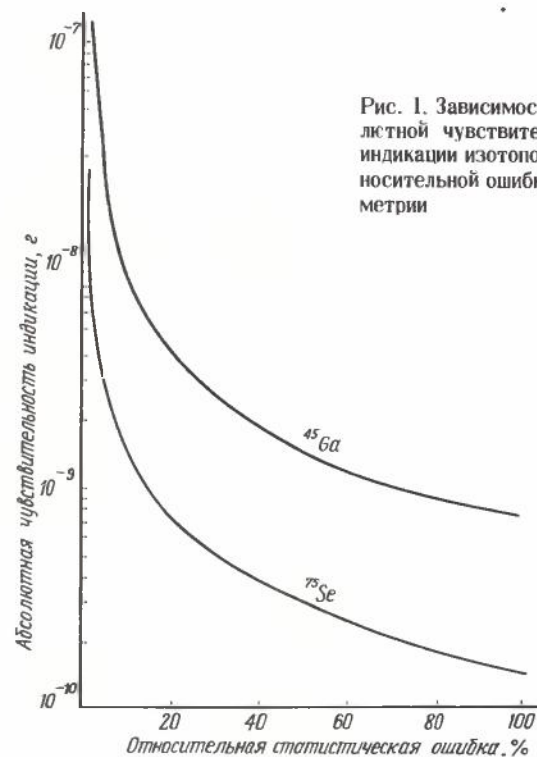


Рис. 1. Зависимость абсолютной чувствительности индикации изотопов от относительной ошибки радиометрии

фили концентрации и коэффициенты распределения примесей в эпитаксиальных структурах и монокристаллах полупроводников являются объектом широкого исследования различными методами анализа. Однако физические методы анализа (измерение эффекта Холла, вольт-емкостный и другие), являясь косвенными, чувствительны только к электрически активным атомам примесей. Поэтому они становятся недостаточно надежными при анализе поведения примесей в "грязных" полупроводниках (например, в полупроводниковых соединениях типа $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$ и твердых растворах на их основе) из-за большого количества в них электрически активных точечных дефектов и посторонних загрязнений, а также явлений политропии и компенсации, т.е. факторов, влияющих на величину концентрации свободных носителей заряда. Прямые методы количественного химического или физико-химического анализа (например, химико-спектральный, масс-спектральный) позволяют определить общее содержание примеси без разделения преднамеренно введенной (легирующей) и "фоновой". "Фоновые" же загрязнения в технологии указанных полупроводников весьма значительны ($> 10^{16} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$), что вызвано высокими температурами технологических процессов, большой реакционной способностью материалов и адсорбционными свойствами поверхности. Обычно уровень "фона" неуправляем и колеблется в широком интервале, даже при строгой воспроизводимости технологических режимов. Все это затрудняет использование прямых количественных аналитических методов для проведения целого ряда исследований, например, механизма формирования

профилей концентрации примесей. Метод РИ, по-видимому, является предпочтительным также при исследовании источников, путей и кинетики загрязнения (и очистки) полупроводниковых материалов, элементов схем и других изделий электронной техники.

С применением метода РИ был проведен широкий круг исследовательских работ.

Изучалось поведение микропримесей при различных методах очистки исходных веществ, применяемых в полупроводниковой технологии, например при очистке Cd , Te , S , Se и $AsCl_3$ методом ректификации, PCl_3 методами дистилляции, ректификации и газовой адсорбции и др. [2]. Были оценены коэффициенты разделения и адсорбции примесей, необходимые для расчета процессов очистки. Чувствительность индикации примесей составляла, $г/см^3$: для Sb , Na , $Sr - 2 \cdot 10^{-12}$; Te , S , Se , Ag , $Cs - 1 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-10}$; Ca , $Cd - 1 \cdot 10^{-7}$; W , Sn , Cr , Ta , Ni , Cu , $Mo - 10^{-8} \div 10^{-9}$; $Mn - 10^{-13}$; $Co - 10^{-11}$; $Zn - 2 \cdot 10^{-10}$. Как правило, чувствительность была лучше, чем требуется для измерения остаточных уровней загрязнения материалов, и соответствовала лучшим показателям других аналитических методов.

Исследовалось поведение примесей в процессе разработки оптимальной технологии очистки поверхности полупроводниковых пластин, например пластин монокристаллического кремния для интегральных схем ионоплазменным методом [3]. Чувствительность индикации по отдельным примесям составляла, $см^{-2}$: $Mn - 2,3 \cdot 10^6$; Na , $Ag - 5 \cdot 10^{10} \div 8,4 \cdot 10^{11}$; Cu , Ta , Fe , Zn , $Te - (1,1 \div 8,8) \cdot 10^{12}$; Mo , Cr , $Se - (1,5 \div 2) \cdot 10^{13}$.

Было исследовано поведение примесей в процессах выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ методом Чохральского, в частности легирующих добавок II, IV, VI и переходной групп в $GaAs$ [4], GaP [4-6] и InP [7,8], с целью оптимизации процессов кристаллизации и легирования. Минимальное содержание вводимых в кристаллы легирующих добавок колебалось в диапазоне $(1 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что было значительно ниже суммы неконтролируемых загрязнений кристаллов и выше чувствительности индикации используемых элементов, составившей, $см^{-3}$: $Mn - 1,4 \cdot 10^8$; Ag , $Se - (2 \div 5) \cdot 10^{12}$; Mo , Cu , $Ta - (3 \div 9) \cdot 10^{13}$; Zn , Te , $Cr - 10^{14}$; $S - 4 \cdot 10^{15}$; $Ni - 10^{16}$. Оценивались характер и степень однородности распределения примесей в объеме монокристаллов при различных режимах выращивания, коэффициенты распределения в системе расплав - герметизирующий флюс, зависимость эффективных коэффициентов распределения примесей между расплавом и кристаллом от кинетики роста (скоростей вращения тигля и затравки, скорости вытягивания), кристаллографической ориентации затравки, концентрации примесей. С помощью автордиографии были выявлены также различные типы микро неоднородностей распределения, в том числе наличие включений второй фазы примеси в объеме матрицы. В результате определялись условия роста монокристаллов, при которых наблюдалось

Таблица 1

Абсолютная чувствительность индикации изотопов, достигаемая при относительной ошибке $\pm 5\%$.

Изотоп	Тип детектора	Прибор, в котором используется детектор	Эффективность счета, %	Абсолютная чувствительность индикации, г
^{31}Si ; ^{44}Ca	БФЛ-Т-25	Б ШС-2	30	
^{99}Mo ; ^{109m}Cd	NaI(Tl); $\phi 40 \times 40$; ФУ-13 NaI(Tl); $\phi 25 \times 25$; ФУ-35	БДБСЗ-1eM 6931-17	45 38	10^{-7}
^{51}Cr ; ^{64}Cu ^{152m}Eu ; ^{137m}Te ; ^{182}Ta	NaI(Tl); $\phi 40 \times 40$; ФУ-93 NaI(Tl); $\phi 25 \times 25$; ФУ-35	БДЭГ2-22 6931-17	51 38	10^{-8}
^{60}Ni	Пропорциональный проточный 4-л счетчик типа 6364-01	2154-1-14 "Протока"	> 95	
^{75}Se ; ^{110m}Ag ^{137}Cs	NaI(Tl); $\phi 63 \times 63$; ФУ-82 NaI(Tl); $\phi 40 \times 40$; ФУ-93	БДЭГ2-23 БДЭГ2-22	67 51	10^{-8}
^{35}S	Гейгеровский счетчик с микропленочным окном	Nuclear Chicago	43	
^{65}Zn	NaI(Tl); $\phi 63 \times 63$; ФУ-82	БДЭГ2-23	67	10^{-10}
^{23}Na ^{60}Co	NaI(Tl); $\phi 150 \times 100$; ФУ-49Б NaI(Tl); $\phi 25 \times 25$; ФУ-35	6931-20 6931-17	82 38	10^{-11}
^{125}Sb	NaI(Tl); $\phi 40 \times 40$; ФУ-13	БДБСЗ-1eM	45	10^{-12}
^{87}Sr	Антрацен $\phi 25 \times 10$	БДБСЗ-1eM	20	
^{55}Mn	NaI(Tl); $\phi 63 \times 63$; 6C коллоидом	БДБСЗ-1eM	> 50	10^{-13}

минимальное количество аномалий распределения примесей.

Проанализировано поведение примесей в процессах наращивания легированных эпитаксиальных слоев различных полупроводниковых соединений при создании структур для электронных приборов и устройств различного назначения. Основными объектами исследований служили двух-, трех- и многослойные эпитаксиальные структуры GaP для светодиодов, легированные элементами II и VI групп, получаемые методами изотермической жидкофазной эпитаксии и эпитаксии в охлаждаемых растворах-расплавах в реакторах проточного типа [9]; жидкофазные эпитаксиальные структуры InSb, легированные элементами VI группы [10]; газофазные гетероэпитаксиальные структуры GaN на сапфире [11]; газофазные эпитаксиальные слои GaAs [12, 13] и $GaAs_xP_{1-x}$ наращиваемые соответственно в хлоридном и хлоридно-гидридном процессах. Исследовались средние уровни легирования и профили концентрации примесей по глубине структур, наращиваемых в различных режимах, коэффициенты распределения примеси, их температурная и концентрационная зависимости, процессы гомогенизации и испарения примесей из расплава при эпитаксии, механизмы образования результирующих профилей концентрации примесей и т.д. Так как чувствительность индикации примесей в тонких слоях материалов в значительной степени лимитируется анализируемой навеской (площадью пластины и толщиной анализируемого слоя), она колеблется в широком интервале и превышает пределы, указанные для кристаллов. Однако при толщине слоя 1 мкм и диаметре пластины 30 мм чувствительность по основным легирующим примесям (Zn, Te, Se, Cr) была не хуже $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что удовлетворяло целям проводимых исследований.

Изучалась диффузия примесей в полупроводниковых соединениях, например, легирующих примесей цинка и селена в эпитаксиальных слоях твердых растворов $GaP_{1-x}(ZnSe)_x$ [14], а также цинка в $GaAs_xP_{1-x}$ и InGaAsP, и диффузия примесей в маскирующих покрытиях Si_3N_4 , SiO_2 , Al_2O_3 , Nb_2O_5 и Ta_2O_5 для определения защитных свойств покрытий [15].

Рассмотрим некоторые общие проблемы, связанные с решением ряда задач материаловедения. К ним следует отнести анализ профилей концентрации примесей (изотопов) в тонких слоях вещества. Для этой цели наиболее часто используется метод послонной радиометрии, заключающийся в последовательном снятии тонких параллельных слоев вещества преимущественно с помощью химических полирующих травителей и измерении активности растворов. Толщина снятого слоя либо рассчитывается по изменению веса пластины, либо оценивается путем физических или оптических измерений. Правильность анализа профиля концентрации зависит не только от точности оценки массы примеси в анализируемой пробе, но и от точности оценки толщины (координаты) снимаемого

слоя вещества, которая в свою очередь определяется точностью взвешивания, а также шероховатостью поверхности, степенью параллельности снимаемых слоев, наличием завалов на краях пластины, т.е. факторами, связанными главным образом с качеством обработки поверхности пластин травителями.

Так, если шаг травления соизмерим с шероховатостью поверхности, то это может привести к значительной неопределенности в оценке толщины стравленного слоя (относительная ошибка может достигать $\pm 50\%$ и более). Составы травителей, характеризующиеся большими скоростями травления и требующие поддержания повышенных температур, часто оказываются мало пригодными из-за ухудшения контроля воспроизводимости результатов анализа. Поэтому необходим строгий и дифференцированный подход к подбору травителей.

В табл. 2 представлены характеристики травителей, использованных для послонной радиометрии монокристаллических слоев полупроводников при комнатной температуре (1–3 — известные составы, 4–5 — модифицированные и 6, 7 — вновь разработанные).

Правильность анализа зависит не только от качества травления, но и от качества анализируемого слоя. Так, в случае растратов поверхности на различных дефектах искажения в результатах анализа могут возникать вследствие регистрации дополнительной примеси, привносимой с глубинных слоев материала и особенно заметной при анализе слоев с резким профилем концентрации, характеризующимся увеличением содержания примеси в глубину. Наиболее сильное искажение профиля наблюдается при наличии включений второй фазы (или других скоплений) анализируемой примеси на поверхности и в объеме материала, не выяв-

Таблица 2

Характеристика травителей для послонной радиометрии

№ п/п	Состав травителя*	Анализируемый слой	Скорость травления, мкм/мин	Высота профиля (качество поверхности), мм
1	$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 5:1:1$	GaAs (100), (111)B	1,0	10
2	$CH_3OH : Br_2 = 100:1$	GaAs, InP (100), (111)B	1,0	10–15
3	HNO_3 ; молочная кислота = 1:10	InSb (100), (111)B	50–60	Полированная (иногда видна окисная пленка)
4	Винная кислота (27% нмй раствор): HF: $H_2O_2 = 10:3,5:0,5$	InSb (111)B	1,0–2,0	Зеркальная
5	$CH_3OH : Br_2 : H_2O = 1,5:0,02:0,5$	GaP (100), (111)B	1,0–1,5	50
6	Трифторэтан 1,1,2 трихлорэтан (фреон-113) : $Br_2 = 20:1$	GaP от (100) до (111)	0,1–0,3	10
7	$KMnO_4 : HCl^{(к)} : H_2O = 10:35:55$	GaP (100), (111)B	1,0–2,0	10–15

*Соотношение компонентов в травителях 1–6 дано по объему, в травителе 7 — в процентах по массе.

ляемых обычными химико-аналитическими методами. В связи с этим была использована отбраковка пластин по результатам их автордиографии. На рис. 2 представлена автордиограмма кристаллической шайбы InP, содержащей включения второй фазы $^{55+59}\text{Fe}$, выявляемые в виде отдельных точек. Как следует из рис. 2, анализ профиля концентрации железа в данной пластине не имеет смысла.

На рис. 3, 4 приведено распределение ^{65}Zn и $^{125\text{m}}\text{Te}$ по глубине жидкофазных эпитаксиальных структур GaP, выращенных в различных режимах эпитаксии при разных способах легирования. Характер профилей концентраций неидентичен и показывает преобладание того или иного механизма их формирования [9].

Существенным вопросом является возможность радиометрии образцов без разрушения с целью сохранения их для последующих измерений (например, электрофизических и структурных), а также упрощения, ускорения и повышения надежности анализа. Неразрушающая радиометрия возможна только для изотопов γ -излучателей благодаря относительно низкому коэффициенту самопоглощения в большинстве материалов. Применительно к ним широко используются экспресс-методы, например метод неразрушающей радиометрии образцов монокристаллов полупроводников. Он заключается в том, что вырезанные из крупных слитков шайбы одинаковой толщины и эталоны сравнения (растворы, нанесенные на тонкую бумажную мишень диаметром 15–40 мм) помещают на поверхность детектора (в центр), которым является сцинтилляционный кристалл NaI (Tl), а искомая концентрация рассчитывается по формуле

$$C = S \cdot C' = S \cdot \frac{100 \cdot A_x \cdot m_x}{A_z \cdot M_x} \quad (1)$$

где S – поправочный коэффициент, учитывающий различные геометрические условия измерения образца и эталона; C' – эффективная концентрация изотопа в образце; A_x, A_z – скорости счета активности образца и эталона, соответственно; M_x, m_z – массы образца и эталонного изотопа, соответственно.

Для определения S необходимо предварительно измерить C' в нескольких образцах, вырезанных из одного материала, затем определить в них

Рис. 2. Автордиограмма сечения монокристалла InP, легированного изотопами $^{55+59}\text{Fe}$, показывающая наличие включений второй фазы изотопов

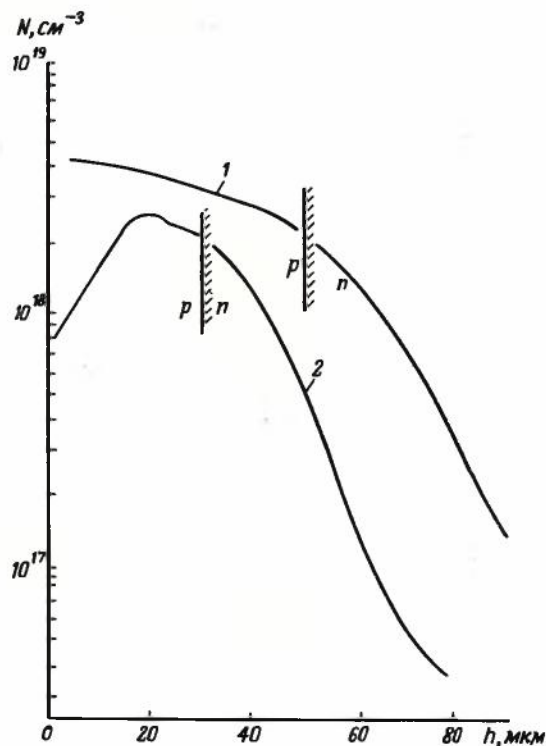
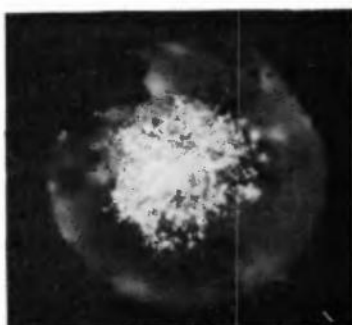


Рис. 3. Профили концентраций ^{65}Zn в эпитаксиальных структурах GaP, выращенных из растворов галлия методом изотермической эпитаксии (1) и при охлаждении раствора со скоростью $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ (2)

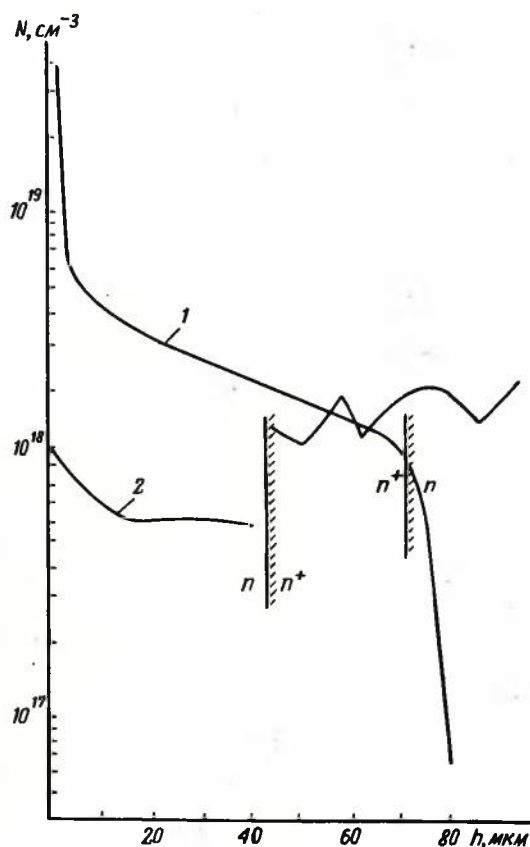


Рис. 4. Профили концентраций $^{125\text{m}}\text{Te}$ в эпитаксиальных n - n^+ структурах GaP, выращенных при охлаждении растворов галлия, легированных внесением $^{125\text{m}}\text{Te}$ в расплав (1) и путем подрастворения подложки GaP, легированной ^{125}Te (2)

C обычным способом, т.е. переведя образцы в жидкие пробы и измерив их активность (при строгом соответствии геометрии образца и эталона).

Величина $S = \frac{C}{C_0} \geq 1$ используется в дальнейшем

при расчете C в других измеряемых образцах того же материала с той же толщиной (S зависит от энергии γ -излучения изотопов, плотности вещества и размеров образца). При одинаковой толщине образцов для одного и того же изотопа и детектора S может быть непостоянным из-за различной формы и площади образцов вследствие различного телесного угла, стягиваемого чувствительным объемом сцинтиллятора, что влияет на эффективность регистрации γ -излучения (ϵ). Указанное различие в геометрии измерений может вносить ошибку в результаты, вычисляемые по формуле (1). Обычно эта ошибка учитывается с помощью топограммы детектора (рис. 5), представляющей собой "изоэффективные" линии, нанесенные на поверхность детектора. Линии ограничивают площади, при регистрации с которых колеба-

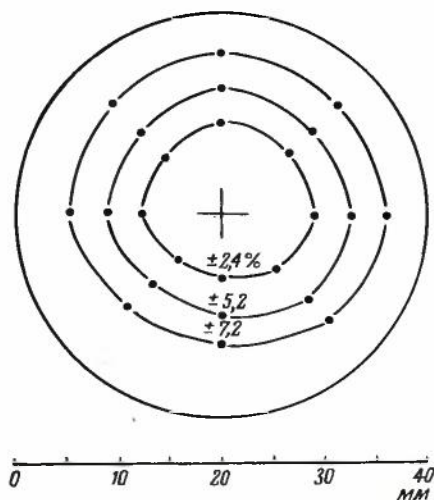


Рис. 5. Топограмма относительных колебаний эффективности регистрации γ -квантов при измерении активности кристаллических образцов GaAs и GaP

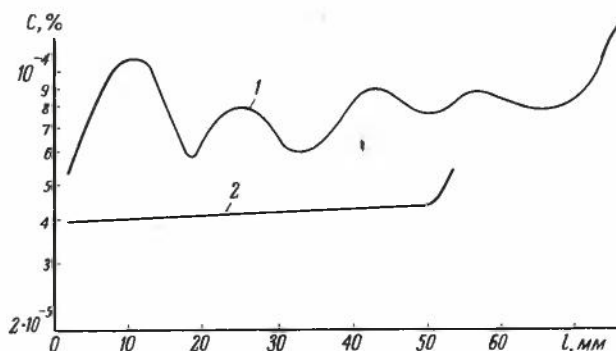


Рис. 6. Распределение примеси ^{51}Gr в направлении оси роста (1) монокристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского из-под слоя V_2O_5 ; 1 — при наличии "концентрационного переохлаждения" расплава ($C_0 = 7,5 \cdot 10^{-2}\%$, $f = 1,0$ см/ч); 2 — без него ($C_0 = 5 \cdot 10^{-2}\%$, $f = 2,0$ см/ч)

ния интегральной величины ϵ не превышают определенного значения.

Метод РИ является достаточно точным для выявления различных аномалий распределения примесей в монокристаллах полупроводников. На рис. 6 представлено распределение примеси ^{51}Gr в направлении роста высокоомных монокристаллов GaAs, полученное экспериментально методом РИ. При больших концентрациях примеси в расплаве и высоких скоростях роста f наблюдается волнообразность распределения (кривая 1), которая исчезает (кривая 2) при снижении концентрации до величин ниже критических. Это связано с известным явлением "концентрационного" переохлаждения расплава. Относительные ошибки в определении C в данных опытах не превышали $\pm 5\%$.

Метод неразрушающего контроля существенно упрощается, если энергия излучения изотопов $E_\gamma \geq 1$ МэВ. В этих случаях при толщинах образцов полупроводников ≤ 3 мм величина S близка к единице и ее можно не определять. Аналогично $S = 1$ при анализе тонких (< 100 мкм) слоев полупроводников (даже при $E_\gamma < 1$ МэВ), что позволяет достаточно точно оценивать средний уровень легирования эпитаксиальных слоев без разрушения структур [10, 11].

Возможности метода РИ, представленные в данной работе, могут быть расширены благодаря улучшению точности и чувствительности индикации, повышению радиохимической чистоты изотопов и т.д., что связано с перспективами усиления и стабилизации аналитического сигнала, например, путем использования детекторов на жидких сцинтилляторах с более высокой эффективностью счета.

Применение разновидностей метода (криптоновой автордиографии и др.) позволит решать вопросы, связанные с тонким исследованием структуры материалов, что в сочетании с другими методами даст возможность прецизионного исследования новых материалов и технологий, в том числе космической.

Перспективы повышения экспрессности метода РИ связаны с использованием автоматических счетных установок с машинной обработкой результатов по заданной программе, а также систем с многоканальными анализаторами импульсов, позволяющими применять для исследований многокомпонентные смеси радиоактивных изотопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.П. Радиоактивные изотопы в электронной технике. — М.: Атомиздат, 1971. — 173 с.
2. Очистка треххлористого фосфора от примесей серы, селена и теллура/А.Г. Сабинин, А.П. Фералонтов, Б.А. Саламатин и др. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1979, вып. 6, с. 82–84.
3. Поведение микропримесей металлов в процессе обработки кремниевых пластин в поле галогеносодержащей высокочастотной плазмы/Н.В. Ванюкова, В.П. Суходаева, А.Г. Карамов и др. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1979, вып. 4, с. 83–86.
4. Макросегрегация металлов переходной группы железа в арсениде и фосфиде галлия/Е.Б. Соколов, А.Г. Карамов, В.К. Прокофьева и др. — В кн.: Четвертая Всесоюзная конференция по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов: Тез. докл. — М.: ИМЕТ им. Байкова, 1979, с. 141.
5. Карамов А.Г., Окунев Ю.А., Соколов Е.Б. Особенности распределения серы в монокристаллах фосфида гал-

лия. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1976, вып. 5, с. 46–51.

6. Распределение легирующих компонентов окиси хрома в высокоомных монокристаллах GaP/В.А. Савельев, А.Г. Карамов, А.А. Картушина и др. — Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1977, т. 13, № 5, с. 776–779.

7. Поведение некоторых легирующих примесей в фосфиде индия/В.А. Нагиев, Л.И. Передерий, А.Г. Карамов и др. — В кн.: Четвертая Всесоюзная конференция по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов: Тез. докл. — М.: ИМЕТ им. Байкова, 1979, с. 45.

8. Характер распределения теллура и олова в монокристаллах фосфида индия/А.Г. Карамов, В.В. Селин, В.А. Антонов и др. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1978, вып. 1, с. 63–65.

9. Распределение примесей в многослойных эпитаксиальных структурах фосфида галлия/А.Г. Карамов, В.Л. Воробьев, Т.Е. Першина и др. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1978, вып. 8, с. 66–69.

10. Коэффициенты распределения элементов VI группы в эпитаксиальных слоях InSb/Г.Г. Бурлаку, В.Н. Вигдорович, А.Г. Карамов и др. — В кн.: Четвертая Всесоюзная конференция по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов: Тез. докл. — М.: ИМЕТ им. Байкова, 1979, с. 35.

11. Исследование макро- и микросегрегации цинка в GaN/В.М. Андреев, А.Г. Карамов, В.Л. Оплеснин и др. — Там же, с. 149.

12. Миграция хрома в процессе газовой эпитаксии GaAs/В.М. Андреев, М.В. Гунашвили, А.Г. Карамов и др. — Там же, с. 148.

13. К вопросу о переходе углерода из триметилгаллия в пленки арсенида галлия/Ю.В. Слепнев, Е.С. Бурдина, Б.А. Саламатин и др. — В кн.: II Всесоюзное совещание по металлоорганическим соединениям для получения металлических и окисных покрытий: Тез. докл. — М.: Наука, 1977, с. 53.

14. Диффузия цинка и селена в эпитаксиальных слоях твердого раствора (GaP)_{1-x}(ZnSe)_x/А.Г. Карамов, В.Б. Уфимцев, А.И. Червяков и др. — В кн.: Четвертая Всесоюзная конференция по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов: Тез. докл. — М.: ИМЕТ им. Байкова, 1979, с. 94.

15. Свойства окисных пленок, полученных разложением металлоорганических соединений в паровой фазе/А.В. Кошменко, А.С. Стрижкова, Б.А. Саламатин и др. — В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции по получению пленок из летучих и металлоорганических соединений. — М.: МИФИ, 1979, с. 43.

Статья поступила 4 апреля 1980 г.

УДК 621.039.5:621.315.592:539.219.1

Г. А. Пережогин

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Послойный нейтронно-активационный анализ позволяет исследовать распределение концентрации легирующих примесей в кремниевых эпитаксиальных, диффузионных и ионно-имплантированных слоях, а также изучать поведение микропримесей в различных процессах планарной технологии.

Качество приборов полупроводниковой микроэлектроники в значительной степени зависит от микропримесей, специально вводимых при выра-

живании монокристаллов, эпитаксии, диффузии, ионной имплантации, или от примесей, случайно попадающих из окружающей среды и конструктивных материалов.

Для контроля примесного состава полупроводниковых структур, изготавливаемых по планарной технологии, применяются ядерно-физические методы [1]. Одним из них является нейтронно-активационный анализ, основанный на облучении анализируемого материала нейтронами атомного реактора и измерении ионизирующего излучения радиоизотопов. Благодаря задержке аналитического сигнала во времени (радиоизотопы распадаются не мгновенно, а по экспоненциальному закону с характерной для каждого из них константой распада) радиоактивационный анализ обладает рядом уникальных возможностей. В промежутке между энергетическим воздействием на пробу и измерением аналитического сигнала облученную пробу можно транспортировать на значительное расстояние, удалять с нее поверхностные загрязнения или тонкие слои, использовать для радио-химической очистки радиоизотопов обычные химические реактивы, даже если анализируются высокочистые материалы.

Из объектов анализа наиболее подходящими для исследования являются твердые тела, состоящие из кремния, кислорода, азота и углерода, так как радиоизотопы этих элементов либо образуются с небольшим выходом, либо имеют малое время жизни, в то время как для проведения анализа соединений типа $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$ требуется специальная защитная техника и необходимы большие затраты труда на радиохимическую очистку примесных элементов от элементов основы. Поэтому нейтронно-активационный анализ применяют преимущественно для определения примесей в структурах на основе кремния, оксида, нитрида и карбида кремния, а также в некоторых конструктивных материалах (графит, кварц). Среди примесных элементов наиболее удобными для исследования ядерными характеристиками (высоким сечением активации и периодом полураспада свыше нескольких часов) обладают фосфор, мышьяк, сурьма, индий, галлий, которые в полупроводниковой технологии используются в качестве легирующих добавок к кремнию, а также золото, медь, натрий, вольфрам и другие. Бор, который обычно применяется для создания в кремнии p -типа проводимости, можно определять с высокой чувствительностью другими ядерно-физическими методами [1].

Профиль распределения концентрации примеси по толщине тонкой пленки или приповерхностного слоя определяют с помощью послойного анализа. Концентрационная чувствительность метода зависит от площади анализируемой поверхности и толщины удаляемого слоя. Поэтому для послойного анализа используют структуры без фотолитогра-

фического рисунка ("спутники") с однородным распределением примеси по всей поверхности пластины. Для удаления тонких слоев обычно применяют химическое травление поверхности, а также анодное окисление с последующим растворением пленки окисла. Методы химического травления более экспрессны и универсальны, поскольку с их помощью можно удалять слои с поверхности полупроводников, а также диэлектрических и металлических пленок. Кроме того, они обладают высокой избирательностью, что важно при анализе многослойных структур.

В микроэлектронной технике нейтронно-активационный анализ применяется в основном для контроля чистоты объемных материалов, анализа тонких пленок, определения профилей распределения концентраций примесей в полупроводниковых структурах, изготавливаемых методами планарной технологии, исследования поведения микропримесей в диффузионных, окислительных, эпитаксиальных и плазмохимических процессах, при ионной имплантации, для активационно-автордиографического исследования распределения примеси по поверхности.

Контроль распределения легирующих примесей. При изготовлении планарных транзисторов и интегральных схем легирующие примеси вводят в полупроводник в процессе выращивания монокристаллов и эпитаксиальных слоев, а также при диффузии и ионной имплантации.

Качество эпитаксиальных структур, выращенных на сильнолегированных подложках или подложках со "скрытым" слоем, зависит от профиля автолегирования в переходной области эпитаксиальный слой — подложка и от уровня автолегирования по всей толщине эпитаксиального слоя. В результате сравнения экспериментальных и расчетных профилей автолегирования фосфора и сурьмы из легированной подложки в эпитаксиальный слой и диффузионных профилей в монокристаллическом и эпитаксиально выращенном кремнии было установлено, что автолегирование в переходной области происходит за счет твердотельной диффузии с коэффициентом диффузии для монокристаллического кремния. На уровень автолегирования по всей толщине эпитаксиального слоя влияет перенос легирующей примеси с тыльной стороны подложки через газовую фазу. Даже при эпитаксиальном наращивании на "скрытом" слое, когда поверхность подложки покрывается растущим слоем, препятствующим переходу примеси в газовую фазу, автолегирование через газовую фазу не прекращается. Но источником автолегирования при этом является пьедестал, который загрязняется легирующей примесью во время предэпитаксиального отжига.

Необходимость определения диффузионного

профиля возникает обычно в тех случаях, когда неясен механизм диффузии или коэффициент диффузии зависит от концентрации легирующей примеси или плотности дислокаций. Метод радиоактивных изотопов, часто используемый для определения диффузионных профилей, ограничен, так как в производственных условиях диффузию легирующей примеси часто проводят в открытой системе и применение радиоактивных изотопов связано с риском загрязнения аппаратуры и окружающей среды. Даже диффузия из легированных окислов сопровождается испарением значительной части примеси.

Практический интерес представляют случаи одновременной диффузии двух примесей (например, фосфора и мышьяка из легирующей композиции на основе тетраэтоксисилана [2] или фосфора и германия методом открытой трубы [3]) с целью снижения дефектности диффузионных слоев.

В последнее время для легирования полупроводников все шире применяют метод ионной имплантации. Теория взаимодействия ускоренных ионов с твердым полупроводником позволяет рассчитать наиболее вероятную глубину внедрения и форму профиля внедренных ионов, однако на практике нередко наблюдают искажение гауссовского распределения и образование "хвостов" в имплантированном профиле.

При термообработке кремниевых пластин с ионно-имплантированными слоями в окислительной среде характер перераспределения примеси существенно зависит от природы имплантированного элемента. Так после термического окисления ионно-имплантированного слоя мышьяк почти полностью остается в кремнии и оттесняется границей двуокись кремния — кремний вглубь подложки (рис. 1), а сурьма почти полностью вытесняется в промежуточный слой на границе SiO_2 —Si. При этом максимальная концентрация сурьмы в кремнии не превышает $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует предельной растворимости этого элемента в кремнии. С увеличением времени термообработки сурьма почти полностью диффундирует из промежуточного слоя в кремний. Характер распределения мышьяка и сурьмы в растущей пленке двуокиси кремния примерно одинаков (самая низкая и почти равномерная концентрация примеси — в объеме пленки SiO_2 , и резкое увеличение концентрации — в приповерхностном слое и вблизи границы с кремнием).

В настоящее время широкое применение находят способы окисления кремния в присутствии хлора или хлорсодержащих соединений. Для понимания стабилизирующих свойств "хлорных" пленок двуокиси кремния необходимо знать распределение хлора по толщине. Несмотря на весьма короткий период полураспада радионуклида ^{36}Cl ($T_{1/2} =$

= 38 мин), был определен профиль концентрации хлора в пленках двуокиси кремния, выращенных путем окисления кремния в присутствии трихлорэтилена [4]. Как видно из рис. 2, почти весь хлор концентрируется вблизи границы с кремнием в слое SiO_2 толщиной 20–30 нм.

Контроль концентрации чужеродных примесей.

Технологический цикл изготовления интегральных схем включает большое число операций, каждая из которых может быть причиной неконтролируемых поверхностных загрязнений, диффундирующих в активную область приборов при последующих высокотемпературных обработках. При нейтронно-активационном определении примесей на поверхности возникает трудность сохранения поверхностной чистоты на стадиях подготовки анализируемой пробы к облучению и облучения ее в атомном реакторе [5].

В эпитаксиальных слоях, содержащих кристаллические дефекты, с помощью активационного анализа были обнаружены железо, хром, никель и в меньшей степени кобальт, вольфрам и золото. Считают, что источником загрязнения эпитаксиального слоя металлическими примесями является пьедестал, на который примеси попадают от стального пинцета при загрузке пластин. В ионно-имплантированном слое кремния также были обнаружены элементы группы железа, которые, как предполагают, попадают в кремний вследствие распыления ионным пучком держателей пластин, изготовленных из нержавеющей стали. Помимо примесей металлов в имплантированном слое обнаружены также легирующие примеси, которые ранее использовались для имплантации.

Качество пленок двуокиси кремния существенно зависит от содержания щелочных металлов, особенно натрия. В связи с этим большое внимание уделяется определению натрия в пленках двуокиси кремния, получаемых термическим окислением кремния, пиролизическими и ионно-плазменными методами. Концентрация натрия в термически окисленном кремнии находится в диапазоне $5 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что значительно выше, чем в монокристаллическом кремнии ($5 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

Исследование поведения вредных примесей при термических обработках. Послойный нейтронно-активационный анализ применяют для изучения поведения не только легирующих, но и вредных примесей. Для этого примесь наносят искусственным путем на поверхность или вводят в объем исследуемой структуры и проводят послойный анализ после термической обработки или какой-либо иной технологической операции. Было показано, например, что в присутствии паров воды уже при температуре 400°C натрий быстро диффундирует в объем пленки двуокиси кремния, тогда как в сухой атмосфере даже при 500°C он

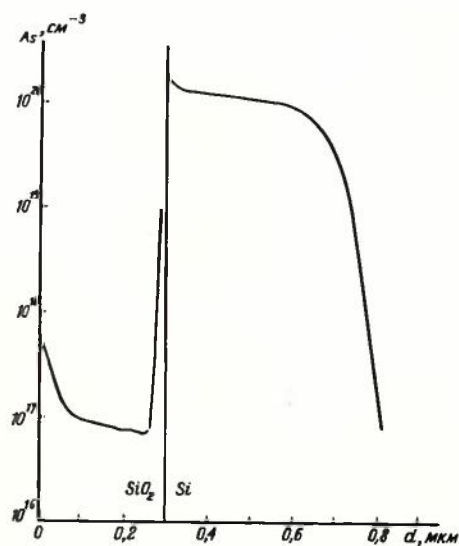


Рис. 1. Профили концентрации мышьяка в Si и SiO_2 после термического окисления кремния с ионно-имплантированным слоем

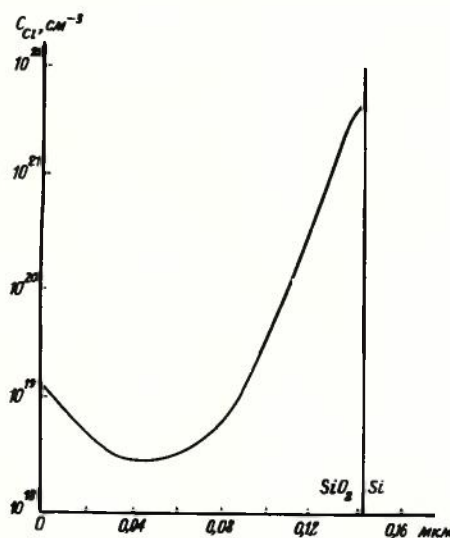


Рис. 2. Профиль концентрации хлора в пленке SiO_2 , выращенной окислением кремния в присутствии трихлорэтилена

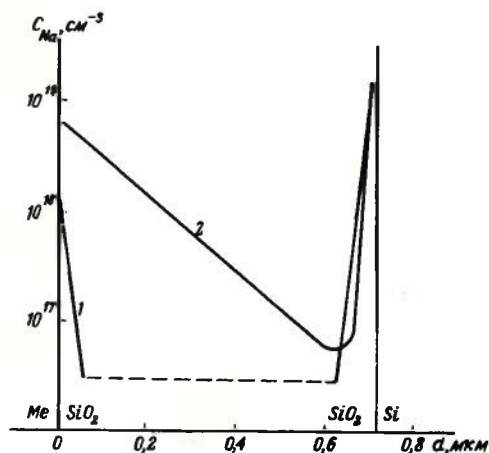


Рис. 3. Профили концентрации натрия в пленке SiO_2 после нанесения алюминия (1) и золота (2) на загрязненную натрием поверхность двуокиси кремния

проникает лишь в тонкий приповерхностный слой пленки SiO_2 . При вакуумном напылении алюминия на загрязненную натрием поверхность пленки двуокиси кремния при 300°C часть атомов натрия проникает через всю толщину пленки SiO_2 и накапливается на границе $\text{SiO}_2\text{—Si}$ (рис. 3, кривая 1). При напылении золота натрий остается на границе металл-диэлектрик. Однако при нанесении золотой пленки методом катодного распыления атомы натрия проникают через всю пленку SiO_2 уже в процессе ее нанесения (рис. 3, кривая 2). Аналогичным образом было исследовано проникновение атомов натрия через двухслойные диэлектрические структуры, состоящие из термической и пиролитической пленок двуокиси кремния или термической пленки SiO_2 и фосфорно-силикатного стекла [6, 7].

Активационно-авторадиографическое исследование. Метод заключается в облучении образца в виде тонкой пластины и регистрации ионизирующего излучения радиоизотопов примесных элементов по почернению эмульсионного слоя фотопластинки. Анализ пригоден только для тех материалов, в которых при облучении нейтронами образуются короткоживущие радиоизотопы [8]. Этому требованию отвечает кремний: радиоактивность радиоизотопа ^{31}Si уже через двое суток после облучения уменьшается почти в миллион раз и не вызывает почернения фотопластинки. Достоинством авторадиографического метода является возможность регистрации примесей локально распределенных по поверхности пластины или косоугольного шлифа, недостатком — отсутствие избирательности. Авторадиография может применяться для оценки качества отмытки поверхности кремниевых пластин и при исследовании процессов легирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов Б.С., Кузьмин Л.Е. Ядерно-физические методы анализа поверхностных слоев твердых тел и тонких пленок. — В кн.: Современные методы анализа микрообъектов и тонких пленок. — М.: Наука, 1977, с. 280—305.
2. Снижение дефектности диффузионных слоев / О.Ф. Вихляев, К.В. Зиновьев, Л.К. Коледов и др. — Электронная промышленность, 1976, вып. 6, с. 46—48.
3. Исследование последовательной и одновременной диффузии фосфора и германия в кремний с использованием метода открытой трубы / Т.П. Гапеева, Л.А. Коледов, Г.А. Пережогин, Л.Н. Сергеев. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1977, вып. 4, с. 42—47.
4. Золотарев В.И., Кандыба П.Е., Пережогин Г.А. Распределение хлора в пленках двуокиси кремния, выращенных термическим окислением кремния в присутствии трихлорэтилена. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1976, вып. 3, с. 78—83.
5. Пережогин Г.А. Нейтронно-активационное определение примесей на поверхности кремниевых пластин. — Журнал аналитической химии, 1978, т. 33, № 3, с. 449—452.
6. Пережогин Г.А., Назаров И.Н. Распределение натрия в структурах $\text{fCC—SiO}_2\text{—Si}$ и $\text{Al—fCC—SiO}_2\text{—Si}$ после термической обработки. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1976, вып. 5, с. 85—90.

7. Назаров И.Н., Пережогин Г.А. Распределение натрия в пленках SiO_2 , полученных путем термического разложения тетраэтоксилана. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1977, вып. 2, с. 70—74.

8. Пережогин Г.А., Бирюков В.М. Применение активационно-авторадиографического метода в планарной технологии. — Электронная техника. Сер. Материалы, 1974, вып. 8, с. 115—117.

Статья поступила 4 апреля 1980 г.

УДК 620.179

В. И. Прилипко, Е. П. Прокопьев

ПОЗИТРОННАЯ АННИГИЛЯЦИЯ — НОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

Метод позитронной аннигиляции дает возможность изучить механизмы и динамику возникновения, превращения и аннигиляции дефектов в полупроводниковых материалах на различных стадиях технологического процесса.

Применение метода позитронной аннигиляции для исследования структуры материалов электронной техники стало возможным благодаря исследованию процесса аннигиляции позитронов в этих материалах, позволившему выяснить природу позитронных состояний и их последующего аннигиляционного распада. С помощью теоретического анализа позитронных процессов и состояний в этих веществах была установлена связь между основными характеристиками аннигиляционных спектров (угловым распределением аннигиляционных фотонов, временными спектрами аннигиляции и относительной скоростью счета совпадений 3γ -квантов) и константами скоростей образования и распада этих состояний, что дало возможность получать полезную информацию об исследуемых объектах. Наиболее важными вопросами, которые могут быть решены с помощью метода позитронной аннигиляции, представляющего собой метод неразрушающего контроля, являются: исследование анизотропии электронной плотности в монокристаллах полупроводников и ионных кристаллах для различных кристаллографических ориентаций; определение зарядовых состояний атомов в полупроводниковых соединениях и ионных кристаллах; исследование полуметаллов и фазовых переходов металл—полупроводник; определение подвижности позитронов в полупроводниках и ионных кристаллах; изучение природы и плотности дислокаций в полупроводниках;

исследование аморфных полупроводников и ионных систем с развитой поверхностью; выявление радиационных и других дефектов в полупроводниках и ионных кристаллах; исследование полупроводников и ионных кристаллов, облученных светом и рентгеновскими лучами; анализ поверхности и приповерхностных нарушенных слоев полупроводников и ионных кристаллов. Наиболее важными вопросами, которые можно изучить с помощью метода позитронной аннигиляции, являются механизмы и динамика возникновения, превращения и аннигиляции дефектов в полупроводниковых материалах на различных стадиях технологического процесса.

В экспериментах по аннигиляции используются радиоактивные β^+ -изотопы (^{22}Na , ^{64}Cu и ^{60}Co), испускающие позитроны в интервале энергий от нуля до 700 кэВ, поэтому средние пробеги позитронов в различных материалах, как правило, не превышают величину 150 мкм. Это означает, что подавляющая часть позитронов аннигилирует в приповерхностных слоях исследуемых материалов.

Основными видами позитронных состояний при этом являются: термализованные (тепловые) позитроны в объеме и позитроны, захваченные точечными и протяженными дефектами. Причем последние, по-видимому, являются преимущественно отрицательно заряженными (назовем их "позитрончувствительными дефектами").

Элементарное рассмотрение кинетики аннигиляции позволяет получить формулы для определения средних значений концентраций позитрончувствительных дефектов и их средних размеров по основным характеристикам аннигиляционных спектров:

$$I_N = k_d / (\lambda_1 + k_d); (1 - I_N) = \lambda_1 / (\lambda_1 + k_d); \lambda_1 = 1/\tau_1, \quad (1)$$

где I_N — интенсивность узкой компоненты в кривых углового распределения аннигиляционных фотонов; k_d — константа скорости захвата позитронов дефектами; τ_1 — время жизни позитронов в монокристалле, обратное вероятности аннигиляции λ_1 . Из выражений (1) получаем:

$$k_d = \frac{I_N}{1 - I_N} \lambda_1. \quad (2)$$

В рамках одиночного центра захвата позитронов величина k_d в свою очередь может быть записана в виде

$$k_d = \sigma_+ v \bar{N}_d \quad (3)$$

или

$$k_d = 4\pi D_+ \bar{R}_d \bar{N}_d, \quad (4)$$

где σ_+ — сечение захвата позитронов; v — скорость термализованных позитронов; \bar{N}_d — средняя концентрация дефектов в области кристалла, соответствующей пробегам позитронов; \bar{R}_d — средний размер дефектов; D_+ — коэффициент диффузии позитронов.

Таким образом, из выражений (2–4) можно определить величины k_d , \bar{N}_d и \bar{R}_d , если известны такие параметры, как λ_1 , D_+ , σ_+ и v .

Проведенные исследования аннигиляции позитронов [1–10] в монокристаллах полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, а также в эпитаксиальных структурах этих соединений и кремния показали довольно высокую чувствительность метода позитронной аннигиляции к электронной и дефектной структуре названных материалов, наличию дислокаций, состоянию приповерхностных слоев. Наблюдаемый эффект тяготения позитронов к глубоким акцепторным уровням атомов переходных элементов в фосфиде и арсениде галлия открывает возможность исследований методом позитронной аннигиляции природы, состава и зарядовых состояний этих центров.

Благодаря выделению узкой компоненты I_N из кривых углового распределения аннигиляционных фотонов по формулам (2) и (3) была оценена чувствительность метода позитронной аннигиляции в отношении концентрации позитрончувствительных дефектов ($N_d > 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Например, средняя концентрация позитрончувствительных дефектов в автоэпитаксиальных структурах кремния n - и p -типа оказалась приблизительно равной 10^{16} см^{-3} , а их средний размер порядка 1 нм [10].

Метод позитронной аннигиляции является перспективным методом неразрушающего контроля структуры материалов, используемых в электронной технике. Дальнейшее его совершенствование позволит установить возможные корреляции между основными характеристиками аннигиляционных спектров, электрофизическими параметрами и особенностями технологии получения монокристаллов и эпитаксиальных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аннигиляция позитронов в монокристаллах полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ / А.Д. Мокрушин, Ю.Н. Кузнецов, Т.И. Ольховникова и др. — ФТТ, 1977, т. 19, № 11, с. 3339–3344.
2. Исследование процесса аннигиляции позитронов в нарушенных поверхностных слоях GaAs / А.А. Воробьев, К.П. Арефьев, С.А. Воробьев и др. — ФТП, 1977, т. 11, № 4, с. 651–655.
3. Исследование аннигиляции позитронов в полупроводниковых соединениях GaAs и GaP / П.У. Арифов, Н.Ю. Арутюнов, А.З. Ильясов и др. — ФТП, 1978, т. 12, № 5, с. 891–894.

4. Аннигиляция позитронов в эпитаксиальных слоях GaAs/К.П.Арефьев, В.В.Батавин, С.А.Воробьев и др. — ФТП, 1978, т.12, № 4, с. 803–806.

5. Исследование методом аннигиляции позитронов свойств глубоких акцепторных уровней в арсениде и фосфиде галлия/П.У.Арифов, Н.Ю.Арутюнов, А.З.Ильясов и др. — Электронная техника. Сер.6. Материалы, 1978, вып. 7, с. 46–52.

6. Взаимодействие позитронов с дислокациями в полупроводниках GaAs n-типа/К.П.Арефьев, С.А.Воробьев, Ю.Н.Кузнецов и др. — ФТП, 1979, т. 21, № 1, с. 278–280.

7. Исследование методом аннигиляции позитронов полупроводниковых соединений/А.Е.Гарнак, А.Д.Мокрушин, В.И.Прилипка и др. — Электронная техника. Сер.6.Материалы, 1979, вып.5, с.62–66.

8. Аннигиляция позитронов в GaP, легированном атомами переходных элементов/С.А.Абагян, П.У.Арифов, Н.Ю.Арутюнов и др. — ФТП, 1979, т. 13, № 10, с. 1810–1814.

9. Мокрушин А.Д., Прокопьев Е.П. Аннигиляция позитронов в соединениях $A^{III}B^{VI}$ -ФТП, 1979, т. 21, № 8, с. 2452–2454.

10. Исследование аннигиляции позитронов в кремнии, содержащем дефекты структуры, возникающие в процессе эпитаксиального наращивания пленок/А.П.Дружков, Е.П.Прокопьев, Ю.Н. Кузнецов и др. — ФТП, 1980, т. 14, № 1, с. 200–202.

Статья поступила 11 марта 1980 г.

УДК 543.51:621.315.5.002

В. И. Белоусов, В. В. Муравьев, А. Ф. Новожилов

МАСС-СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Применение молекулярной масс-спектрометрии для изучения кинетики химических реакций позволяет прямым путем получать информацию о процессах, протекающих при высоких температурах.

Интенсивное развитие электронной промышленности связано с разработкой новых технологических процессов получения специальных материалов, совершенствованием и оптимизацией существующих технологических процессов, необходимостью максимального сокращения цикла "исследование–разработка–производство".

Новые разработки чаще всего базируются на результатах эмпирических исследований. Прежде всего это относится к технологическим процессам, протекающим в парогазовой фазе и при высоких температурах, о механизме которых можно судить только по косвенным данным, т.е. по характеристикам исходных продуктов и получаемого материала. Такой информации явно недостаточно для детального описания синтеза того или иного материала и, следовательно, для оптимизации технологии производства и повышения выхода годных.

Так, в промышленности широко используются

транспортные реакции для получения эпитаксиальных слоев различных полупроводниковых соединений

типа $A^{III}B^{V}$, элементарных полупроводников (кремния, германия) и других материалов. Однако химические основы процессов роста до конца еще не ясны. Чтобы доказать протекание тех или иных химических реакций, необходимо не только качественно, но и количественно установить молекулярный состав паровой фазы, определить зависимость состава пара от изменений температуры, скоростей газовых потоков, начальной концентрации реагирующих газов.

Имеющиеся сведения о процессах в паровой фазе получены из термодинамических расчетов, которые в связи с отсутствием достоверных данных о молекулярном составе парогазовой фазы и термохимических константах для расчета равновесий часто носят приближенный характер. Кроме того, остается спорным вопрос о достижении равновесия или квазиравновесия во всех зонах технологического реактора, являющегося динамической системой. Для всестороннего и глубокого понимания процессов, протекающих в реакторе, необходимо не только изучить реакции тепло- и массопереноса, поверхностные явления, но и знать состав парогазовой смеси и его зависимость от условий синтеза. Получить объективную информацию о процессах в реакторе с химическим осаждением можно путем масс-спектрометрического "зондирования".

Молекулярная масс-спектрометрия дает возможность прямым путем получить информацию о кинетике химических реакций, протекающих при относительно высоких температурах (400–1200°C). Целесообразность использования масс-спектральной аппаратуры обусловлена также ее высокой чувствительностью и информативностью, широким динамическим диапазоном, экспрессностью определения концентрации газовых компонентов, возможностью автоматизации измерений. Для контроля быстропротекающих процессов наиболее перспективно применение динамических приборов (временнорольных, квадрупольных и т.п.). Однако приборы этого класса имеют невысокую разрешающую способность, поэтому при исследовании систем сложного молекулярного состава предпочтение следует отдать статическим приборам. Это относится в основном к детальному изучению механизма технологических процессов при разработке оптимальной технологии и основных принципов автоматического управления ею в ходе производства. Из результатов масс-спектрального исследования полупроводниковой технологии наибольшую ценность представляют данные, характеризующие поведение исследуемой системы в рабочих условиях и полученные при минимальных возмущениях, вносимых в работу технологического реактора при отборе пробы. Это достигается с помощью капиллярного отбора про-

бы, причем капилляр изготовлен из того же материала, что и реактор. Известно применение такой системы отбора пробы при масс-спектрометрическом исследовании технологических процессов синтеза эпитаксиальных структур кремния [1] и соединений $A^{III}B^V$.

На рис. 1 дана схема горизонтального реактора для проведения исследований синтеза эпитаксиальных слоев кремния в лабораторных условиях. Использовался резистивный нагрев графитового пьедестала, имеющего однородную температурную зону длиной 10 см. Массоперенос в реакторе изучался путем измерения пространственного распределения парциальных давлений молекулярных составляющих газовой фазы с помощью времяпролетного масс-спектрометра. Калибровка масс-спектрометра выполнялась по аргону, который в количестве 1% добавлялся в газовый поток. На рис. 2 приведены профили концентраций газовых компонентов над подложкой при различных температурах пьедестала T . На рис. 3 показаны профили парциальных давлений SiCl_4 вдоль подложки. Кроме SiCl_4 , HCl и H_2 в газовой фазе обнаружены молекулы SiCl_3H , SiCl_2H_2 и SiCl_2 .

Из экспериментальных результатов сделан вывод, что над подложкой можно условно выделить две пространственные области. В области, близкой к пьедесталу (на расстоянии 1–1,5 см от него), температурные и концентрационные градиенты имеют слабую крутизну. В верхней области реактора (расстояние от пьедестала 1,5–3 см) температура и концентрация практически постоянны.

Осаждение кремния происходит в результате восстановления SiCl_4 водородом при дальнейшем взаимодействии получающегося хлористого водорода с осажденным кремнием (такой путь с точки зрения термодинамики более вероятен, чем восстановление SiCl_4 в другие хлорсиланы).

Масс-спектрометрические исследования процессов осаждения кремния при использовании в качестве его источников хлорсиланов SiCl_2H_2 , SiCl_3H [1, 2] позволили получить ряд важных характеристик газовой фазы в реакторе:

1. Измеренные значения парциальных давлений компонентов в газовой фазе указывают на заметные отклонения от термодинамического равновесия, особенно при низкой температуре.

2. Вычисленная и экспериментально найденная эффективность осаждения кремния уменьшается в ряду: $\eta_{\text{SiCl}_2\text{H}_2} > \eta_{\text{SiCl}_3\text{H}} > \eta_{\text{SiCl}_4}$, где

$$\eta = \frac{[\text{Si/Cl}]_{\text{исх}} - [\text{Si/Cl}]_{\text{равн}}}{[\text{Si/Cl}]_{\text{исх}}}; \quad [\text{Si/Cl}] - \text{от-}$$

ношение числа атомов кремния и хлора.

3. В газовой фазе системы Si-Cl-He обнаружены только молекулы SiCl_4 , SiCl_2 и He .

4. Осаждение кремния лимитируется массопе-

реносом, при этом наблюдается градиент парциального давления источника кремния в направлении газового потока, обусловленный истощением реагента.

Изучение массопереноса с помощью масс-спектрометрического "зонда", а также исследование тепловых и динамических процессов позволили понять химические и транспортные явления, наблюдаемые в кремниевых эпитаксиальных реакторах,

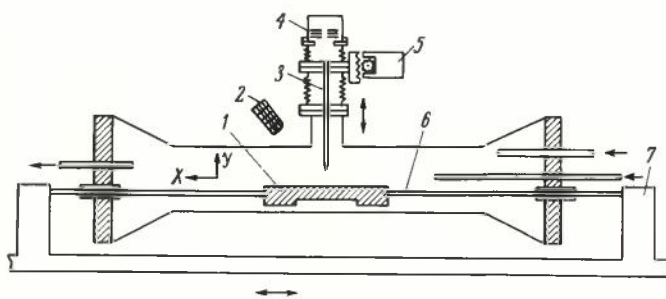


Рис. 1. Реактор горизонтального типа для синтеза эпитаксиальных слоев кремния: 1 - графитовый пьедестал; 2 - оптический пирометр; 3 - капиллярный ввод; 4 - времяпролетный масс-спектрометр; 5 - механизм передвижения; 6 - молибденовый электрод; 7 - подвижная платформа

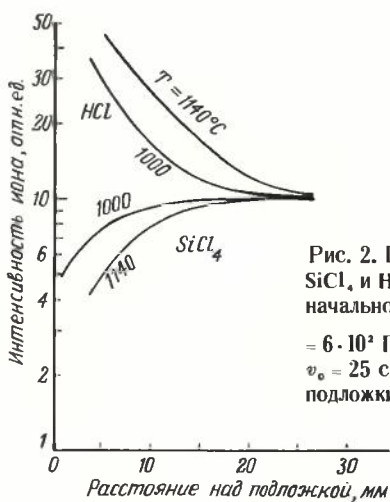


Рис. 2. Профили концентраций SiCl_4 и HCl над подложкой при начальном давлении $P_{\text{SiCl}_4}^0 = 6 \cdot 10^2$ Па и скорости напуска $v_0 = 25$ см/с (расстояние вдоль подложки 12,5 см)

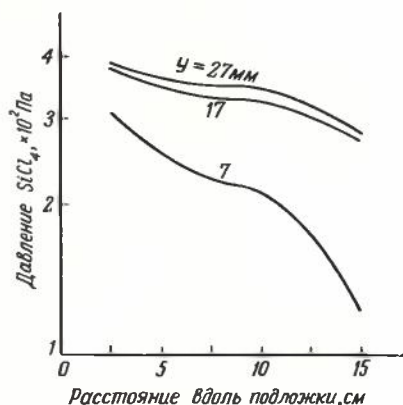


Рис. 3. Профили парциальных давлений SiCl_4 вдоль подложки при температуре пьедестала $T = 1200^\circ\text{C}$, начальном давлении $P_{\text{SiCl}_4}^0 = 6 \cdot 10^2$ Па и скорости напуска $v_0 = 25$ см/с (y - расстояние над подложкой)

разработать математическую модель явлений массопереноса. Полученные результаты дают представление о недостатках используемых эпитаксиальных реакторов, наиболее серьезными из которых являются следующие [3]:

– низкая химическая эффективность (только 30–40% входящего в реактор газа оказывается использованным);

– неэффективное использование энергии, связанное с большими потерями тепла на излучение с открытой поверхности подложкодержателя;

– неравноценность положения пластин по отношению к газовому потоку, затрудняющая получение однородных по толщине пластин из-за истощения реагента по мере приближения его к выходу из реактора;

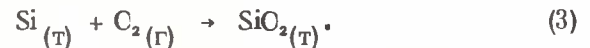
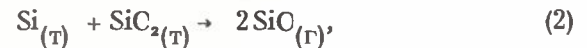
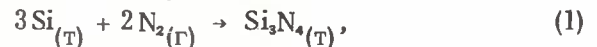
– экономическая нецелесообразность увеличения реактора (оно ведет к снижению степени превращения и уменьшению эффективности использования реагентов и энергии в реакторе).

Детальное изучение характеристик химических процессов, теплопереноса и динамики в эпитаксиальных кремниевых реакторах, обусловило создание эпитаксиального реактора нового типа с более низкими энергетическими затратами, обеспечивающего большую загрузку пластин (в 2,5–3 раза) без ухудшения эффективности и качества получаемых изделий [3].

В полупроводниковой технологии в качестве маскирующего покрытия широко используется нитрид кремния. Однако механизм его образования как при прямом азотировании кремния, так и при взаимодействии аммиака с галогенидами кремния остается не совсем ясным. Работы [4, 5] посвящены исследованию процесса образования нитрида кремния с помощью молекулярной масс-спектро-

метрии. Характерной особенностью аппаратуры, используемой при отборе пробы из зоны реакций (рис. 4), является трехкамерная конструкция [4, 5].

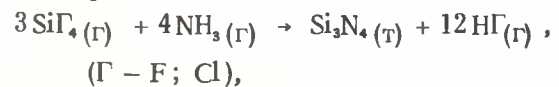
При прямом азотировании кремния одновременно происходят три реакции:



Протекание реакций (2) и (3) зависит от парциального давления кислорода в системе. При недостатке кислорода образуется летучее соединение SiO, и процесс азотирования ускоряется, а при избытке кислорода происходит пассивация поверхности кремния за счет образования малолетучей двуокиси SiO₂ и, как следствие, замедление азотирования. Масс-спектрометрическая регистрация иона SiO⁺ указывает на присутствие в газовой фазе молекулы SiO и ее влияние на кинетику процесса азотирования.

Осаждение Si₃N₄ при взаимодействии аммиака с галогенидами кремния (SiF₄ и SiCl₄) изучалось в работах [4, 5]. В газовой фазе обнаружены сложные молекулы типа Si(NH₂)₂Cl_m, Si₂(NH₂)₂Cl_m, Si₂F₅NH, (Si(NH)₂)_nSi₂F_l, где m = 1, ..., 5; n = 1, ..., 6; l = 6, 7, 8.

Осаждение нитрида кремния происходит в результате реакции



которая имеет промежуточные стадии с образованием указанных сложных молекул. Таким образом, масс-спектрометрическим методом доказано, что при высоких температурах зародышеобразование и конденсация могут протекать уже в газовой фазе. Характеристики осажденных пленок можно контролировать путем измерения температуры подложки и степени зародышеобразования в парогазовой фазе, хотя реакции на поверхности могут изменить их свойства. Применение квадрупольного масс-спектрометра [4, 5], имеющего недостаточное разрешение, не позволило полностью изучить состав газовой фазы для детального описания механизма осаждения нитрида кремния.

В работе [6] приведено описание высокотемпературной реакции между хлористым водородом, окисью кремния и кристаллическим кремнием, которая широко используется в производстве полупроводниковых приборов. Доказано присутствие в газовой фазе молекул SiCl₂, SiCl₃ и SiCl₄. Очистка поверхности кремния от окисла при травлении хлористым водородом происходит главным образом при испарении окисла SiO и дальнейшем взаимодействии кремния с HCl с образованием паров хлоридов, из которых SiCl₂ и SiCl₃ при T = 1250°C и выше являются доминирующими.

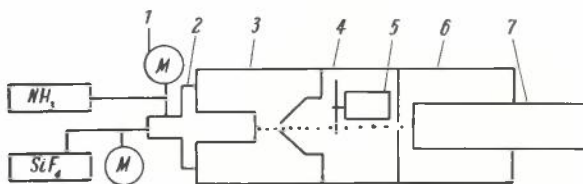


Рис. 4. Схема установки для масс-спектрометрического исследования образования нитрида кремния: 1 – манометр; 2 – эпитаксиальный реактор; 3, 4, 6 – шлюзовые камеры; 5 – модулятор ионного пучка; 7 – квадрупольный масс-спектрометр

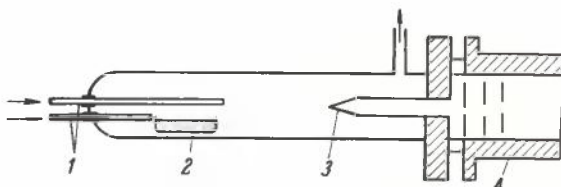
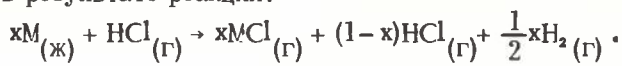


Рис. 5. Схема установки для масс-спектрометрического исследования процесса осаждения из газовой фазы соединений A^{III}B^V: 1 – трубки для подачи исходных реагентов; 2 – лодочка с жидким металлом (Ga, In, Al); 3 – капиллярный ввод; 4 – времяпролетный масс-спектрометр

Исследована также технология осаждения из газовой фазы ряда полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$: GaN, GaAs_mP_{1-m}, In_{1-m}Ga_mP, ScN [7].

В аппаратуре для этого эксперимента (рис.5) использован кварцевый реактор. Пробоотбор осуществлялся через узкий кварцевый капилляр. Молекулярный пучок реагирующих газов, соответствующий заданной температурной зоне реактора, коллимировался кварцевым капилляром и направлялся в ионный источник времяпролетного масс-спектрометра типа Бендикс МА-1. Конструкция позволяла моделировать в области пробоотбора условия любой температурной зоны реактора.

Исследование взаимодействия хлористого водорода с элементами III группы (In, Ga) в условиях эпитаксиального синтеза структур показало, что в газовой фазе образуются в основном монохлориды в результате реакции:



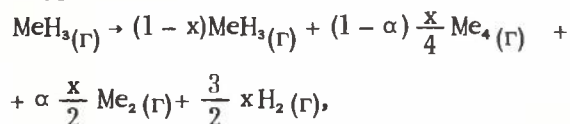
Мольная доля (x) хлористого водорода, участвующего в реакции в интервале температур 500–900°C, находится в пределах 0,2–0,85. Замена газа-носителя водорода на гелий не изменяет существенным образом характеристики реакции [4].

При получении твердых растворов типа In_{1-m}Ga_mMe (Me обозначает As или P) в качестве источников металла используются чистые элементы In и Ga. Применение хлоридов для переноса элементов III группы оказалось неприемлемо из-за изменения со временем отношения InCl/GaCl.

Для переноса в реактор элементов V группы использовались гидриды (NH₃, PH₃ и AsH₃). Степень разложения гидридов в реакторе определялась масс-спектрометрическим методом (сравнением сигнала при температуре реактора с сигналом при комнатной температуре).

Стенки реактора оказывают каталитическое действие на разложение аммиака, в результате чего GaCl не реагирует с азотом и GaN не осаждается. Поэтому необходимо применять вкладыши (в целях экономии лучше графитовые, чем вольфрамовые или платиновые).

Термическое разложение AsH₃ и PH₃ описывается уравнением:



где x – мольная доля неразложившегося аммиака; α – степень диссоциации молекул Me₄.

Величины x и α являются функциями температуры и зависят от скорости потока и парциального давления MeH₃. При получении соединений типа MAs_mP_{1-m} в газовой фазе обнаружены не только молекулы As₄, As₂, P₄ и P₂, но и смешанные ассоциаты A_smP_n (m + n = 4).

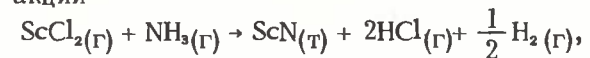
Идентификация молекул в газовой фазе с помощью масс-спектрометрии и исследование продуктов осаждения химическим способом и рентгеновским анализом позволили определить химические реакции, ответственные за осаждение полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$.

Образование нитрида галлия является результатом следующих реакций:



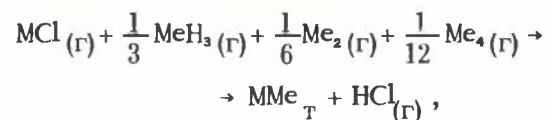
И хотя в масс-спектре не зарегистрированы ионы GaCl₂⁺ или GaCl₃⁺, указывающие на существование молекулы GaCl₃ в газовой фазе, наличие в масс-спектре ионов [GaCl₂NH₃]⁺ показывает, что GaCl₃ может быть промежуточным продуктом при осаждении нитрида галлия.

Нитрид скандия образуется в результате реакции



где наблюдаются значительные отклонения от равновесия.

Характерной особенностью осаждения полупроводниковых соединений GaAs, GaP, GaAs_mP_{1-m}, InP, InAs_mP_{1-m} является то, что в газовой фазе отсутствует молекула MCl₃, а процесс осаждения управляется следующей реакцией:



где M – Ga, In; Me – P, As.

Молекулы типа As_mP_n также легко реагируют с монохлоридом металла при осаждении сплавов MAs_mP_{1-m} и существенно влияют на состав получаемых сплавов при изменении температуры осаждения, так как их количество соизмеримо с количеством других молекул (см. таблицу). Например, при T = 680°C около 75% относительного количества фосфора находится в виде PH₃, P₂ и P₄, которые при этой температуре менее реакционноспособны, чем молекулы AsH₃, As₂ и As₄, содержащие

Относительное атомное содержание гетероядерных молекул в парогазовой фазе Ga–P–As, %

Молекула	T = 680°C	T = 780°C	T = 880°C
PH ₃	100	100	100
P ₂	22	62	80
P ₄	4	7	6
P ₂ As	5	8	7
PAs	19	42	58
P ₂ As ₂	5	8	8
PAs ₂	6	8	7
As ₄	10	12	13
As ₂	30	40	58
AsH ₃	25	35	30

70% общего атомного количества мышьяка. Поэтому сплавы содержат больше мышьяка, чем фосфора. При $T = 880^\circ\text{C}$ 70% атомного количества фосфора находится в виде молекул P_2 , являющихся более реакционноспособными, чем молекулы As_m , составляющие 68% атомного количества мышьяка. Поэтому осаждаются сплавы, обогащенные фосфором, хотя во всех случаях использовалась смесь $\text{PH}_3 : \text{AsH}_3 = 1 : 1$.

Таким образом, масс-спектрометрические исследования позволили определить природу химических реакций в процессе осаждения, установить степень отклонения от термодинамического равновесия в ряде систем, а также дали возможность сделать некоторые общие выводы, характеризующие процессы эпитаксиального наращивания соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

Однако для оптимизации эпитаксиальной технологии не менее важно знать решение частных задач, обусловленных использованием конкретного оборудования, материалов, процессов и т.п. В этой связи представляют интерес масс-спектрометрические исследования состава газовой фазы при эпитаксии арсенида галлия в системе $\text{Ga-AsCl}_3\text{-H}_2$ [8,9], описанные ниже.

Молекулярный состав парогазовой фазы определялся с помощью квадрупольного масс-спектрометра КМ-4, соединенного капиллярным пробоотборником с макетом реактора эпитаксиального наращивания. Поскольку при получении эпитаксиальных слоев арсенида галлия работа источника галлия является одним из наиболее сложных и малоизученных аспектов хлоридного процесса, был проведен масс-спектрометрический анализ состава газовой фазы, формирующейся в источнике галлия на всех этапах его работы — насыщения, переходных процессов и стационарного состояния в различных температурных условиях [8, 9].

Установлено, что в начальный период работы источника наблюдается нестабильность состава газовой фазы и атомного отношения Ga/As .

В процессе насыщения источника образование корочки GaAs на поверхности галлия сопровождается резким увеличением концентрации мышьяка и

HCl в источнике. Стационарный режим устанавливается спустя 2 ч после начала процесса. Период нестационарности уменьшается по мере работы источника и при уменьшении неоднородности температуры в его зоне. В установившемся режиме состав газовой фазы довольно близок к равновесному, однако увеличение скорости потока газовой смеси над поверхностью источника приводит к отклонению от равновесного состава.

Такое поведение источника сказывается на кинетике роста эпитаксиальных слоев и на их электрофизических параметрах. Масс-спектрометрическое зондирование зоны реактора позволяет внести соответствующие коррективы в процесс эпитаксии арсенида галлия.

С помощью масс-спектрометра можно исследовать не только процессы, приводящие к синтезу макро-объектов (эпитаксиальной структуры, полупроводникового соединения и т.п.), но и поведение примесей в процессе получения полупроводникового материала, их переноса в растущий слой и т.п. Для решения этих задач разработан комплекс аппаратуры [10–11], включающий магнитный масс-спектрометр МИ-1201, эпитаксиальный реактор для синтеза структур соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ с пультом управления, систему дополнительной откачки и устройство газообеспечения. Применение шлейфового осциллографа Н-115 позволило в несколько раз сократить время регистрации масс-спектра в диапазоне 2–300 а.е.м. Использование для регистрации ионов счетчика СИ-03, в котором диодный умножитель заменен на каналный типа ВЗУ-6, существенно улучшило чувствительность масс-спектрометра. На рис. 6 приведена схема масс-спектрометрического устройства с эпитаксиальным реактором, в котором зона пробоотбора максимально приближена к области ионизации и предусмотрено перекрытие молекулярного пучка, поступающего из реактора, а также введено охлаждение жидким азотом области оптической системы ионного источника масс-спектрометра. Разработанный комплекс аппаратуры позволяет производить измерение молярной концентрации компонентов с чувствительностью до $10^{-6}\%$, причем одновременно сохраняется высокое разрешение масс-спектрометра МИ-1201.

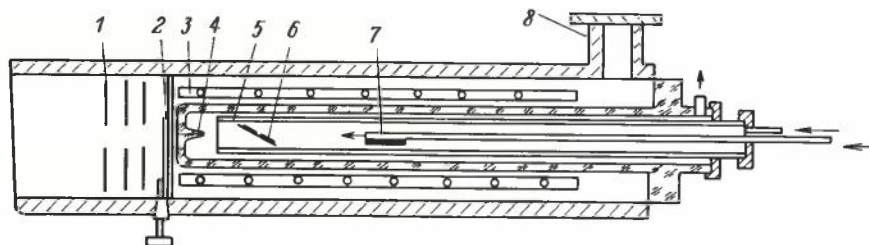


Рис. 6. Схема эпитаксиального реактора с масс-спектрометром МИ-1201: 1 — ионно-оптическая система масс-спектрометра; 2 — заслонка; 3 — печь нагрева; 4 — реактор с капиллярным вводом; 5 — подложкодержатель; 6 — пьедестал с подложками; 7 — источник с жидким металлом; 8 — дополнительная откачка

Молекулярная масс-спектрометрия дает возможность получать информацию при решении более широкого круга технологических проблем, чем рассмотренный в статье. Известны работы по исследованию состава паров при химическом осаждении окиси алюминия [12] и аморфного кремния [13], высокочастотном напылении [14], а также при изучении начальной стадии окисления кремния [15], процессов роста монокристаллов соединений CdS и ZnS [16], химических транспортных реакций в закрытой системе [17], образования фосфоросиликатного стекла из органических соединений [18], процессов молекулярно-лучевой эпитаксии [19] и т.п.

Масс-спектрометрический контроль молекулярных характеристик технологических процессов особенно важен на стадии их отработки и оптимизации, так как позволяет не только судить об эффективности технологии, но и открывает пути ее стабилизации и дальнейшего совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van V.S., Gilbert S.L. Chemical processes in vapour deposition of silicon. I. Deposition from dichlorosilane and etching by hydrochloric acid. — J. Electrochem. Soc., 1975, vol. 122, N 10, p. 1382–1388.
2. Van V.S. Chemical processes in vapour deposition of silicon. II. Deposition from trichlorosilane and tetrachlorosilane. — Там же, p. 1389–1391.
3. Van V.S. Novel reactor for high volume low-cost silicon epitaxy. — J. Crystal Growth, 1978, vol. 45, p. 97–105.
4. Lin S.S. Mass spectrometric detection of intermediates in chemical vapour deposition of Si_3N_4 . — J. Electrochem. Soc., 1977, vol. 124, N 12, p. 1945–1949.
5. Lin S.S. Mass spectrometric detection of intermediates in chemical vapour deposition of Si_3N_4 from SiCl_4 and NH_3 . — J. Electrochem. Soc., 1978, vol. 125, N 11, p. 1877–1980.
6. Lin S.S. Mass spectrometric studies of high temperature reaction between hydrogen chloride and silica/silicon. — J. Electrochem. Soc., 1976, vol. 123, N 4, p. 512–517.
7. Van V.S. Mass spectrometric and thermodynamic studies of the chemical vapour deposition of some III–V compounds. — J. Crystal Growth, 1972, vol. 17, p. 19–30.
8. Изучение динамики работы источника галлия при эпитаксиальном осаждении слоев арсенида галлия хлоридным методом / А.В. Родионов, Ю.Н. Свешников, И.В. Петренко и др. — В кн.: Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники. М.: МНЭТ, 1976, вып. 28, с. 28–39.
9. Масс-спектрометрическое изучение состава газовой фазы при эпитаксии арсенида галлия в системе Ga–AsCl₃–H₂ / А.В. Родионов, Ю.Н. Свешников, В.И. Белоусов, А.К. Афанасьев. — В кн.: Процессы роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, Наука, 1977, с. 214–218.
10. Белоусов В.И., Новожилов А.Ф. Модернизация масс-спектрометра МИ-1201 для исследования процессов высокотемпературного синтеза. Информационный листок № 78-0855: ВИМИ, 1978.
11. Белоусов В.И., Новожилов А.Ф., Желанный Ю.М. Некоторые данные по эксплуатации масс-спектрометра МИ-1201. — В кн.: Сборник тезисов Всесоюзного симпозиума "Опыт разработки, внедрения и перспективы развития изотопных и химических промышленных масс-спектрометров". Сумы, 1977, с. 6.
12. Lin S.S. Mass spectrometric analysis of vapour in chemical vapour deposition of alumina. — J. Electrochem. Soc., 1975, vol. 122, N 10, p. 1405–1408.
13. Mell H., Brodsky H.H. Mass spectrometric analysis during the vapour deposition of amorphous silicon. — Thin Solid Films, 1977, vol. 46, p. 299–302.
14. Синокки Ф. Масс-спектрометрическое исследование процесса высокочастотного реактивного напыления. — РЖ Электроника, 1978, 6Б158, с. 630–636.
15. Французов А.А., Макрушин Н.И. Масс-спектрометрическое исследование начальной стадии окисления кремния. — ЖТФ, 1975, т. 45, № 3, с. 600–603.
16. Van V.S., White E.A.D. Mass spectrometric study of processes in the closed tube vapour-growth of cadmium sulfide and zinc sulfide. — J. Crystal Growth, 1976, vol. 33, p. 365–368.
17. Kyoto M., Bando Y., Takedo T. Mass spectrometric study on chemical transport reaction. — Chemistry Letters, 1977, N 6, p. 595–597.
18. Yoshimi T., Sakai H., Sugawara K. Determination of reactant gas concentration by quadrupole mass analyser during PSG film formation using organic compounds. — J. Electrochem. Soc., 1976, vol. 123, N 9, p. 1410–1414.
19. Calawa A.R. Effect of H₂ on residual impurities in GaAs MBE layers. — Appl. Phys. Letters, 1978, vol. 33, N 12, p. 1020–1024.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

УДК 543.42.062:621.373.826.004

В. И. Белоусов, В. М. Гладской

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Лазерно-плазменная масс-спектрометрия на основе приборов с двойной фокусировкой обеспечивает анализ любых твердых веществ с пределом обнаружения атомного содержания $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ %, а при использовании электрического способа регистрации ионных токов — $1 \cdot 10^{-9}$ %.

Для анализа материалов микроэлектроники, в частности при контроле качества особо чистых веществ, тонких слоев, эпитаксиальных структур, широко применяется лазерно-плазменная масс-спектрометрия. В последние годы стал возможным выбор таких условий взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, при которых отбор и ионизация пробы адекватно отображают исходный состав анализируемого материала. Известно применение лазеров для испарения микропробы вещества с последующей ионизацией его собственным ионным источником масс-спектрометра. Обычно для регистрации ионных токов используются динамические масс-спектрометры, позволяющие регистрировать на экране осциллографа изображение всех компонентов анализируемого материала, проба которого получена при воздействии одного импульса лазера, работающего в режиме свободной генерации.

Несмотря на такие преимущества лазерного испарения, как локальность, возможность отбора любых материалов, высокая чистота, этот метод имеет ограничения в точности ($\pm 50\%$) и чувствительности по массе ($1 \cdot 10^{-4}$ %). Кроме того, при испарении возможна дискриминация определяемых примесей.

Использование лазера в режиме модулированной добротности (режим гигантских импульсов)

позволяет совместить операции отбора и ионизации вещества.

Взаимодействие гигантских импульсов лазерного излучения с веществом исключает селективность испарения, обуславливает практически 100%-ную ионизацию при энергетическом разбросе ионов, достигающем 3 кэВ [1]. В связи с этим возможны два способа регистрации ионов образующейся плазмы: динамическая масс-спектрометрия с дополнительным энергетическим селектором и статическая масс-спектрометрия высокого разрешения (~10000), для которой обычно используются статические масс-спектрометры с двойной фокусировкой, имеющие геометрию Маттауха-Герцога.

Известно, что на времяпролетном масс-спектрометре с дополнительным энергетическим селектором можно реализовать предел обнаружения массового содержания отдельных элементов до $1 \cdot 10^{-4}$ %, разрешение > 100 , правильность определения примесей не хуже 20% и стехиометрического состава ~ (3–8)%. Однако лучшие качества лазерно-плазменных ионных источников (расширение номенклатуры анализируемых веществ практически на все твердые тела, высокое разрешение, равное ~5000, низкий предел обнаружения массового содержания $3 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ %) могут проявиться только при использовании масс-спектрометра с двойной фокусировкой. Как известно, для обеспечения низких пределов обнаружения при анализе твердых тел на масс-спектрометре с двойной фокусировкой используется интегральный способ регистрации ионов с помощью фотопластинки. При этом ионный источник должен иметь достаточно высокую производительность, чтобы за требуемое время обеспечить набор максимальной экспозиции.

Увеличить производительность лазерного ионного источника можно путем увеличения частоты отбора проб (частоты лазерных импульсов) или доли использования образующихся ионов.

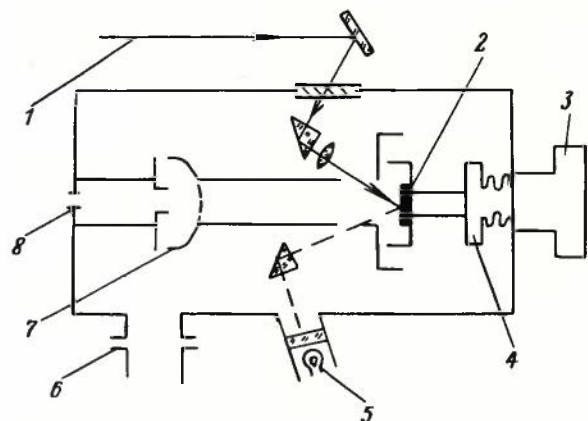


Рис. 1. Схема лазерно-плазменного ионного источника: 1 — лазерное излучение; 2 — образец; 3 — юстировочный винт; 4 — сканирующее устройство с предметным столиком; 5 — освещение образца; 6 — откачка; 7 — экран с фокусирующим электродом; 8 — входная щель масс-спектрометра

Высокопроизводительный лазерно-плазменный ионный источник к масс-спектрометру IMS-01 [1, 2] был модернизирован (рис. 1). В отличие от первоначального варианта [1] в нем отбор проб производится по нормали к анализируемой поверхности, а излучение вводится под углом 30° к оптической оси масс-спектрометра. Введена дополнительная экранировка лазерной плазмы. Для удобства работы изменены системы сканирования и загрузки.

Образующаяся на мишени плазма расширяется внутри эквипотенциального пространства пролетного пути длиной 15 см и попадает в систему формирования ионного пучка — двупотенциальную линзу с геометрией Пирса. Эффективность источника ионов можно охарактеризовать отношением числа ионов, зарегистрированных детектором масс-спектрометра, к числу испаренных атомов. Использование фокусировки позволило увеличить это отношение с 10^{-13} до 10^{-6} – 10^{-7} [1]. За один импульс лазерного излучения испаряется ~ 10^{-9} г кремния и кулонметр масс-спектрометра регистрирует заряд ~ $5 \cdot 10^{-4}$ нКл. Заряд 300 нКл, при котором реализуется предел обнаружения атомного содержания $3 \cdot 10^{-7}$ %, регистрируется за время ~2 ч при работе лазера типа ЛТИ-5 с частотой 100 Гц. При анализе стандартных образцов [2] было установлено, что относительный выход положительных ионов лазерной плазмы пропорционален \sqrt{m} . Результаты анализов можно описать уравнением:

$$\lg \frac{I_i}{I_0} = \lg a_i + \lg \frac{C_i}{C_0},$$

где I_i и I_0 — интенсивности ионного тока i -той примеси и основы соответственно; $a_i = \sqrt{\frac{m_i}{m_0}}$ (m_i и m_0 — массы иона примеси и основы); C_i и C_0 — атомные концентрации i -той примеси и основы (в процентах).

Коэффициент относительной чувствительности (отношение измеренной концентрации к истинной) в широком диапазоне массовых концентраций (10^1 – 10^{-6} %) не зависит от величины концентрации.

Этот коэффициент, равный $a_i \cdot \sqrt{\frac{m_0}{m_i}}$, при определении атомных концентраций примесей на уровне $1 \cdot 10^{-6}$ % имеет максимальное относительное отклонение от единицы не более 30%.

При электрической регистрации ионов [2] стехиометрические отношения веществ сложного состава определяются с погрешностью не более 1%.

Важной характеристикой лазерно-плазменного ионного источника является относительная простота масс-спектра, так как его основную часть составляют однозарядные ионы изотопных разновидностей элементов периодической системы, а многозарядные и полиатомные ионы представлены в значительно меньшей степени [3]. Представле-

ние об относительном выходе многозарядных ионов арсенида галлия при высокой плотности мощности излучения можно получить из табл. 1.

Таблица 1
Относительный выход ионов GaAs

Ион	Зарядность				
	1	2	3	4	5
As	100	3,8	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Ga	100	5,7	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$

Интенсивность многоатомных ионов за исключением углеводородных по атомному содержанию не превышает $2 \cdot 10^{-6}\%$. Уровень углеводородного фона однозначно определяется глубиной откачки и может быть уменьшен энергетическим фильтром, так как является низкоэнергетической частью масс-спектра. Высокая разрешающая способность масс-спектрометра, равная ~ 6500 на уровне 50% (рис. 2), при нормальных условиях работы позволяет без затруднений проводить идентификацию аналитических линий при анализе материалов (в том числе сложных многоэлементных соединений). Например, в работе [4] выполнен элементный анализ международного геологического стандарта (базальта ZGI-BM) и метеорита Алленде, в которых основа содержит ~ 10 элементов и, кроме того, зарегистрировано 54 примесных элемента с атомным содержанием на уровне $10^{-2}-10^{-5}\%$.

Для решения задач материаловедения в микроэлектронике особенно важным является масс-спектральный контроль элементного состава особо чистых веществ, который позволяет одновременно определять все элементы периодической системы (кроме водорода и гелия) с пределом обнаружения не хуже $10^{-6}-10^{-7}\%$ и правильностью 30% без использования эталонных образцов. Лазерно-плазменная масс-спектрометрия дает возможность надежно и быстро контролировать наряду с другими примесями редкоземельные элементы с пределом обнаружения атомного содержания $1 \cdot 10^{-5}\%$ и ниже (табл. 2). Так масс-спектральный контроль чистоты окиси свинца может заменить по крайней мере три различных метода: химический, фотометрию пламени и эмиссионную спектроскопию, необходимые для определения концентрации галогенов, щелочных и других металлов соответственно. Причем эти методы не всегда обеспечивают

Таблица 2
Массовое содержание примесей в образцах, %

Определяемый элемент	Анализируемый образец		
	Окись гадолиния	Окись свинца	Пленки граната
Бор	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Натрий	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-4}$
Магний	$2 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Алюминий	$5 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Кремний	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Фосфор	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-3}$
Сера	$1 \cdot 10^{-3}$	—	$< 3 \cdot 10^{-3}$
Хлор	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Калий	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$
Кальций	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Титан	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Хром	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$< 4 \cdot 10^{-3}$
Марганец	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$< 3 \cdot 10^{-3}$
Железо	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Никель	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Медь	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$< 5 \cdot 10^{-3}$
Цинк	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Галлий	$3 \cdot 10^{-4}$	—	Основа
Мышьяк	$3 \cdot 10^{-5}$	—	$< 3 \cdot 10^{-5}$
Селен	$2 \cdot 10^{-4}$	—	$< 1 \cdot 10^{-4}$
Бром	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 6 \cdot 10^{-6}$	$< 6 \cdot 10^{-6}$
Стронций	$3 \cdot 10^{-5}$	—	$< 4 \cdot 10^{-6}$
Иттрий	$1 \cdot 10^{-1}$	—	$1 \cdot 10^{-2}$
Цирконий	$1 \cdot 10^{-5}$	—	$6 \cdot 10^{-6}$
Кадмий	$3 \cdot 10^{-5}$	—	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Индий	$1 \cdot 10^{-5}$	—	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Олово	$3 \cdot 10^{-4}$	—	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Сурьма	$4 \cdot 10^{-4}$	—	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Иод	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Барий	$1 \cdot 10^{-4}$	—	$< 4 \cdot 10^{-6}$
Лантан	$3 \cdot 10^{-2}$	—	$3 \cdot 10^{-4}$
Церий	$2 \cdot 10^{-1}$	—	$9 \cdot 10^{-4}$
Прозеодим	$1 \cdot 10^{-2}$	—	$2 \cdot 10^{-4}$
Неодим	$2 \cdot 10^{-2}$	—	$6 \cdot 10^{-4}$
Самарий	1,6	—	$1 \cdot 10^{-2}$
Европий	$3 \cdot 10^{-1}$	—	$3 \cdot 10^{-3}$
Гадолиний	Основа	—	Основа
Тербий	$6 \cdot 10^{-1}$	—	$2 \cdot 10^{-3}$
Лиспрозий	$1 \cdot 10^{-1}$	—	$4 \cdot 10^{-3}$
Гольмий	$1 \cdot 10^{-2}$	—	$7 \cdot 10^{-4}$
Эрбий	$7 \cdot 10^{-2}$	—	$2 \cdot 10^{-3}$
Тулий	$3 \cdot 10^{-2}$	—	$3 \cdot 10^{-4}$
Иттербий	$7 \cdot 10^{-1}$	—	$5 \cdot 10^{-2}$
Лютеций	$4 \cdot 10^{-2}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$
Платина	$7 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$
Свинец	$4 \cdot 10^{-3}$	Основа	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Таллий	$2 \cdot 10^{-5}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$

* Приведены значения для элементов, контролируемых в соответствии с ТУ на окись свинца.

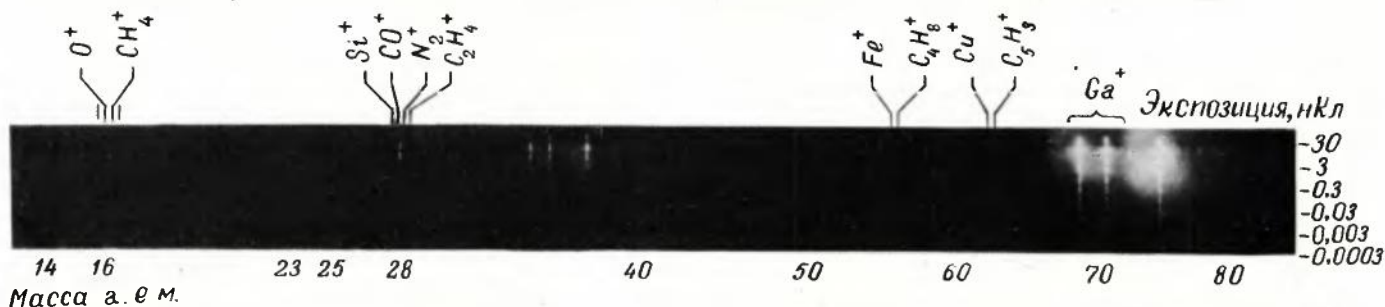


Рис. 2. Масс-спектрограмма арсенида галлия

требуемый предел обнаружения примеси без предварительного обогащения материала.

Применение лазерно-плазменной масс-спектрографии не имеет каких-либо принципиальных ограничений. Она может быть использована для контроля элементного состава широкого круга материалов: монокристаллов кремния, германия, арсенида и фосфида галлия и индия, антимонида индия, теллуридов кадмия и цинка, твердых растворов галлий-индий-фосфор-мышьяк и кадмий-ртуть-теллур, окислов гадолиния, свинца и алюминия, германата висмута, кварца, свинцовосиликатных и халькогенидных стекол, пленок и эпитаксиальных структур на основе этих материалов, органических полимеров, сплавов меди, железа, алюминия и магния, геологических объектов и многих других. Парциальное давление образцов при проведении анализа не должно превышать $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ Па, поэтому может появиться необходимость глубокого охлаждения материалов.

Если о макросоставе анализируемого объекта нет никаких сведений, то предварительно методом лазерно-плазменной масс-спектрометрии определяют концентрацию макрокомпонентов, что позволяет осуществлять безэталонное определение концентрации примесей.

Возможности лазерно-плазменной масс-спектрометрии еще более расширяются, если вместо фоторегистрации использовать электрический способ измерения ионного тока. Было установлено, что применение канальных умножителей типа ВЭУ-6 в масс-спектрометрах с двойной фокусировкой позволяет за одну вспышку лазера реализовать предел обнаружения атомного содержания не выше $1 \cdot 10^{-9}\%$, а при наборе экспозиции 300 нКл — $1 \cdot 10^{-9}\%$. Существенно улучшаются и другие технические характеристики метода. Так, например, экспрессность анализа может быть увеличена в 100 и более раз при автоматизации и использовании ЭВМ. Для дальнейшего развития лазерно-плазменной масс-спектрометрии, по-видимому, наиболее перспективна адекватная замена фотопластинки на квазинепрерывный электрический детектор ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. О разрешающей способности и правильности масс-спектрального анализа твердого тела с применением лазерно-плазменного источника ионов/ Ю.А. Быковский, Т.А. Басова, В.И. Белоусов и др. — Журнал аналитической химии, 1976, т. 31, № 11, с. 2092–2096.
2. Лазерный масс-спектрометрический метод безэталонного определения элементного состава твердых веществ/ Ю.А. Быковский, Г.И. Журавлев, В.И. Белоусов и др. — Заводская лаборатория, 1978, т. 41, № 6, с. 701–705.
3. Относительный выход ионов химических элементов из лазерной плазмы/ Ю.А. Быковский, Г.И. Журавлев, В.И. Белоусов и др. — Физика плазмы, 1978, т. 4, № 2, с. 323–331.
4. Элементный анализ геологических и космических объектов методом лазерной масс-спектрометрии/ Ю.А. Быковский, Г.И. Журавлев, В.М. Гладской и др. — ЖТФ, 1978, т. 4, № 2, с. 382–385.

Статья поступила 3 апреля 1980 г.

УДК 535.243:621.793

Э.С. Бескова, Т.А. Кульбеда, Л.Б. Токарева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПРИМЕСЕЙ НЕМЕТАЛЛОВ В ОСОБО ЧИСТЫХ СОЕДИНЕНИЯХ БОРА, ФОСФОРА И МЫШЬЯКА

Спектрофотометрические и люминесцентные методы определения содержания микропримесей неметаллов в материалах эпитаксиальной технологии являются универсальными, экспрессными, надежными и имеют хорошие аналитические характеристики.

Особо чистые соединения бора, фосфора и мышьяка находят широкое применение в качестве источников основных компонентов или легирующих добавок при выращивании эпитаксиальных структур АШВ из газовой фазы в производстве электролюминесцентных диодов, лазеров, СВЧ приборов, световых индикаторов, полевых транзисторов и других полупроводниковых приборов.

К чистоте соединений бора, фосфора и мышьяка, используемых для получения и легирования полупроводниковых материалов, предъявляют жесткие требования, так как экспериментально установлено, что примеси, присутствующие в этих соединениях, внедряясь в кристаллическую решетку получаемого соединения образуют донорные или акцепторные уровни, ловушки, центры рассеяния, глубокие уровни и другие дефекты, в значительной мере изменяющие электрофизические параметры получаемых структур.

К примесям, ведущим себя подобным образом, относятся элементы III, IV, V и VI групп периодической системы (бор, кремний, фосфор, мышьяк, селен, теллур и другие).

Особенно нежелательными являются неконтролируемые примеси, вносимые в технологический процесс и чаще всего отрицательно влияющие на свойства полупроводниковых соединений и, следовательно, на работу изготавливаемых приборов. К ним относится прежде всего кремний — доминирующая примесь в исходных материалах и большинстве получаемых из них полупроводниковых соединений. Вследствие своей амфотерности он часто является источником замещения атомов основных элементов в узлах решетки. Кремний создает донорные или акцепторные уровни, а также образует молекулярные комплексы с другими примесями, что значительно ухудшает электрофизические параметры полупроводниковых соединений.

На примере получения арсенида галлия видно, как влияет примесный состав на электрофизические свойства получаемых соединений. Арсенид

галлия имеет широкую запрещенную зону, собственная концентрация электронов в нем при 300 К составляет 10^7 см^{-3} , а удельное сопротивление $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Поэтому электрофизические параметры арсенида галлия при 300 К и ниже определяются концентрацией примесей и дефектов в кристалле. Кристаллическая решетка арсенида галлия состоит из двух подрешеток, образованных элементами III и V групп, следовательно, находящиеся в кристалле примеси могут замещать атомы как в подрешетке галлия, так и в подрешетке мышьяка, выполняя соответственно роль акцепторов или доноров. При этом возникают мелкие донорные и акцепторные уровни. Примеси элементов IV и VI групп ассоциируют с имеющимися в кристаллах арсенида галлия вакансиями галлия и образуют комплексы типа V_{Ga} — примесь, которые, являясь акцепторами, дают в запрещенной зоне спектр глубоких уровней, что приводит к изменению типа проводимости арсенида галлия и его удельного сопротивления (появлению высокоомных слоев и т.д.).

Так как в парогазовой фазе всегда присутствуют примеси IV группы (например, из исходных материалов и кварца лодочки), то в получаемом слое арсенида галлия могут происходить вышеописанные процессы. Известно, что существует четкая корреляция между содержанием кремния в исходных материалах и электрофизическими параметрами получаемого эпитаксиального слоя арсенида галлия. Следовательно, необходимо осуществлять аналитический контроль содержания примесей на всех этапах технологического процесса.

Наиболее перспективными методами определения содержания микропримесей неметаллов в материалах эпитаксиальной технологии являются спектрофотометрические и люминесцентные. Они отличаются от других физико-химических и физических методов анализа простотой исполнения, экспрессностью, универсальностью и хорошими аналитическими характеристиками (предел обнаружения $1 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-6}\%$, относительная погрешность не более 10–15%). Их применение особенно целесообразно для определения таких неметаллических примесей, которые невозможно с достаточной точностью определить другими методами (бора, кремния, фосфора, селена, теллура).

Из известных методов определения перечисленных элементов [1] усовершенствованы и использованы следующие:

— метод определения кремния, мышьяка и фосфора по измерению светопоглощения комплексных соединений восстановленных форм соответствующих молибдено-гетерополикислот (молибденовой сини);

— метод определения бора по измерению светопоглощения комплексного соединения фторобората метиленового синего, экстрагированного дихлорэтаном;

— метод определения селена по измерению светопоглощения или люминесценции комплексных соединений селена с 3,3 — диаминобензидином или с 2,3 — диаминонафталином соответственно;

— метод определения теллура по измерению светопоглощения или люминесценции комплексных соединений теллура с бутилпроламином С с последующей экстракцией в присутствии бромид-ионов.

На основе приведенных методов разработаны методики определения микропримесей в соединениях бора, фосфора, мышьяка.

Из соединений бора наибольшее значение в эпитаксиальной технологии имеют борный ангидрид и трибромид бора, которые используются в качестве легирующих добавок при изготовлении полупроводниковых приборов. Суммарное весовое содержание примесей в этих материалах не должно превышать $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-5}\%$. В связи с тем, что известные методы контроля [2] не обеспечивают необходимой информации о содержании примесей в соединениях бора, были разработаны спектрофотометрические методы определения примесей кремния, фосфора, мышьяка, селена и флуориметрический метод определения теллура в борном ангидриде и трибромиде бора, которые вошли в ОСТ на фосфорный и борный ангидрид [3] (см. таблицу).

Технические характеристики методов определения микропримесей неметаллов в соединениях бора, фосфора и мышьяка

Анализируемый объект	Определяемый элемент	Метод анализа	Предел обнаружения, % по массе	Относительная погрешность, %	Навеска анализируемого материала, г	Источник
Борный ангидрид	Кремний	Спектрофотометрический	$5 \cdot 10^{-6}$	10	1,0	[4]
	Мышьяк	То же	$2 \cdot 10^{-5}$	15	2,5	[5]
	Фосфор	"	$1 \cdot 10^{-5}$	15	2,5	[5]
	Селен	"	$5 \cdot 10^{-5}$	15	2,0	[6]
Бор трехбромистый	Теллур	Люминесцентный	$1 \cdot 10^{-6}$	20	5,0	[7]
	Кремний	Спектрофотометрический	$5 \cdot 10^{-6}$	10	1,0	
	Мышьяк	То же	$2 \cdot 10^{-5}$	15	2,5	
	Фосфор	"	$1 \cdot 10^{-5}$	10	2,5	
Фосфор	Теллур	"	$2 \cdot 10^{-4}$	15	1,0	
	Теллур	Люминесцентный	$1 \cdot 10^{-6}$	20	5,0	[7]
	Селен	То же	$1 \cdot 10^{-6}$	10	1,0	[8]
Фосфин	Кремний	Спектрофотометрический	$1 \cdot 10^{-5}$	10	5,0	[8]
	Селен	То же	$2 \cdot 10^{-4}$	15	1,0	[9]
Фосфорный ангидрид	Бор	Спектрофотометрический	$5 \cdot 10^{-4}$	10	1,0	
	Мышьяк	То же	$2 \cdot 10^{-5}$	10	2,5	[10]
Фосфор треххлористый	Кремний	Спектрофотометрический	$1 \cdot 10^{-5}$	10	5,0	[8]
	Бор	То же	$5 \cdot 10^{-5}$	10	1,0	
	Мышьяк	"	$2 \cdot 10^{-5}$	10	2,5	[10]
	Теллур	"	$6 \cdot 10^{-5}$	15	3,0	
Мышьяк треххлористый	Кремний	Спектрофотометрический	$5 \cdot 10^{-6}$	10	10,0	[11]
	Бор	То же	$5 \cdot 10^{-6}$	10	2,0	
	Селен	Люминесцентный	$5 \cdot 10^{-7}$	10	10,0	
	Теллур	То же	$5 \cdot 10^{-7}$	12	10,0	
Арсин	Селен	Спектрофотометрический	$5 \cdot 10^{-6}$	10	1,0	
	Теллур	"	$2 \cdot 10^{-6}$	15	0,5	

Соединения фосфора в полупроводниковой технологии используются в качестве исходных компонентов и как легирующие добавки. Одной из наиболее трудноопределяемых примесей в этих материалах является кремний. Имеющиеся методы определения кремния в таких соединениях длительны или требуют сложной аппаратуры для его концентрирования. Разработанные методики определения кремния в красном фосфоре, фосфорном ангидриде, треххлористом фосфоре и газовой смеси фосфина с водородом, а также определения селена, теллура, мышьяка, отличаются простотой, надежностью и улучшенным пределом обнаружения (см. таблицу).

Для наращивания эпитаксиальных слоев арсенида галлия применяются *соединения мышьяка* — треххлористый мышьяк и арсин, от чистоты которых в значительной степени зависит качество получаемых слоев. Экспериментально установлено, что высокие электрофизические характеристики эпитаксиальных слоев арсенида галлия достигаются в том случае, если суммарное содержание кремния, селена, теллура и других электроактивных примесей в трихлориде мышьяка не превышает $1 \cdot 10^{-5} \%$.

Известно применение спектрофотометрического и спектрального методов определения указанных примесей [2], однако в них отсутствуют конкретные рекомендации по определению примесей в трихлориде.

Поэтому для отработки процесса очистки трихлорида мышьяка были разработаны высокочувствительные и надежные методы определения кремния, селена, теллура, бора в трихлориде мышьяка и в смеси арсина с водородом (см. таблицу).

Разработанные методы анализа позволили осуществлять контроль за получением особо важных для эпитаксиальной технологии соединений бора, фосфора, мышьяка, отработать наиболее эффективные способы очистки этих соединений от нежелательных примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горюшина В.Г., Разумова Л.С. Методы анализа арсенида галлия. — М.: Гиредмет, 1970. с. 48–50.
2. Карнель Н.Г., Конешович Э.С. Методы анализа веществ высокой чистоты. — М.: Наука, 1965, с. 161–163.
3. ОСТ 11032.060–77. Ангидриды фосфорный и борный. Спектрофотометрический метод определения содержания примесей кремния, бора, фосфора и мышьяка.
4. Журавлев Г.И., Токарева Л.В., Фролова Г.В. Спектрофотометрическое определение кремния в борном ангидриде. — Физико-химические методы анализа, 1978, вып. 3, с. 52–54.
5. Бескова Э.С., Журавлев Г.И., Морозова Л.М. Определение $1 \cdot 10^{-4} \%$ фосфора и $2 \cdot 10^{-4} \%$ мышьяка в оксиде бора особой чистоты. — Реактивы и особо чистые вещества, 1977, вып. 2, с. 11.
6. Бескова Э.С., Журавлев Г.И., Гамолина А.М. Определение $5 \cdot 10^{-4} \%$ селена в борном ангидриде особой чистоты. — Реактивы и особо чистые вещества, 1978, вып. 3, с. 44–45.
7. Кульбеда Т.А., Бескова Э.С., Гамолина А.М. Люминесцентное определение $1 \cdot 10^{-4} \%$ теллура в соединениях бора

особой чистоты. — Реактивы и особо чистые вещества, 1978, вып. 5, с. 21–23.

8. Бескова Э.С., Журавлев Г.И., Гамолина А.М. Определение $1 \cdot 10^{-4} \%$ селена в фосфоре (красном) особой чистоты. — Реактивы и особо чистые вещества, 1978, вып. 3, с. 48–49.

9. Определение $1 \cdot 10^{-4} \%$ селена и $2 \cdot 10^{-4} \%$ теллура в газовой смеси фосфина с водородом/Кульбеда Т.А., Кузьмин Н.М., Цветкова Т.П. и др. — Реактивы и особо чистые вещества, 1977, вып. 4, с. 13–17.

10. Бескова Э.С., Журавлев Г.И., Морозова А.М. Определение $2 \cdot 10^{-4} \%$ мышьяка в оксиде фосфора (V) и хлориде фосфора (III). — Реактивы и особо чистые вещества, 1977, вып. 2, с. 13–16.

11. Токарева Л.Б., Мазина Г.А. Спектрофотометрическое определение кремния в трихлориде мышьяка. — Реактивы и особо чистые вещества, 1975, вып. 4, с. 22–24.

Статья поступила 4 апреля 1980 г.

УДК 621.315.592.2:543.422.4

А. К. Афанасьев, А. С. Волков, В. П. Пелипас

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНЫХ ОКИСЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ A^{III} B^V МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Изучение ИК спектров пропускания позволило установить, что анодные окислы на поверхности арсенида индия (галлия) и фосфида индия представляют собой стеклообразные пленки, структурную сетку которых образуют окислы мышьяка и фосфора соответственно; окислы на основе антимонида индия являются аморфными соединениями типа твердого раствора окислов индия и сурьмы.

Анодные окисные пленки на пластинах соединений A^{III} B^V имеют границу раздела с полупроводниками, характеризующуюся высокими электрофизическими свойствами благодаря низкой температуре процесса получения пленок (~300 K). Это позволяет использовать такие пленки при изготовлении МДП-приборов, например транзисторов, варакторов, ПЗС [1, 2]. Химические связи в пленках, их фазовый состав и структурные особенности могут быть изучены методами инфракрасной спектроскопии [3, 4].

Исследования анодных окислов проводились на образцах, изготовленных на высокоомных прозрачных в ИК области спектра подложках и отличающихся условиями получения, временем выдержки

на воздухе и режимами отжига. В качестве подложек были выбраны монокристаллические пластины соединений $A^{III}B^V$ толщиной 350–500 мкм с ориентацией (100) или (111) В, травленные перед анодированием в полирующих травителях различного состава, выбираемого в зависимости от типа подложек [4]. Подложки стравливались примерно на 20–50 мкм с последующей отмывкой в органических растворителях (спирт, ацетон и др.) и сушкой инертным газом.

Условия выращивания анодных окислов на поверхности подложек представлены в таблице [4].

Условия выращивания анодных окислов

Материал	Электролит	Плотность тока, мА/см ²
Антимонид индия	0,1 N KOH (водный раствор)	0,5–100
	10%-ный раствор пиррофосфорной кислоты в тетрагидрофуруриловом спирте (ПКФ в ТГФС)	0,1–10
Арсенид индия	3%-ный водный раствор винной кислоты в этиленгликоле (ВК: ЭГ = 1:2)	1–30
	ПКФ в ТГФС	1–30
	0,1 N-ный водный раствор $(NH_4)_2 HPO_4$	1–30
Фосфид индия	ВК в ЭГ	1; 15; 30; 50
Арсенид галлия	ВК в ЭГ	0,3–10
	ПКФ в ТГФС	0,3–10

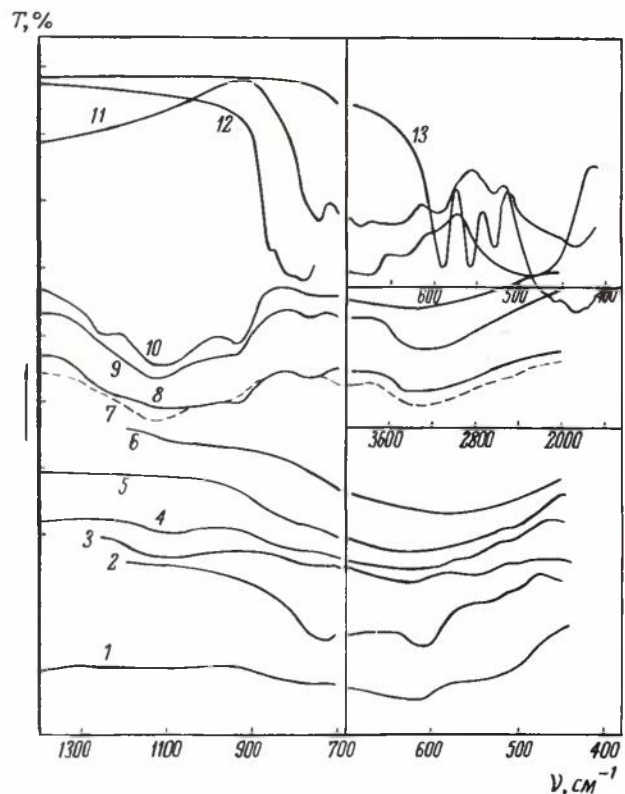
Съемки спектров анодных окислов проведены относительно соответствующих им неокисленных подложек арсенида, антимонида и фосфида индия и арсенида галлия на ИК спектрофотометре DS-402G в спектральном диапазоне 4000–430 cm^{-1} . Некоторые типичные спектры исследованных анодных окислов представлены на рисунке.

На оси абсцисс указаны волновые числа ν в cm^{-1} , на оси ординат — значения пропускания в масштабе: 1 деление соответствует 25% по шкале пропускания спектрофотометра. Спектры по оси ординат смещены. На правой части рисунка показаны различные спектральные области. К средней шкале по оси абсцисс относятся спектры 7–10, остальные спектры соответствуют низкочастотной спектральной области.

Высокие стеклообразующие свойства окислов мышьяка (As_2O_3 , As_2O_5) позволяют ожидать некоторого сходства характеристик ИК спектров анодных окислов, полученных на поверхности арсенида индия и галлия.

Характерной особенностью спектров пленок анодного окисла на арсениде индия является наличие поглощения в спектральном интервале от 950 до 450 cm^{-1} , на сплошном фоне которого выделяются широкие полосы поглощения со слабо выраженными максимумами в областях 805–815, 740–760, 625, 535–550 cm^{-1} .

Выдержка образцов (электролит ПКФ в ТГФС) на воздухе приводит к резкому снижению интенсивности всех указанных полос и возникновению очень широкой полосы поглощения со слабо проявляющимися максимумами при 1100 cm^{-1} . Информация о наличии полос поглощения, относящихся к группам OH, не получена из-за непрозрачности подложки в высокочастотной области спектра. Пленки на InAs, выращенные в электролите ПКФ в ТГФС, в диапазоне от 1250 до 900 cm^{-1} имеют интенсивную широкую полосу поглощения со слабыми максимумами, не проявляющимися в спектрах других образцов, и максимумом при 1100 cm^{-1} . После отжига при 200°C в водороде интенсивность этой полосы уменьшается, ее форма сглаживается, возрастает поглощение в спектральном интервале 900–750 cm^{-1} , т.е. спектр по форме приближается к спектрам образцов пленок на InAs, полученных в других электролитах. Таким образом, в спектрах некоторых образцов появляются полосы поглощения, зависящие от электролита. Кроме того, установлено, что пленки, полученные в электролитах



Инфракрасные спектры пропускания образцов пленок анодных окислов на поверхности InAs в электролите ВК в ЭГ (1), в электролите ПКФ в ТГФС спустя сутки (2) и полгода (3) после процесса анодирования; на поверхности GaAs в электролите ПКФ в ТГФС (4) и в ВК в ЭГ (5); на поверхности InSb в электролите 0,1N KOH (6); на поверхности InP в электролите ВК в ЭГ спустя несколько часов (8) и восемь суток (7) после анодирования; на поверхности InP в электролите ВК в ЭГ до (9) и после отжига (10); спектры пропускания порошков окислов Sb_2O_3 (11), Ga_2O_3 (12) и In_2O_3 (13)

ВК и ЭГ и $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, в меньшей степени подвержены старению, чем пленки, изготовленные в ПФК в ТГФС.

Спектры пленок на InAs , полученных при разных плотностях токов (1 и 30 mA/cm^2), практически идентичны.

Спектры анодных окисных пленок на арсениде галлия и индия в основном сходны между собой. Отличия состоят в том, что максимум высокочастотной полосы спектра GaAs смещен в сторону высоких частот (волновые числа 825–840 cm^{-1}). В области низких частот поглощение возрастает до появления слабо выраженного максимума при волновом числе 625 cm^{-1} , имеется также слабо проявляющийся максимум вблизи 550 cm^{-1} (см. рисунок, спектры 4, 5). Все максимумы поглощения в спектрах анодных окислов на арсениде галлия выделяются менее четко, чем соответствующие максимумы в спектрах окисных пленок на арсениде индия. В спектрах пленок, полученных в электролите ПФК в ТГФС, имеются интенсивные широкие полосы поглощения с максимумом на 1100 cm^{-1} .

Таким образом, отличия между спектрами анодных окислов на арсениде галлия и арсениде индия сводятся в основном к некоторому высокочастотному сдвигу ряда полос поглощения окислов на арсениде галлия. Полоса с максимумом на волновом числе 1100 cm^{-1} не изменяет своего положения. Этим подтверждается представление о том, что в формировании структуры анодных окислов на арсениде галлия и индия основную роль выполняет окисел мышьяка, а, учитывая его высокие стеклообразующие свойства, можно предположить, что именно окисел мышьяка формирует структурную сетку стекла, в которую внедряются ионы галлия или индия в основном в качестве модифицирующих элементов. Если же принять, что полоса поглощения с максимумом 550 cm^{-1} зависит главным образом от окисла галлия [3], то трудно объяснить появление этой полосы в спектрах окислов на арсениде индия.

Различия в положении полос на спектрах кристаллических фаз окислов мышьяка, индия, галлия и на спектрах анодных окислов на арсениде галлия и индия отражают различное строение ближнего порядка указанных групп окислов.

Был подобран аморфный окисел As_2O_3 [3], спектр которого во многом соответствует спектру анодного окисла на арсениде галлия (полученного в электролите: раствор винно-каменной кислоты в этиленгликоле) и имеет сходство с соответствующим спектром 5, приведенным на рисунке. Поэтому представление о молекулярных группах AsO_3 (но не GaO_3), которые, вероятно, присутствуют в аморфном окисле [3], может быть принято по отношению к структуре ближнего порядка стек-

лообразных анодных окислов на арсениде галлия и индия.

Наличие полосы поглощения при 1100 cm^{-1} можно объяснить присутствием связей $\text{As}-\text{OH}$, при этом нужно учитывать изменения в спектрах окисла на арсениде индия, выращенного в электролите ПФК в ТГФС, которые произошли спустя полгода после анодирования образца (см. рисунок).

Спектры образцов анодного окисла на фосфиде индия характеризуются наличием широких полос поглощения в спектральном диапазоне 1300–700 cm^{-1} с максимумами около 1250, 1120, 940 и 750 cm^{-1} . Съемка спектров окислов в области 700–430 cm^{-1} вследствие сильного решеточного поглощения фосфида индия не проводилась. Учитывая высокие стеклообразующие свойства окислов фосфора, близость положения указанных полос поглощения к соответствующим полосам фосфатного стекла [5], отсутствие в рассматриваемой спектральной области 4000–500 cm^{-1} полос поглощения, относящихся к связям $\text{In}-\text{O}$, можно заключить, что указанные полосы поглощения обусловлены структурными единицами (тетраэдрами PO_4) фосфатного стекла, модифицированного ионами индия и образующего в результате процесса анодного окисления InP . Спектры образцов, выдержанных на воздухе 8 суток после анодирования (см. рисунок, спектр 7), отличаются от спектров, снятых спустя несколько часов после получения анодного окисла (кривая 8), существенным увеличением интенсивности полосы поглощения с максимумом в районе 1115–1125 cm^{-1} и уменьшением интенсивности или исчезновением полосы с максимумом при 1225–1230 cm^{-1} . Следует отметить, что эти явления наблюдаются на фоне весьма небольшого повышения интенсивности полос поглощения при 3300 cm^{-1} , относящихся к OH группам адсорбированной пленками воды.

Описанные изменения в спектрах окисных пленок на InP можно объяснить результатом глубоких изменений в структуре пленок, связанных, по-видимому, с их окислением и образованием $\text{P}-\text{OH}$ групп.

Рассмотрение спектров образцов окисных пленок на InP до и после отжига при температуре 400°C в атмосфере водорода (спектры 9 и 10), а также дифференциального спектра позволяет установить существенные изменения в них: повышение интенсивности полос поглощения при 935, 1250 и 1045 cm^{-1} , практически исчезновение полос при 3300 cm^{-1} . Следовательно, после отжига сохраняется повышенное поглощение в полосе при 1115–2215 cm^{-1} и вновь восстанавливается полоса поглощения при 1250 cm^{-1} , но несколько смещенная в высокочастотную область спектра. Учитывая тенденцию стеклообразных веществ к увеличению степени совершенства ближнего и образованию дальнего порядка структурных единиц при отжиге,

на основании вышеизложенного можно заключить, что выдержка образцов на воздухе приводит к некоторой аморфизации их структуры, отжиг удаляет влагу, улучшает упорядоченность структуры пленок, но сохраняет изменения в их составе, приобретенные во время выдержки на воздухе.

Спектры образцов окисных пленок на поверхности фосфида индия, полученных в электролите ВК в ЭГ при плотностях тока 1; 15; 30 мА/см², аналогичны друг другу, имеют хорошую воспроизводимость по составу и структуре. Спектр образца, выращенного при токе 50 мА/см², значительно отличается от спектров других образцов на InP в первую очередь отсутствием поглощения при 1150–1160 см⁻¹ и "водных" полос поглощения, наличием интенсивной полосы поглощения при 715 см⁻¹ и группы узких полос поглощения. Возможно этот образец представляет собой стабильную структуру частично закристаллизованного окисла на InP, устойчивого к воздействию кислорода и влаги воздуха. (В связи с этим представляет интерес дальнейшее изучение окислов на InP, получаемых при таких высоких плотностях тока).

Спектры анодных окисных пленок на поверхности антимионид индия характеризуются отсутствием четко выраженных полос поглощения и имеют, как правило, одну очень широкую полосу поглощения, начинающуюся в диапазоне 800–900 см⁻¹ и простирающуюся до 500–475 см⁻¹, причем полоса настолько полого, что максимум практически невозможно выделить.

Из сравнения этой полосы с полосами поглощения спектров кристаллических окислов сурьмы и индия следует, что высокочастотная область полосы поглощения анодного окисла на антимиониде индия совпадает со спектральной областью поглощения окислов сурьмы, а низкочастотная (примерно от 600 до 500 см⁻¹) — с положением полос поглощения In₂O₃. Поскольку окислы индия и сурьмы не являются хорошими стеклообразователями, можно предположить, что анодный окисел на антимиониде индия представляет собой аморфное соединение типа твердого раствора окислов индия и сурьмы.

Приближенно можно считать, что спектральная кривая анодного окисла на антимиониде индия ограничивает площадь, характеризующую усредненное интегральное поглощение окислов сурьмы и индия. т.е. здесь нет превалирования структурной сетки одного из окислов, как в анодных окислах на арсениде галлия, арсениде и фосфиде индия.

ЛИТЕРАТУРА

1. W i e d e r H.H. Perspectives on III-V compound MIS structures. — *J. Vac. Sci. Technol.*, 1978, vol. 15, N 4, p. 1498–1506.
2. W i l m s e n C.W., S p a k S. MOS processing for III-V

compound Semiconductors: overview and bibliography. — *Thin Solid Films*, 1977, vol. 46, N 1, p. 17–45.

3. Optical studies of the anodic oxide on GaAs/E.D. Palik, N. Hinsburg, R.T. Holm, J.W. Gibson. — *J. Vac. Sci. Technol.*, 1978, vol. 15, N 4, p. 1488–1497.

4. Анодные окисные пленки на поверхности полупроводников группы А^{III} В^V/М.Н. Сорокин, В.З. Петрова, Ю.Д. Чистяков и др. — *ЗЭТ*, 1979, № 14, с. 1–64.

5. N e u r o t h N. Zusammenstellung der Infrarotspektren von Glasbidnern und Glasern. — *Glastechnische Berichte*, 1968, N 6, p. 243–252.

Статья поступила 3 апреля 1980 г.

УДК 543

В. И. Белый, Н. Ф. Захарчук,
Т. П. Смирнова, И. Г. Юделевич

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД И ТОНКИХ СЛОЕВ

Новые методики электрохимического анализа позволяют с высокой чувствительностью определять фазовый и элементный состав диэлектрических слоев толщиной в несколько нанометров, а также содержание влаги и поверхностно-активных органических примесей в газах.

Технология производства микроэлектронных устройств характеризуется большим числом операций (механических, физических и химических), в процессе которых исходные материалы могут существенно изменить элементный и фазовый состав, а следовательно, и свои свойства.

Успешная разработка и совершенствование процесса изготовления изделий микроэлектроники в значительной мере зависят от вооруженности технологов разнообразными аналитическими методами, позволяющими контролировать чистоту технологических сред и поверхностей, а также химический, фазовый состав материалов на различных этапах технологических процессов. Более сложный и малый по объему анализируемый объект обычно требует более сложных и дорогих методов, применяемых для его анализа, например методов, используемых для анализа поверхностей [1], таких как оже-спектроскопия или электронная спектроскопия для химического анализа. Однако в последнее время выяснилось, что наличия таких методов еще недостаточно для получения достоверных данных о химическом составе поверхности. Для этой цели необходима разработка методик анализа, включающая изготовление модельных образцов, паспортизацию их с помощью независимых аналитических методов и калибровку прибора на их основе. В случае, когда

требуется послыльный анализ, необходимо тщательное изучение процессов снятия слоев, что усложняет проведение исследования. При этом конечный результат анализа определяется не только совершенством прибора, а в большей степени грамотностью исследователя, его умением выбрать и изготовить необходимые модельные вещества, разобратся в существе протекающих химических реакций, распознать нежелательные побочные процессы. Кроме того, вышеназванные методы не являются настолько универсальными, чтобы их можно было использовать для анализа технологических сред (например, для определения воды или поверхностно-активных органических примесей). Контроль технологии изготовления микрорезистивных устройств может быть осуществлен хорошо известными простыми и дешевыми методами анализа с помощью тщательно разработанных методик, позволяющих улучшить аналитические возможности этих методов по сравнению со сложными и дорогостоящими способами анализа.

Рассмотрим примеры использования электрохимических методов анализа технологических сред и тонких диэлектрических слоев на поверхности полупроводниковых пластин. Исследования выполнялись на полярографах LP-7 (Чехословакия), ОН-102 или ОН-105 (Венгрия) и ППТ-1 (СССР). Рабочими электродами служили графитовый стержень, импрегнированный эпоксидной смолой [2], и графитово-пастовый электрод, в состав которого включали анализируемое вещество [3, 4], электродом сравнения — насыщенный каломельный электрод. В работе использовались реактивы марки ОСЧ или специально очищенные. Растворы готовились на трижды перегнанной в кварцевом аппарате дистиллированной воде. Для удаления кислорода из рабочего раствора, а также для перемешивания раствора применяли аргон или азот, предварительно очищенные от органических поверхностно-активных примесей [5]. Влажность газов определялась с помощью микрогигрометра.

Определение фазового и элементного состава диэлектрических слоев (на примере окисных слоев на InSb). Поскольку при проведении технологических операций окислы сурьмы могут улетучиваться либо растворяться, важно знать общее соотношение количеств индия и сурьмы в окисле.

Наибольшую информацию об этом можно получить при определении фазового и элементного состава на одном и том же образце. В этом случае образец делят на две части, одна из которых используется для фазового анализа, а другая для определения элементного состава окисных слоев.

Детальное исследование процесса электропревращения модельных соединений на основе сурьмы, индия и кислорода, введенных в состав пасты графитово-пастового электрода, позволило [6, 7] выявить спектр потенциалов электропревращений для каждого из следующих веществ: Sb, α - и β -Sb₂O₃, α - и β -Sb₂O₄, Sb₂O₅, Sb₆O₁₃, In₂O₃, InSbO₄, InSb (рис. 1).

Модельные образцы этих веществ были синтезированы на основе методик, описанных в литературе, и идентифицированы с помощью рентгенофазового анализа [6].

Снятие тонких (~0,1 мкм) окисных слоев на InSb проводилось механически с помощью порошка SiO₂, нанесенного в виде взвеси в этиловом спирте на тефлоновую пленку. Полученную таким образом смесь 2–5 мг SiO₂ и материала анализируемого окисного слоя вместе с графитовым порошком (25–100 мг, в зависимости от толщины сошлифованного слоя) с добавлением 1–2 капель силиконового масла помещали в агатовую ступку, тщательно перемешивали и растирали до получения однородной пасты, которую наносили на торец графитового стержня с тефлоновой насадкой. Графитово-пастовый электрод помещали в электролитическую ячейку, заполненную 1 М раствором HCl, и поляризовали в потенциодинамическом дифференциальном режиме от –1,0 до +1,3 В и обратно до –1,2 В со скоростью, не превышающей 10 мВ/с. Для регистрации Sb₂O₄ и Sb₂O₅ поверхность электрода покрывали новой порцией пасты и записывали только катодную вольт-амперную характеристику в диапазоне от +0,9 до +0,1 В в описанных выше условиях, но на фоне 3 М раствора HCl. Для дополнительного контроля присутствия металлической сурьмы в анализируемом слое поверхность электрода заново обновляли и регистрировали катодную вольт-амперную характеристику от +0,1 до –0,8 В на фоне 1 М или 3 М раствора HCl при его перемешивании. Было показано, что сурьма, находящаяся в составе InSb, при таких условиях неэлектроактивна.

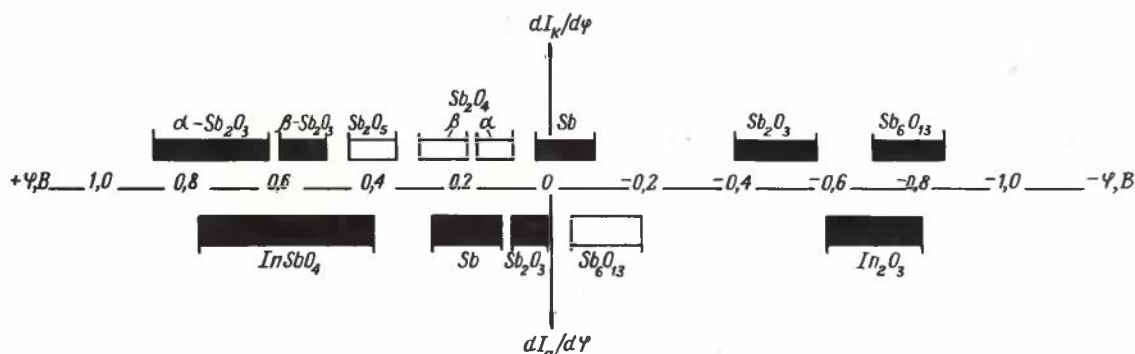


Рис. 1. Спектр потенциалов электропревращений для веществ системы In-Sb-O: ■ — 1 М HCl; □ — 3 М HCl

Преимуществом описанного способа снятия тонких слоев по сравнению с ионным и химическим травлением является то, что он не приводит к изменению их элементного или фазового состава. Однако получение количественных результатов в данном случае затруднено, особенно при послойном анализе вследствие невозможности контроля толщины снимаемых слоев. В то же время метод позволяет определять точное соотношение фаз в материале пленки (например, Sb_2O_3 : Sb_2O_5) с использованием внутренних стандартов [8].

Фазовый состав определяют сравнением вольт-амперных характеристик вещества исследуемого материала и модельных соединений. Аналогично могут быть разработаны методики фазового анализа любых других объектов. Чувствительность метода составляет $\sim 10^{-10}$ М, что позволяет проводить фазовый анализ слоев, начиная с толщин в несколько нанометров.

Для определения элементного состава окисных слоев образец помещали в 3 М раствор HCl (2–5 мл).

Окисные слои, полученные термическим окислением InSb, стравливали при нагревании до $\sim 80^\circ\text{C}$ под ИК лампой в течение 5–30 мин (в зависимости от толщины слоя). Окислы, образованные анодированием InSb, растворяли без нагревания в течение 1–2 мин. Для определения содержания индия 0,1–0,5 мл травильного раствора переносили в стаканчик ($V = 20$ мл), служащий затем электролитической ячейкой и выпаривали с 0,5 мл концентрированной HBr, чтобы удалить Sb^{3+} , затем два раза с 0,5 мл концентрированной HNO_3 с целью удаления HBr. К сухому остатку добавляли 10 мл 0,1 М раствора KNO_3 и $8 \cdot 10^{-5}$ М Hg^{2+} , полученный раствор подвергали электролизу при $-1,2$ В в течение 2 мин при перемешивании путем пропускания через него инертного газа. Затем регистрировали

анодную вольт-амперную характеристику до $\varphi = -0,10$ В. Максимум тока при $\varphi_{\max} = -0,68$ В пропорционален концентрации индия в исследуемом растворе. Содержание индия определяли по методу добавок с учетом аликвоты и общего объема травильного раствора.

Для определения содержания сурьмы к 0,1–0,5 мл травильного раствора добавляли 0,2 М Na_2SO_3 , 0,1 мл 3 М раствора HCl и нагревали под ИК лампой при $t \leq 60^\circ\text{C}$ в течение 5–10 мин. Остаток разбавляли до 10 мл 3 М раствором HCl, добавляли избыток In^{3+} до отношения $In^{3+}:Sb^{3+} = 20:1$, подключали к полярографу и осаждали сурьму на графитовом электроде при $\varphi_3 = -0,8$ В в течение 2 мин с перемешиванием раствора. После окончания электролиза регистрировали анодную вольт-амперную характеристику в диапазоне от $-0,6$ до $+0,2$ В без перемешивания. Максимум тока при $\varphi_{\max} = -0,06$ В пропорционален концентрации Sb^{3+} в исследуемом растворе. Содержание Sb^{3+} определяли по методу добавок, количество сурьмы или индия в растворе рассчитывали по формуле

$$x = \frac{V_T \cdot q(\lambda_2 - \lambda_1)}{V_a \cdot h_1},$$

где V_T и V_a – объемы травильного раствора и аликвоты соответственно, мл; q – добавка, мкг; h_1 и h_2 – высота анодного пика для исследуемого раствора и с добавкой соответственно, мм.

Описанные методы анализа позволяют производить контроль тонких (10–100 нм) диэлектрических слоев, что можно проиллюстрировать на примере окисных слоев на InSb.

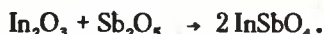
Таблица 1

Фазовый состав окислов на InSb, полученных окислением в сухом кислороде

Номер образца	Время окисления, мин	Фазовый состав		Отношение In/Sb	
		350°C	400°C	350°C	400°C
1	5	Sb, In_2O_3	Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , Sb_2O_5		
2	10	Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_5 , InSbO ₄	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄	2,4	
3	15	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄			
4	20		Sb, In_2O_3 , InSbO ₄		
5	25	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄			
6	30		Sb, In_2O_3 , InSbO ₄		3,4
7	35	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄			
8	40		Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , InSbO ₄		
9	45	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄			
10	50		Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , InSbO ₄		
11	60	Sb, In_2O_3 , InSbO ₄			13,9
12	130	Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , InSbO ₄			
13	255	Sb, In_2O_3 , β - Sb_2O_3 , InSbO ₄			
14	900	Sb, In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , α - Sb_2O_5 , β - Sb_2O_5 , InSbO ₄		6,5	

Предварительный термодинамический анализ системы In-Sb-O [9] показал наличие в ней термодинамически стабильных фаз: In_2O_3 , α -, β - Sb_2O_3 , α -, β - Sb_2O_4 , InSbO_4 , Sb .

Экспериментальное исследование слоев, получающихся при термическом окислении InSb в атмосфере кислорода показало, что они имеют сложный фазовый состав (табл. 1). Часть сурьмы на начальном этапе окисления остается в элементной форме, а индий окисляется до In_2O_3 . Остальная часть сурьмы образует с кислородом трехокись с последующим ее переходом в четырехокись и пятиокись. На конечных этапах окисления образуется соединение InSbO_4 в результате реакции:



Окислы сурьмы, не прореагировавшие с In_2O_3 с образованием InSbO_4 , испаряются вследствие их высокой летучести при температурах окисления, что подтверждается отношением In/Sb . При более продолжительном окислении в достаточно толстой окисной пленке (~40–50 нм), препятствующей испарению окислов, вновь обнаруживаются окислы сурьмы β - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_4 . Из табл. 1 видно, что в пленках, полученных при 350°C в течение 15 ч окисления, присутствуют фазы, соответствующие ранее выявленным [9] термодинамически равновесным фазам.

Характер послойного распределения различных окислов на антимониде индия для образца 14

Таблица 2

Результаты послойного анализа фазового состава окислов на антимониде индия

Номер окисного слоя в порядке его снятия	Фазовый состав
1	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , InSbO_4
2	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , α - Sb_2O_4 , β - Sb_2O_4 , InSbO_4
3	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , α - Sb_2O_4 , β - Sb_2O_4 , InSbO_4
4	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , α - Sb_2O_4 , β - Sb_2O_4
5	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , α - Sb_2O_4 , β - Sb_2O_4
6	In_2O_3 , α - Sb_2O_3 , β - Sb_2O_3 , Sb

(см. табл. 1), полученного окислением в течение 15 ч при температуре 350°C , виден из табл. 2. В верхних слоях пленки сурьма находится в высшей степени окисления в форме соединений α -, β - Sb_2O_3 , InSbO_4 ; в слоях, граничащих с поверхностью InSb , в форме α -, β - Sb_2O_3 и в виде элементарной сурьмы.

Использование методик вольтамперметрии на угольно-пастовом электроде позволило исследовать также изменение микрофазового состава анодных окисных слоев (АОС).

Выявлен многослойный характер АОС, полученных окислением антимонида индия в неводном электролите (растворе кислородосодержащей соли в смеси диметилформамида с глицерином). В окислах, полученных в гальваностатическом режиме, на границе с полупроводником всегда обнаруживаются Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , а на поверхности — In_2O_3 , InSbO_4 . Установленная закономерность расположения слоев в окисле обусловлена особенностью механизма его формирования. В потенциостатическом режиме при напряжении на ячейке, равном 9 В, синтезируются аморфные АОС, в состав которых входят In_2O_3 , Sb , Sb_2O_3 ; при 40 В — In_2O_3 , Sb , Sb_2O_3 , Sb_2O_4 , InSbO_4 . Термодинамический анализ [9] показал, что все эти сочетания окислов являются стабильными.

АОС на антимониде индия, полученные в 0,1 М растворе KOH , представляет собой сочетание Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , Sb_2O_4 и Sb_6O_{13} . Изменение свободной энергии Гиббса для твердотельных реакций с участием этих окислов отрицательно [9]: $\text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Sb}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{Sb}_2\text{O}_4$; $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{Sb}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{InSbO}_4$; $\text{Sb}_6\text{O}_{13} + \text{Sb}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Sb}_2\text{O}_4$.

Очевидно, что полученные в 0,1 М растворе KOH АОС термодинамически нестабильны. Отжиг этих слоев в различных газовых средах приводит к изменению их фазового состава. Как видно из рис. 2, а, отжиг в водороде при температурах 100 и 350°C в течение одного часа вызывает восстановление окислов сурьмы до Sb . Кроме того, In_2O_3 и Sb_2O_3 взаимодействуют с образованием InSbO_4 . Отжиг на воздухе при этих же температурах приводит также к образованию InSbO_4 и существенному увеличению количества Sb_2O_4 (рис. 2, б).

Изучение фазового состава слоев, получаемых анодным окислением InSb в электролитах на осно-

Таблица 3

Влияние режима анодного окисления InSb на фазовый состав окисного слоя

Условия окисления				Фазовый состав окисла	Отношение In/Sb
Плотность тока, mA/cm^2	Напряжение формирования U , В	Световой режим	Окислы, растворенные в 0,1 М KOH		
0,22	5,0	УФ освещение	α , β - Sb_2O_3	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , Sb_2O_{11}	0,98
0,33	6,6	УФ освещение	α - Sb_2O_4	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3	1,18
1,00	11,0	УФ освещение	α , β - Sb_2O_3	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , Sb_6O_{13}	1,77
1,00	25,00	Без освещения	α , β - Sb_2O_3 , Sb_2O_4 , Sb_6O_{13}	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , Sb_6O_{13}	0,40
1,50	11,0	УФ освещение	Sb_2O_3	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3	0,50
2,3	7,0	УФ освещение	$\text{Sb}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	Sb , In_2O_3 , Sb_2O_3 , Sb_6O_{13}	0,13

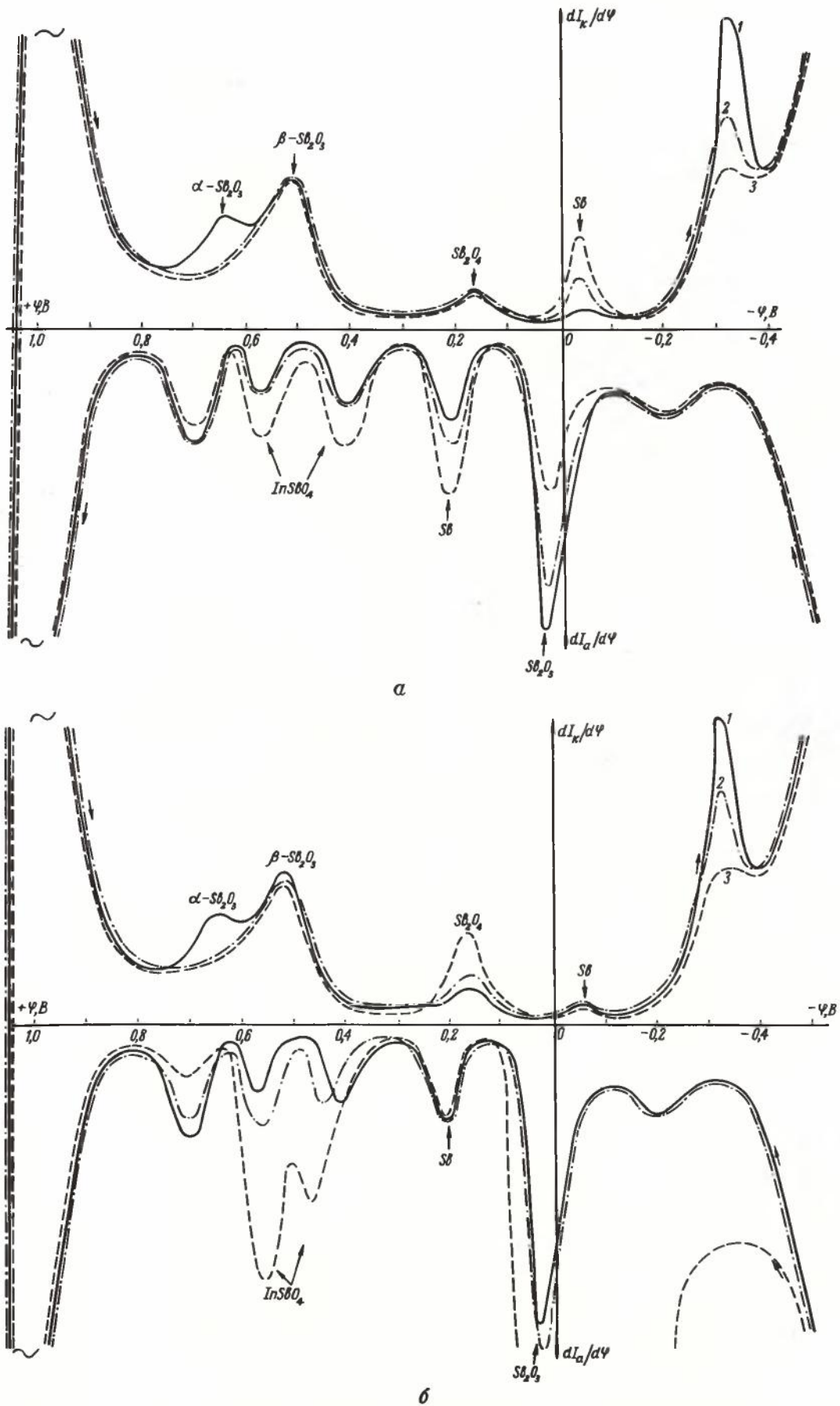


Рис. 2. Анодно-катодные поляризационные кривые анодных окисных пленок исходного состава In_2O_3 , Sb , Sb_2O_3 , Sb_2O_4 , InSbO_4 , отожженных в водороде (а) и на воздухе (б): 1 - до отжига; 2 - после отжига при 100°C ; 3 - после отжига при 350°C

ве водных растворов КОН при освещении и на затемненных участках, показало, что освещение ускоряет переход окислов из неравновесной фазы в равновесную. Если при этом ввести в электролит окислы сурьмы, то образования набора равновесных окисных фаз не происходит. Как видно из табл. 3, в полученных таким образом слоях обнаруживается в основном неравновесная форма окислов сурьмы Sb_6O_{13} , либо неравновесное сочетание окисных форм $Sb_2O_3 + Sb_6O_{13}$, $In_2O_3 + Sb_2O_3$. При использовании электролитов, насыщенных окислами трехвалентной сурьмы, обогащения анодного окисла окислами сурьмы не наблюдается и отношение $In/Sb \geq 1$. В случае добавления Sb_2O_3 в раствор КОН в анодном окисле также образуется смесь неравновесных окисных фаз, но при этом существенно уменьшается отношение In/Sb , что свидетельствует об осаждении сурьмы из раствора. Преимуществами разработанной методики фазового анализа окисных слоев на $InSb$ по сравнению с известными методами анализа поверхности являются высокая чувствительность, возможность различать кристаллографические структуры (например, $\alpha-Sb_2O_3$ и $\beta-Sb_2O_3$), быстрота проведения анализа (от одной до нескольких минут), простота и дешевизна используемой аппаратуры.

Определение поверхностно-активных органических примесей (ПАОП) и влаги. Определение ПАОП методом инверсионной вольтамперметрии основано на эффекте ингибирования электродных процессов в присутствии поверхностно-активных веществ [5, 10].

Содержание масла в аргоне, азоте, водороде может быть определено по методике, применяемой для определения масла в газообразном аммиаке [5]. Для анализа пластины на содержание ПАОП в рабочий стаканчик отбирают 10 мл фонового раствора (1 М HCl), добавляют $5 \cdot 10^{-5}$ М Hg^{2+} и $2 \cdot 10^{-6}$ М Cd^{2+} , через раствор в течение 4–5 мин пропускают очищенный от ПАОП инертный газ [5]. Электролиз проводят при потенциале – 1,2 В в течение 3 мин. По окончании электролиза регистрируют анодную вольт-амперную характеристику до значения потенциала электрода – 0,1 В, которое выдерживают в течение 1,0–1,5 мин. Затем повторно проводят электролиз и после регистрации максимума тока при $\varphi_{max} = -0,6$ В определяют h_0 – высоту пика тока как среднее из двух значений. Рабочий стаканчик с раствором и помещенной в него анализируемой пластиной, закрытый часовым стеклом, нагревают до $t \leq 40^\circ C$ в течение 3–5 мин. Раствор охлаждают, и после опускания в него электродов и подключения к полярографу пропускают через ячейку инертный газ в течение 4–5 мин. Затем дважды проводят электролиз в описанных выше условиях, регистрируют максимум тока при $\varphi_{max} = -0,6$ В и определяют h_x как среднее из двух измерений. В раствор вводят добавку ПАОП и, записав дважды инверсионный максимум тока при выбранных

условиях, определяют $h_{доб}$. Содержание ПАОП рассчитывается по формуле

$$x = g \frac{(h_0 - h_x)}{h_x - h_{доб}} \text{ [мкг]}.$$

Данная методика применима для определения растворимых в водных растворах ПАОП. Для определения нерастворимых в водных растворах ПАОП (ХСЛ, пицеин) используется та же методика, но с введением в фоновый электролит 10%-ного очищенного ацетона.

Для определения содержания влаги исследуемый газ с точным стабилизированным расходом пропускают через слой порошка P_2O_5 , расположенного в датчике между двумя сетчатыми платиновыми электродами, которые отключаются от источника питания на время, требуемое для накопления влаги в датчике. Поглощенная из газа влага, распределившаяся по поверхности входного электрода, сразу же подвергается электролизу при напряжении 60 В. Количество влаги x пропорционально количеству электричества Q , расходуемому на этот процесс в соответствии с законом Фарадея.

$$\begin{aligned} x = nQ &= n \int_0^t I dt = n \int_0^t I_{max} e^{-kt} dt = -nI_{max} \frac{e^{-kt}}{k} \Big|_0^t = \\ &= nI_{max} \frac{1 - e^{-kt}}{k}. \end{aligned}$$

$$e^{-kt} \rightarrow 0, \text{ когда } t \rightarrow \infty, \text{ тогда } x = n \frac{I_{max}}{k} = KI_{max}, \text{ т.е.}$$

количество влаги прямо пропорционально максимальному току I_{max} электролиза. Постоянная K зависит от геометрии датчика, коэффициента диффузии воды в адсорбенте и определяется экспериментально для данного датчика, что освобождает от необходимости расчета Q . Концентрацию влаги можно вычислить по формуле:

$$C_x = \frac{KI_{max}}{V_x} \frac{10^9}{V_x} \text{ [мг/м}^3\text{]},$$

где V_x – объем анализируемого газа, m^3 .

Преимуществом описанных методик определения ПАОП и воды в газах по сравнению с известными методиками является то, что они позволяют с большой чувствительностью ($10^{-6}\%$ для H_2O и $\sim 10^{-5}$ мг/мл для ПАОП) проводить исследование не только инертных, но и агрессивных газов и их смесей (например, HCl, NH_3 , $H_2 + SiCl_4$). В табл. 4 представлены результаты анализа газообразного аммиака, используемого в качестве одного из основных реагентов при синтезе слоев нитрида кремния, которые были получены в реакторе пониженного давления при соотношении $NH_3/SiH_4 = 40$ и температуре подложки $T = 900^\circ C$. Как следует из таблицы, скорость травления слоев нитрида кремния

Таблица 4

Влияние различных способов очистки аммиака на качество нитрида кремния

Способы очистки технического аммиака	Объемное содержание воды в аммиаке $C_{H_2O}, \%$	Содержание ПАОП в аммиаке $C_{ПАОП}, \text{мг/л}$	Скорость растворения пленки Si_3N_4 в плавиковой кислоте, нм/мин
Без очистки	$2,4 \cdot 10^{-4}$	2,8	12,4
Последовательное пропускание через колонки с NaOH и активированным углем	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$	10,4
Однократная конденсация в колонку с металлическим Na и последующая перекоденсация в баллон	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	10,1
Последовательное пропускание через колонки с NaOH и активированным углем, однократная конденсация в колонку с металлическим Na и последующая перекоденсация в баллон	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	9,5
Последовательное пропускание через колонки с NaOH и активированным углем, двукратная перекоденсация в колонку с металлическим Na и последующая перекоденсация в баллон	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	8,7

уменьшается с уменьшением содержания воды и ПАОП в аммиаке, что свидетельствует об улучшении качества этих слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы анализа поверхностей/Под ред. А.Зандерны, — М.: Мир, 1979. — 493 с.
2. А.с. 312620 (СССР). Способ изготовления графитового индикаторного электрода/Е.М. Ройзенблат. Оpubл. в Б.И., 1971, № 86.
3. А.с. 191209 (СССР). Способ вольтамперметрического анализа/В.Г. Бариков, О.А. Сонгина. Оpubл. в Б.И., 1967, № 3.
4. Б р а й н и н а Х.З., А ш п у р В.В. Фазовый электрохимический анализ с угольно-пастовым электроактивным электродом. — Заводская лаборатория, 1979, т. 45, № 1, с. 10–20.
5. З а х а р ч у к Н.Ф., С о к о л о в а З.А., Ю д е л е в и ч И.Г. Использование инверсионной вольтамперметрии на графитовом электроде для определения масла в газообразном аммиаке. — Заводская лаборатория, 1976, т. 42, № 3, с. 267–270.
6. Фазовый электрохимический анализ окисных слоев на InSb: Сообщение I. Электропревращения Sb и некоторых соединений сурьмы с индием /Н.Ф. Захарчук, Н.А. Валишева, К.П. Лелькин и др. — Изв. СО АН СССР. Сер. хим., 1980, № 4, вып. 2, с. 39–44.
7. Фазовый электрохимический анализ окисных слоев на InSb: Сообщение 2. Электропревращения окислов сурьмы / Н.Ф.Захарчук, Н.А. Валишева, К.П. Лелькин и др. — Изв. СО АН СССР. Сер.хим., 1980, № 4, вып. 2, с. 44–53.
8. Б р а й н и н а Х.З., Л е с у н о в а Р.П., С е р е б р я к о в а Л.Н. Внутренний стандарт в фазовом электрохимическом анализе. — Заводская лаборатория, 1974, т. 40, № 6, с. 632–635.
9. Термическое окисление антимонида индия в атмосфере кислорода /Т.П. Смирнова, А.М. Голубенко, В.И. Белый и др. — Деп. в ВИНТИ, № 406–80 Деп., 4 февраля 1980 г.
10. Определение поверхностно-активных органических примесей методом косвенной инверсионной вольтамперметрии на графитовом электроде /Н.Ф. Захарчук, З.А. Соколова, В.С. Булушева и др. Изв. СО АН СССР. Сер. хим., 1977, вып. 3, с. 142–145.

Статья поступила 4 июня 1980 г.

УДК 543.4.548.55

В.А.Геркен, Б.К. Казуров,
В.И.Пахомов, Г.Б.Сильницкая

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ МОНО- КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рентгеновские методы контроля совершенства и ориентации монокристаллов по сравнению с другими методами (химическими, оптическими, радиоспектроскопическими, электронно-микроскопическими) характеризуются большой прецизионностью, наглядностью и простотой аппаратуры.

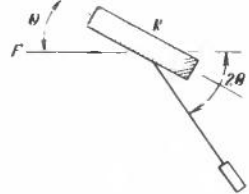
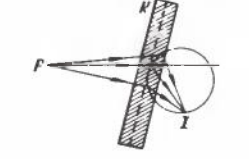
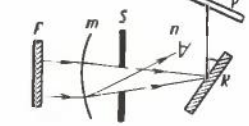
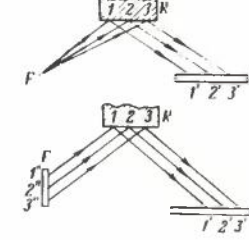
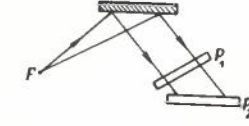
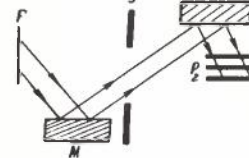
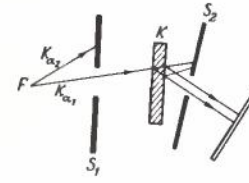
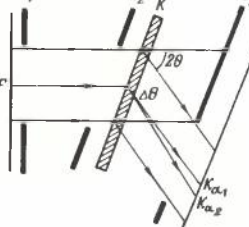
Основным требованием к монокристаллам, применяемым для изготовления ИЭТ, является их структурное совершенство и точная кристаллографическая ориентация.

Для исследования структурного совершенства кристаллов применяются различные методы: химические, оптические, радиоспектроскопические, электронно-микроскопические, а также рентгеновские, включающие рентгено топографические и рентгенодифрактометрические, которые позволяют обнаруживать объемные, линейные и точечные дефекты и контролировать кристаллографическую ориентацию монокристаллических элементов ИЭТ [1–10].

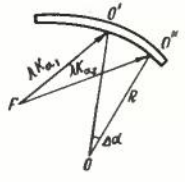
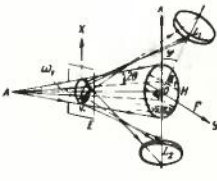
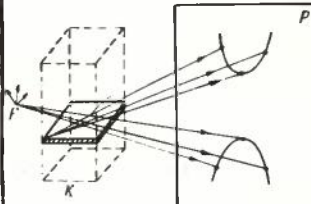
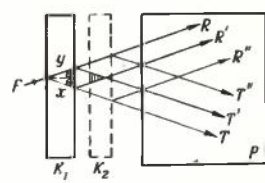
Недостатком нерентгеновских методов контроля ориентации монокристаллов является их неуниверсальность. Любой из этих методов дает возможность контролировать ориентацию лишь определенной группы кристаллов, к которым относятся хорошо морфологически ограниченные кристаллы, имеющие спайность по определенным направлениям, прозрачные кристаллы средних сингоний, дающие хорошую коноскопическую картину, кристаллы, обладающие определенным электрическим или световым эффектом и т.п. Кроме того, нерентгеновские методы позволяют находить лишь основные кристаллографические направления и не дают возможности определить необходимые ретикулярные кристаллографические плоскости $\{hkl\}$. В связи с этим, в настоящее время наибольшее распространение получили рентгеновские методы контроля совершенства и кристаллографической ориентации монокристаллов. Основные из этих методов (см. таблицу) рассмотрены в статье. Остановимся более подробно на некоторых из них.

Наиболее простым и универсальным является метод Фудживара (метод широкорасходящегося рентгеновского пучка), представляющий собой видоизмененный метод Лауэ [11]. Впервые он был

Рентгенодифракционные методы исследования несовершенства монокристаллов

Описание метода	Схема эксперимента	Характеристика метода
<p>Дифрактометрический метод. Узкий параллельный пучок монохроматических рентгеновских лучей падает под углом Брегга к определенной кристаллографической плоскости исследуемого кристалла. Регистрация дифрагированных рентгеновских лучей производится с помощью счетчиков.</p>		<p>Определяются степень дезориентации кристалла и точечные дефекты. Можно исследовать образцы любых размеров. Время замера 10 точек составляет 15 мин. В результате сканирования по точкам определяются углы разориентации блоков на поверхности исследуемого кристалла. Точность замера до $15''$.</p>
<p>Метод Гинье-Теневьена (метод сфокусированных лауэграмм). Расходящийся пучок полихроматических рентгеновских лучей направляется на блочный монокристалл. При съемке на просвет можно достичь фокусировки отраженного пучка и появления на фотопленке пятна, состоящего из системы штрихов.</p>		<p>Выявляется дезориентация кристалла с точностью $15'$ при времени экспонирования 3–6 ч. Недостатки: сложность аппаратуры, невозможность определения размеров блоков и их пространственного распределения.</p>
<p>Метод Ламбо. Пучок монохроматических лучей отраженных от изогнутого монохроматора, падает под углом Брегга (для среднего луча) на блочный монокристалл. При этом на фотопленке появляется система линий, смещенная одна относительно другой.</p>		<p>Выявляется дезориентация блоков с точностью $15'$ при времени экспонирования 1–5 ч. Недостатки: сложность аппаратуры, невозможность определения размеров блоков и их пространственного распределения.</p>
<p>Метод Берга-Баррета (микрорентгенография) На исследуемый монокристалл под определенным углом падает параллельный или расходящийся пучок моно- или полихроматических рентгеновских лучей. Дифрагированные рентгеновские лучи регистрируются на фотопленке. Различия в отражательной способности отдельных участков кристалла позволяет выявить его дефекты.</p>		<p>Выявляются блоки и дислокации в кристаллах. Можно исследовать большую поверхность образца. Угловое разрешение $1'$, линейное — 1 мкм, время экспонирования 1–5 ч. Аппаратура простая.</p>
<p>Метод Шульца. Пучок полихроматических рентгеновских лучей, исходящих из точечного источника, направляется на монокристалл под углом $\sim 25^\circ$. Фотопленку располагают параллельно поверхности образца или перпендикулярно отраженному лучу.</p>		<p>Выявляются блоки и дислокации в кристаллах. Можно исследовать образцы любых размеров. Аппаратура очень простая. Недостатки: невысокое линейное разрешение (25 мкм) и большое время экспонирования (1–10 ч).</p>
<p>Метод Вейсмана. Используется монохроматическое излучение. Снимается серия микрорентгенограмм (по Баррету) при увеличивающемся расстоянии между образцом и пленкой.</p>		<p>Выявляются блоки в кристаллах. Угловое разрешение $1'$, линейное — 1 мкм. Недостатки: большое время экспонирования (до 10 ч) и сложность аппаратуры.</p>
<p>Метод Ланга (метод экстинкционного контраста). Пучок монохроматических рентгеновских лучей от точечного источника падает на монокристалл, установленный в отражающее положение. Кристалл и фотопленка двигаются синхронно. Дефектные участки кристалла проявляются на микрорентгенограммах как области повышенной интенсивности.</p>		<p>Выявляются дислокации, дефекты упаковки, напряжения в кристаллах. Линейное разрешение 5–10 мкм. Аппаратура несложная. Можно исследовать тонкие кристаллы ($\mu t < 1$). Недостаток: большое время экспонирования (3–5 ч).</p>
<p>Метод Бормана (метод широкого параллельного пучка). Широкий параллельный пучок монохроматических рентгеновских лучей от источника с линейным острым фокусом направляется на монокристалл, установленный в отражающее положение. Дефектные участки кристалла проявляются на микрорентгенограммах как области пониженной интенсивности.</p>		<p>Выявляются дислокации, дефекты упаковки, примеси, напряжения в кристаллах. Линейное разрешение 5–10 мкм. Аппаратура несложная. Можно изучать довольно "толстые" образцы ($\mu t > 10$). Недостатки: большое время экспонирования (20 ч).</p>

Продолжение табл.

Описание метода	Схема эксперимента	Характеристика метода
<p>Метод кривых качания (двукристалльная спектрометрия и топография). Пучок полихроматических лучей падает на кристалл-монокристалл, установленный в отражающее положение, дифрагированный монокристаллический луч — на изучаемый кристалл, который качается вокруг вертикальной оси на несколько градусов. Рентгеновские лучи регистрируются на фотопленке или с помощью счетчиков.</p>		<p>Метод очень чувствителен к различным несовершенствам кристалла. Угловое разрешение $0,1^\circ$, линейное 1 мкм. Недостатки: очень сложная аппаратура, большое время экспонирования (1 ч), невыявляемость размеров блоков и их пространственного распределения в кристаллах.</p>
<p>Метод Фудживара (метод широкорасходящегося рентгеновского пучка). Широкорасходящийся пучок полихроматических рентгеновских лучей от точечного источника направляется на неподвижный кристалл. Дифрагированные от разных блоков образца рентгеновские лучи вызывают расщепление увеличенных лауэвских пятен на фудживарограммах.</p>		<p>Выявляются блоки, дислокации, напряженные участки кристаллов. Угловое разрешение 10°, линейное — 10 мкм. Время экспонирования — 1–6 ч. Аппаратура очень простая.</p>
<p>Метод псевдокоселевских лучей. Сильно расходящийся пучок монокристаллических рентгеновских лучей от точечного источника падает на близко расположенный неподвижный монокристалл. Несовершенства кристалла определяются по характеру дифракционных и экстинкционных псевдокоселевских линий, получаемых на рентгенограммах.</p>		<p>Выявляются блоки и напряженные участки кристалла. Угловое разрешение 10°, линейное — 10 мкм, время экспонирования ≤ 1 ч, аппаратура простая. Недостатки: невыявляемость дислокаций и пространственного распределения блоков в кристаллах.</p>
<p>Метод муаровой топографии. Пучок монокристаллических рентгеновских лучей от точечного источника направляется на кристаллическую многослойную структуру. В результате взаимодействия прямых и дифрагированных лучей на фотопленке появляется муаровая картина.</p>		<p>Метод очень чувствителен к различным несовершенствам кристалла. Угловое разрешение $0,01^\circ$, линейное — 1 мкм. Недостатки: очень сложная аппаратура и большое время экспонирования (> 10 ч).</p>

использован для изучения субструктуры синтетического корунда, затем для исследования блочности монокристаллов лейкосапфира и рубина, выращенных различными способами. Наиболее полный анализ был проведен на монокристаллах, полученных методом Вернейля.

Метод Фудживара получил дальнейшее развитие: была уточнена геометрия съемки "на просвет" и "на отражение", выведены формулы для расчета размеров блоков и углов разориентации, определена возможность выявления малоугловых границ [12, 13]. В настоящее время методом Фудживара изучается характер пластической деформации и несовершенства монокристаллов диэлектриков, металлов, полупроводников, а также субструктура гетероэпитаксиальных монокристаллических слоев.

При исследовании блочных кристаллов на фотопленке отображается картина лауэвских пятен сложного строения с линиями характеристического излучения, имеющими ступенчатый характер (рис. 1).

По структуре лауэвских пятен определяется блочность исследуемых образцов. Несовершенным монокристаллам соответствуют лауэвские пятна с неоднородной структурой, совершенным — прямые характеристические линии.

На специальной рентгенограмме, получаемой при малом времени экспонирования, на центральной части снимка можно увидеть тонкие белые линии, а также темные и белые пятна, свидетельствующие о наличии в образце дефектов, которые обычно обнаруживаются при дефектоскопическом рентгеновском просвечивании изделий. Получение увеличенной рентгенограммы образца позволяет применять этот метод и для дефектоскопии монокристаллических элементов малых размеров.

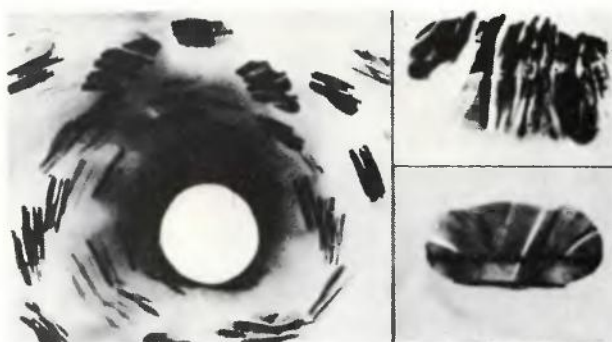


Рис. 1. Структура лауэвских пятен на фудживарограммах монокристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Одновременное получение отражений от различных плоскостей дает возможность выявить пространственное расположение блоков в исследуемом кристалле. Размеры блоков могут быть определены с линейным разрешением 10 мкм, углы разориентации относительно двух взаимно перпендикулярных направлений — с разрешением $2'$ для азимутального (антибрегговского) направления и $40''$ и $10''$ для радиального (брегговского) при получении изображений соответственно в "белом" и характеристическом излучениях.

Съемка фудживарограмм проводится на рентгеновских аппаратах, имеющих острофокусные источники излучения, например на АРС-4 (МАРС) с трубкой БСВ-5, с молибденовым анодом ($V = 40$ кВ, $I = 0,6$ мА). Диаметр фокального пятна составляет 40 мкм. Расстояние D от образца до фокуса в экспериментах равно 100 мм, расстояние A от образца до пленки — 150–200 мм, время экспонирования 1–2 ч. Для получения специальных рентгенограмм, на которых проявляются белые тени характеристических лучей, требуется время экспонирования 5–10 мин.

Поскольку в случае увеличения дифракционных пятен при $A > D$ теряется чувствительность, целесообразнее, имея фотоматериалы высокого качества, применять съемку при $D > A$, т.е. без увеличения дифракционных пятен [11]. Применение установки "Микрофлекс" с острофокусной трубкой (5 мкм) и серебряным анодом при расстояниях $D \sim 70$ мм и $A \sim 40$ мм дает возможность получить очень высокое разрешение, что позволяет использовать этот метод для исследования дислокаций и дефектов решетки, вызванных сегрегацией примесей в монокристаллах кремния.

При исследовании монокристаллов часто приходится иметь дело с массивными образцами, которые нельзя разрушать. В таких случаях используются съемки "на отражение" по методу Лауэ (получение обратных лауэграмм) и по методу Шульца. Съемки обычно проводят на установках АРС-4 и "Микрофлекс" с применением медного излучения ($V = 40$ кВ, $I = 3$ мА) при $D = 120$ мм, $A = 60$ мм. При съемке лазерных элементов расстояние D подбирается таким, чтобы полностью освещался торец элемента и A равнялось $D/2$. Время съемки составляет 4–5 ч.

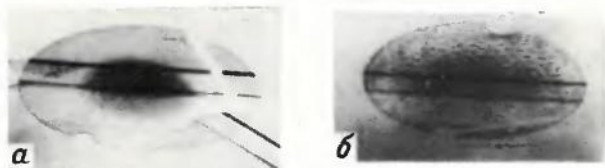


Рис. 2. Дифракционные пятна рентгенограмм, полученных от колеблющихся кварцевых резонаторов: а — расширение характеристической линии при повышенной амплитуде колебаний; б — паразитные колебания, возникающие в результате взаимодействия упругих волн с краем пластины

Универсальность этого метода была подтверждена при изучении картины распределения узлов и пучностей стоячих упругих волн в колеблющихся кварцевых резонаторах [14]. По рентгенограммам, полученным от неколеблющегося резонатора, можно проверять дефектность структуры кварца, качество обработки пьезоэлемента, а также обнаруживать механические напряжения вблизи точек крепления. По рентгенограммам, полученным от колеблющегося резонатора, проверяется его работа на частоте используемого вида колебаний и устанавливаются типы побочных резонансов, входящих в частотный спектр резонатора. Конфигурация и размеры активных участков колеблющегося пьезоэлемента определяются видом колебаний, геометрической формой пьезоэлемента и электрода, способом крепления кварцевой пластины в резонаторе, уровнем возбуждения и другими факторами. Если вследствие большого уровня возбуждения, неправильной геометрической формы пьезоэлемента, раздвоения кварца и т.д. размер активной части значительно увеличивается, то в результате потерь на краях и в системе крепления пьезоэлемента рабочие характеристики кварцевого резонатора резко ухудшаются: уменьшается добротность, возрастает старение и искажается частотно-температурная характеристика. Кроме того, по уширению характеристической линии на рентгенограммах можно рассчитать изменение межплоскостного расстояния $d_{\{hk\}}$ и судить о характере деформации кристаллических плоскостей (рис. 2).

Для определения дислокаций более совершенных, практически безблочных монокристаллов в микрорентгенографии применяется очень простой метод Барта-Хоземана, являющийся разновидностью метода Бормана. В отличие от других методов с использованием широкопараллельного пучка этот метод не требует применения сложного сканирующего устройства. Кроме того, для него не обязательна высокая точность гониометрического устройства, что упрощает выведение кристалла в отражающее положение. Отраженный от кристалла пучок рентгеновских лучей содержит дублет K_{α} , однако благодаря его малой дисперсии при мягком излучении разрешение метода достаточно высокое для выявления дислокаций. Методом Барта-Хоземана были исследованы водорастворимые кристаллы ряда KDP и кристаллы ниобата лития. При этом в качестве генератора рентгеновского излучения использовался аппарат УРС-60 с трубкой БСВ-8, имеющей медный анод ($V = 30$ кВ, $I = 20$ мА). Кристаллы KDP располагались так, чтобы изучаемые плоскости $\{h00\}$ были перпендикулярны длинной стороне линейчатого фокуса трубки.

Недостатками метода являются невысокий контраст изображения дислокаций на рентгенограмме,

влияние фона флуоресцентного излучения, наложение на изображение брегговских или лауэвских рефлексов от других плоскостей и разрушение образца.

Для выявления дислокаций в монокристаллах в настоящее время используют также методы Бормана и Ланга. Метод Бормана, основанный на аномальном прохождении рентгеновских лучей в практически совершенном кристалле, позволяет исследовать кристаллы с $\mu t > 10$ (μ , см^{-1} — линейный коэффициент поглощения рентгеновских лучей для данной длины волны λ , t , см — толщина образца). Интенсивность рассеяния от дефектов меньше интенсивности фона (белый контраст). Метод Ланга предназначен для исследования тонких кристаллов с $\mu t < 1$. Интенсивность рассеяния от дефектов больше интенсивности фона (черный контраст). По этому контрасту определяется знак напряжений в кристалле. Для определения знака вектора Бюргера краевых дислокаций осуществляют съемку топограмм от различных плоскостей кристалла.

Был также предложен метод исследования несовершенства кристаллов с помощью расходящегося рентгеновского пучка от квазиточечного источника, представляющий собой видоизмененный метод Фудживара для кристаллов с $\mu t \leq 0,5$ и постоянной геометрией съемки [13].

Однако все эти методы не дают оперативной количественной информации, требуют большой затраты времени, специальной подготовки образцов для проведения эксперимента и выявляют не структурное несовершенство кристаллов (точечные дефекты), а наличие физических дефектов кристаллической структуры (дислокации, блочность). Для ускоренного получения информации по микротопографии разработан "Комплекс визуализации рентгеновских изображений" с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-3,0, видикона и видеоусилителя с проекцией микротопограмм на телевизионный экран. Время получения информации примерно в 600 раз меньше, чем при обычных рентгенотопографических методах (рис. 3). Разработан также рентгеновский дифракционный микроскоп "Белур-20" с телевизионной регистрацией изображения. Эти установки позволяют вести непрерывный технологический контроль образцов монокристаллов в опытно и серийном производстве.

Определение разницы параметров кристаллических решеток эпитаксиальных слоев и монокристаллических подложек Δa и межплоскостных расстояний Δd проводится обычно по угловому расстоянию $\Delta\theta$ между максимумами кривых качания каждого эпитаксиального слоя и подложки, измеренному на рентгеновском двукристалльном спектрометре. Расчет производится по формулам: $\Delta d_{\{hkl\}} = -d_{\{hkl\}} \text{ctg}\theta \Delta\theta$, где $d_{\{hkl\}}$ — межплоскостные рас-

стояния в плоскостях $\{h00\}$, $\{0k0\}$ или $\{00l\}$ подложки; $\Delta a = \Delta d_{\{hkl\}} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$, где h , k , l — миллеровские индексы плоскостей. Точность измерения разницы параметров решеток $\Delta(\Delta a) = 2 \cdot 10^{-6}$ нм.

Радиус кривизны рассчитывается по формуле $R = d_{\{hkl\}} \theta' / \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ — угловое расстояние между отражениями для длин волн K_{α_1} и K_{α_2} . Для определения параметров решеток эпитаксиальных слоев гетероструктур может использоваться рентгенотопографический метод псевдокоселевских лучей, который позволяет измерять углы между кристаллографическими направлениями с точностью $(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ рад.

Реальный "неблочный" монокристалл может состоять либо из небольшого числа крупных идеальных кристалликов, параллельных друг другу в пределах нескольких секунд и имеющих линейные размеры более 0,1 мм, либо из большого числа очень мелких (10^{-4} – 10^{-5} см) кристаллических блоков, образующих мозаику (микроблочность), с разориентацией, достигающей нескольких минут. Если размер мозаичных кристаллических блоков очень

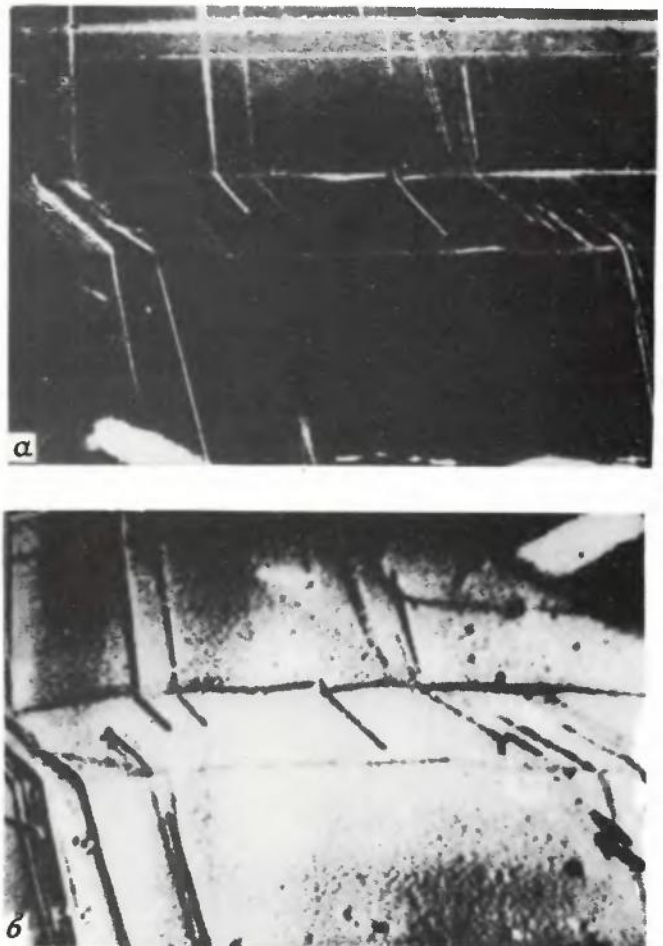


Рис. 3. Фотографии дислокаций в монокристалле кремния, полученные методом Ланга в течение 20 ч (а) и методом визуализации рентгеновского изображения за 2 мин (б)

мал (менее 10 нм), то в результате суммирования отражений от этих блоков происходит уширение дифракционных рентгеновских отражений. Каждый микроблок кристалла дает максимальную интенсивность рентгеновского отражения под своим углом $\theta_{\{hkl\}}$ и вносит свой вклад в общий дифракционный максимум. Поэтому, чем больше разориентированы микроблоки кристалла, тем больше уширение дифракционного отражения. Мозаичность кристалла обычно определяется рентгенодифрактометрическим способом по полуширине максимального дифракционного отражения как разность замеров одинаковой интегральной интенсивности $\theta_{\{hkl\}}$ и $\theta_{\{hkl\}}^{\#}$ по обе стороны от максимума интенсивности отраженного рентгеновского луча, которые равны половине величин интегральной интенсивности между фоном "белого" излучения и дифракционным максимумом.

Регистрация производится на ленте самописца либо непосредственно на шкале интенсиметра при неподвижном счетчике и движущемся образце.

Микроблочность кристаллов, образующаяся при их росте, и спиральная блочность могут оцениваться не только топографическими, но и дифрактометрическими методами путем сканирования кристалла необходимой ориентации $\{hkl\}$ рентгеновским пучком до нахождения максимального отражения по шкале интенсиметра. Сканирование обычно проводят с помощью препаратоводителя "СТ-12" от микроскопа "МБИ-1" с фиксатором для разворота на 90° . После сканирования кристалла в двух взаимно перпендикулярных направлениях каждую точку можно охарактеризовать двумя векторами, дающими в сумме направление и величину разориентации блока в данной точке (в угловых минутах).

Был предложен менее трудоемкий способ определения блочности монокристаллов на установке растрового типа для автоматического сканирования точечным рентгеновским пучком с фиксацией результатов исследования на ленте самописца с выводом цифровых результатов на печатное устройство рентгеновской стойки ССД. Направление и угловая величина разориентации монокристаллических блоков исследуемого образца определяются по величине интенсивности рентгеновских лучей в каждой точке поверхности исследуемого кристалла, записанной в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При серийном поточном производстве элементов с помощью АСУТП полученные результаты могут быть выведены на двумерный графопроектор.

Для исследования структурного совершенства монокристаллов разработан метод соотношений интегральных интенсивностей рентгеновских отражений различных порядков (СИРО), являющийся разновидностью дифрактометрического метода [15].

Известно, что примеси, входящие в кристаллы при выращивании, ухудшают совершенство их структуры, а следовательно, и оптическую однородность, стойкость к лазерным, механическим и другим воздействиям.

Выявлено два механизма нарушений структуры кристалла KH_2PO_4 , в результате наличия в решетке примесей и других дефектов [15]. В первом случае все атомы при деформации сдвигаются практически одинаково, т.е. увеличивается общая температурная постоянная кристалла $V_{\text{общ}}$, нм². Во втором случае, когда в кристалл входит катионная примесь (Cr^{+3} , Fe^{+3} , Cu^{+2}) в весовом количестве $10^{-3} - 10^{-4}\%$, происходит деформация структуры (искажение тетраэдра PO_4) за счет сдвига подрешетки из атомов кислорода (увеличивается индивидуальная температурная поправка кислорода B_j). У деформированных кристаллов может наблюдаться аномальное распределение интенсивностей рентгеновских отражений. Из формулы структурной амплитуды F для отражений $\{00l\}$ кристаллов ряда KH_2PO_4 следует [16]:

$$F_{\{00l\}} = 4f_K \cos 2\pi lz_K + 4f_P \cos 2\pi lz_P + 16f_O \cos 2\pi lz_O,$$

где f_K, f_P, f_O — соответственно атомные факторы калия, фосфора, кислорода и z_K, z_P, z_O — координаты атомов. При $z_K = 0,500, z_P = 0$ для отражений 004, 008 и 0012 получим:

$$F_{(004)} = +4f_K + 4f_P - 16f_O \cos 2\pi lz_O;$$

$$F_{(008)} = +4f_K + 4f_P + 16f_O \cos 2\pi lz_O;$$

$$F_{(0012)} = +4f_K + 4f_P - 16f_O \cos 2\pi lz_O.$$

Если учесть фактор Лоренца и поляризационный ($1/LP$), тепловой ($V_{\text{общ}}$), а также индивидуальные температурные факторы кислорода (B_j), можно вычислить интегральные интенсивности отражений. Полученные результаты показывают, что при увеличении $V_{\text{общ}}$ резко возрастают величины отражений $I_{(004)}$ и $I_{(008)}$ по сравнению с $I_{(0012)}$. С другой стороны, увеличение B_j атома кислорода приводит к уменьшению $I_{(008)} / I_{(0012)}$.

Для исследования кристаллов применяются стандартные рентгеновские дифрактометры типа ДРОН. Проводится запись интегральных интенсивностей рентгеновских отражений 004, 008 и 0012 в каждой выбранной точке кристалла. По величинам их отношений ведут контроль качества монокристаллических элементов.

При изготовлении ИЭТ, кроме структурного совершенства монокристаллов, важное значение имеет их кристаллографическая ориентация. Из десятков известных рентгенографических методов контроля ориентации монокристаллических элементов обычно применяют обратную Лауэ-съемку и дифрактометрические методы ориентации [17, 18]. Лауэ-съемку чаще используют при кристаллографической ориентации буль монокристаллов, выра-

щенных на неориентированных затравках. В настоящее время в связи с выращиванием монокристаллов нужной ориентации этот метод имеет второстепенное значение по сравнению с дифрактометрическими. Метод ускоренной ориентации, при котором монокристалл одновременно вращается вокруг ося роста и вертикальной оси рентгеновского гониометра, применяется только для предварительной кристаллографической ориентации кристаллов $A^{III}B^V$. Истинная кристаллографическая разориентация контролируемой плоскости $\{hkl\}$ монокристаллического элемента определяется с помощью рентгеновского дифрактометра по двум взаимно перпендикулярным векторам разориентации $\theta\{hkl\}$ и $\theta\{hkl\}$. Контроль иррационального среза монокристаллического элемента проводится по ближайшей к этому срезу кристаллографической плоскости с большой ретикулярной плотностью с учетом угла между этой плоскостью и иррациональным срезом.

Из всех приведенных методов рентгеновского контроля материалов ИЭТ наиболее перспективными являются метод Фудживара и его разновидности, обеспечивающие возможность определения разных видов дефектов и характеризующиеся простой аппаратурой и методики исследования, достаточной прецизионностью и большой наглядностью. Изучение линейных дефектов проводится преимущественно с помощью методов Ланга, Бормана и их разновидностей. Особенно возрос интерес к этим методам после того, как появилась возможность визуализации изображений рентгеновской топографии. Параметры гетерозпитаксиальных структур контролируются методами двукристалльной спектрометрии. Для оценки материалов более высокого структурного совершенства (кристаллов ряда KH_2PO_4), практически не имеющих дефектов линейного типа, рекомендуется использовать метод СИРО. Однако это не исключает применения и других методов контроля.

Данный обзор, отражающий многообразие существующих рентгеновских методов исследования материалов, имеет целью помочь в выборе наиболее подходящей для конкретного исследования методики контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уэбб У. Рентгеновская дифракционная топография. — В кн.: Прямые методы исследования дефектов в кристаллах. — М.: Мир, 1965, с. 7—25.
2. Уманский Я.С. Рентгенография металлов. — М.: Металлургия, 1967, с. 184—229.
3. Auleyther J. X-ray methods in the study of defects in single crystals. — Warszawa, 1967, p. 50—131, 179—237.
4. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. — М.: Мир, 1968, с. 75—90.
5. Ровинский Б.М., Лютцау В.Г., Ханонкин А.А. Рентгенографические методы исследования структурных несовершенств и дефектов решетки в кристаллических материалах. — В кн.: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. — Л.: 1971, вып. IX, с. 3—35.
6. Обзор по электронной технике: Дифракционные методы неразрушающего контроля реальной структуры эпитаксиальных и полукристаллических пленок в микроэлектронике./Г.Ф. Кузнецов, С.А. Семилетов. — М.: 1975, вып. 1. Сер. Микроэлектроника, с. 95—102.

7. Rozgonyi G.A., Miller D.C. X-ray characterization of stresses and defect in thin films and substrates. — Thin Solid Films, 1976, vol. 31, N 1/2, p. 185—216.

8. Васильев Д.М. Дифракционные методы исследования структур. — М.: Металлургия, 1977. — 247 с.

9. Кузнецов Г.Ф. Неразрушающий рентгено-топографический контроль ростовых и производственных дефектов подложек монокристаллических материалов $A^{III}B^V$. — Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация, 1978, вып. 3, с. 39—65.

10. Schwuttke G.H. Silicon material problems in semiconductor device technology. — In: Microelectronics and Reliability. — Pergamon Press, 1970, vol. 9, p. 397—412.

11. Fujiwara T. New method for talking X-ray radiograph: divergent X-ray method. Memoirs of the Defense Academy Japan, 1963, vol. 11, N 5, p. 127—145.

12. Рентгенографическое исследование структуры кристаллов корунда/Костюкова Е.П., Казуров Б.К., Лютцау В.Г., Сиденко В.И. — В кн: Рост кристаллов. — М.: Наука, 1967, т. 7, с. 147—154.

13. Кузнецов Г.Ф. Возможности метода Фудживара в изучении дефектной структуры гетерозпитаксиальных монокристаллических слоев полупроводников. — В кн: Аппаратура и методы рентгеновского анализа, 1973, вып. XII, с. 162—170.

14. Рентгенографическое исследование видов колебаний кварцевых пьезоэлементов/Казуров Б.К., Караульнич А.Е., Лютцау В.Г., Пахомов В.И., Смагин А.Г. — В кн: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. — Л., 1968, вып. III, с. 209—217.

15. Пахомов В.И., Сильницкая Г.Б., Казуров Б.К., Рез И.С. Влияние примесей на некоторые особенности реальной структуры кристаллов KH_2PO_4 . — Изв. АН СССР. Сер. Неорг. мат., 1978, т. 14, № 7, с. 1320—1323.

16. International tables for X-ray crystallography. Symmetry groups. — The International Union of Crystallography, the Kynoch Press. — Birmingham, England, 1952, vol. 1, p. 443—444.

17. Багаряцкий Ю.А., Колонцова Е.В. Определение ориентировки крупных монокристаллов. — Заводская лаборатория, 1949, вып. 9, с. 1062—1064.

18. Квитка С.С. Приемы уточнения ориентировки срезов кристаллов кварца и корунда. — В кн: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. — Л., 1971, вып. IX, с. 66—77.

Статья поступила 18 июля 1980 г.

УДК 621.315.592:548.5

А. М. Афанасьев, Б. Г. Захаров, Р. М. Имамов,
М. В. Ковальчук, Э. Ф. Лобанович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ вторичных излучений, возникающих при дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке, позволяет с высокой чувствительностью исследовать структуру тонких поверхностных слоев полупроводниковых монокристаллов.

Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом сопровождается вторичными излучениями, возникающими в процессе прямого выбивания электронов из атома и последующего отрыва внешних электронов в ходе заполнения внутренних элект-

тронных оболочек. Перестройке электронных оболочек сопутствует также излучение рентгеновских квантов (флуоресцентное излучение). Прямое взаимодействие рентгеновских лучей с электронами внешних оболочек приводит к возникновению комптоновских электронов. Ко вторичному излучению относятся и рентгеновские лучи, неупруго рассеянные на тепловых колебаниях кристаллической решетки. В некоторых случаях при облучении кри-

сталла рентгеновскими лучами появляется люминесцентное излучение. Исследование каждого из этих процессов дает свою информацию о свойствах изучаемых веществ. Например, по спектрам вылетающих из образца фото- и оже-электронов можно судить об электронной структуре, химических связях, фазовом составе и других характеристиках кристалла.

Совершенно иные и качественно новые возможности в исследовании твердых тел появляются при анализе вторичных излучений в условиях, когда падающие на кристалл рентгеновские лучи испытывают брэгговскую дифракцию. При дифракции в кристалле устанавливается единое волновое поле, пространственное распределение которого (распределение его максимумов и минимумов) существенно изменяется при малом изменении угла падения рентгеновских лучей на кристалл.

Из рис. 1 видно, что при угловых положениях 1, 2, 3 коэффициент отражения рентгеновских лучей P_R меняется слабо, в то время, как при переходе из точки 1 в 2 и из точки 2 в 3 имеет место сильное изменение распределения поля относительно атомных плоскостей.

Интенсивность всех вторичных излучений G , за исключением комптоновского и теплового диффузного рассеяния, прямо пропорциональна сечению фотоэффекта, которое определяется квадратом суммарного электрического поля на атомах:

$$G \approx |\vec{E}_0 + \vec{E}_h|^2, \quad (1)$$

где \vec{E}_0 — амплитуда падающей, а \vec{E}_h — амплитуда отраженной волн.

Следовательно, можно предположить наличие сильной угловой зависимости выхода вторичных излучений при дифракции. Кривая выхода фотоэлектронов (рис. 2) для (220)-отражения от монокристалла германия при Cu_K -излучении показывает изменение интенсивности волнового поля на атомных плоскостях. Максимум фотоэмиссионной кривой соответствует волновому полю 1, а минимум — волновому полю 3 на рис. 1, б. Фотоэмиссионная кривая значительно более информативна, чем обычная кривая отражения, поскольку она характеризует более тонкие процессы взаимодействия рентгеновских лучей с кристаллом.

Изменение взаимодействия рентгеновских лучей с атомами при дифракции было известно уже давно. Среди явлений такого типа хорошо известен эффект аномального прохождения рентгеновских лучей, или эффект Бормана [1]. Изучение особенностей вторичных излучений при дифракции рентгеновских лучей было начато в 60-х годах; к настоящему времени имеется возможность детектирования практически всех вторичных излу-

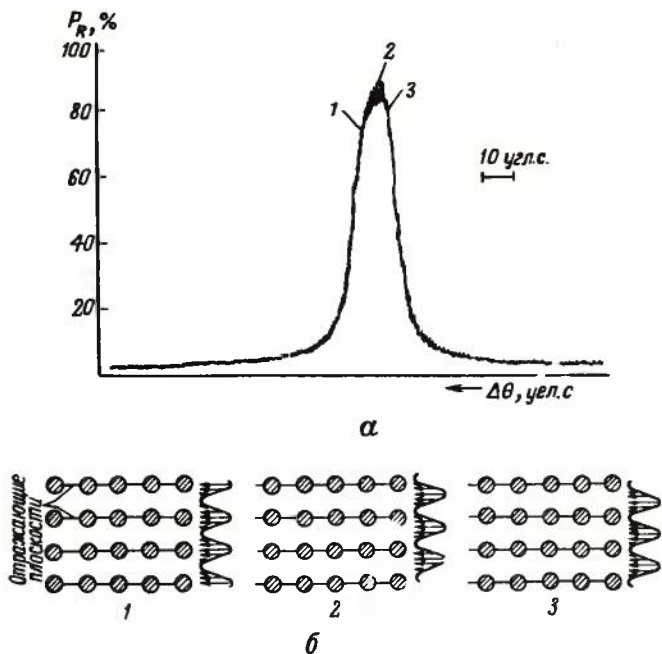


Рис. 1. Кривая дифракционного отражения рентгеновских лучей совершенным кристаллом (а) и схематичное изображение распределения волновых полей в кристалле при различных его угловых положениях (б), соответствующих точкам 1, 2 и 3 на кривой

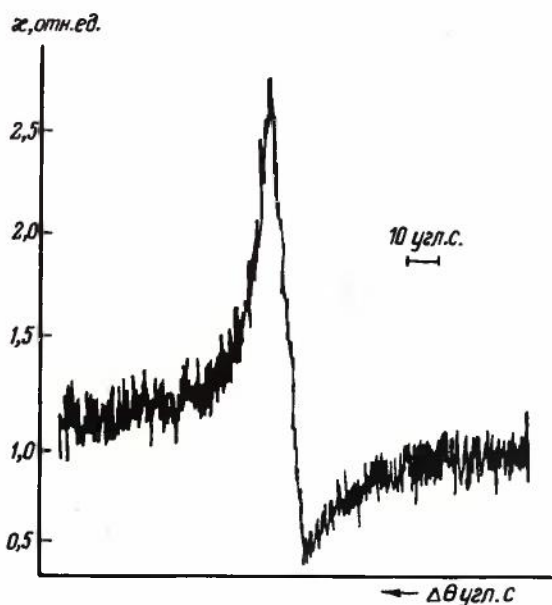


Рис. 2. Собственная кривая фотоэмиссии χ для (220)-отражения от монокристалла германия при Cu_K -излучении

ний, возникающих при дифракции: флуоресценции [2–6], внешней фотоэмиссии [7–15], комптоновского и теплового диффузного рассеяния [16,17]. В задачу исследований входило главным образом решение проблемы детектирования вторичного излучения (что в условиях дифракции представляет собой известную трудность), а также проверка динамической теории дифракции рентгеновских лучей. Дальнейшие исследования внешней фотоэмиссии показали перспективность применения этой методики для исследования структуры твердых тел, и в основном структуры тонких нарушенных слоев, что связано с малой глубиной выхода фотоэлектронов $L_{эл}$, составляющей обычно несколько десятых долей микрона. Очевидно, что кривые фотоэмиссии характеризуют совершенство кристаллической структуры прежде всего на этих толщинах, соизмеримых с размерами n -и p -областей, которые создаются на поверхности полупроводниковых кристаллов при ионной имплантации, диффузии или эпитаксиальном наращивании. Это обусловило использование вторичных процессов при дифракции рентгеновских лучей для исследования тонких кристаллических слоев.

Внешняя фотоэмиссия. Обычно при регистрации фотоэлектронов требуется, чтобы изучаемый образец и детектор были расположены в вакууме. В то же время для исследования дифракции рентгеновских лучей необходима чрезвычайно высокая точность установки кристалла с возможностью изменения его углового положения в пределах нескольких угловых секунд. Сочетание этих условий в одном эксперименте представляет собой весьма сложную задачу. Создано несколько действующих схем, в которых прецизионное гониометрическое устройство совмещается с вакуумной системой регистрации фотоэлектронов.

В одном из вариантов схемы стандартный двухкристалльный спектрометр помещен в вакуумный объем вместе с разборной рентгеновской трубкой, кристаллом-монохроматором, исследуемым кристаллом и детекторами для регистрации дифрагированного рентгеновского излучения и фотоэлектронов [8]. В другом варианте рентгеновская трубка и детектор рентгеновского излучения расположены вне вакуумного объема, в то время как рентгеновский спектрометр и детектор электронов находятся в вакууме [15, 18], в третьем – в вакуум помещен только исследуемый образец с детектором фотоэлектронов [12]. Последний вариант дает возможность использовать в качестве основы для создания прибора стандартные рентгеновские гониометры, а также легко реализовать трехкристальную схему дифракции, которая позволяет существенно повысить точность измерений (см. рис. 2).

Проведены исследования фотоэмиссии на кристаллах с нарушенными поверхностными слоя-

ми (ионнолегированными, эпитаксиальными, диффузионными, а также слоями, полученными после механической обработки).

Рассмотрим простейший случай, когда на поверхности кристалла имеется полностью аморфный слой толщиной t , равной примерно глубине выхода фотоэлектронов. Наличие этого слоя в первом приближении не влияет на дифракцию рентгеновских лучей.

При этом в кристалле (в том числе и в нарушенном слое), возникает волновое поле вполне определенной пространственной структуры. Однако, если в идеальной части кристалла интенсивность образования фотоэлектронов $G_{ид}$ в соответствии с формулой (1) пропорциональна квадрату величины суммарного поля, то в аморфной части за счет хаотического расположения атомов интенсивность появления фотоэлектронов $G_{ам}$ пропорциональна сумме квадратов полей падающей и отраженной волн:

$$G_{ам} \approx |\vec{E}_0|^2 + |\vec{E}_R|^2 = |\vec{E}_0|^2 (1 + P_R).$$

В результате выход фотоэмиссии для кристалла с таким нарушенным слоем

$$\chi(\Theta) \approx \left(\frac{L_{эл} - t}{L_{эл}} G_{ид} + \frac{t}{L_{эл}} G_{ам} \right).$$

По мере увеличения толщины слоя кривая угловой зависимости выхода фотоэмиссии (рис. 3) [9,12] изменяет свою форму от резко асимметричной, соответствующей идеальному кристаллу, до полностью повторяющей кривую отражения. В этом случае довольно просто обнаруживать аморфные слои с $t \approx 0,1 L_{эл}$, что для $\text{Cu}_K\alpha$ -излучения составляет 40 нм, а для $\text{Ti}_K\alpha$ -излучения – всего 10 нм.

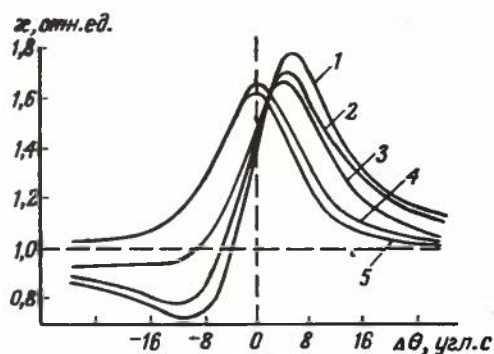


Рис. 3. Экспериментальные кривые угловой зависимости выхода фотоэлектронов для (220)-отражения при $\text{Cu}_K\alpha$ -излучении для монокристалла германия с различными толщинами аморфных слоев на поверхности, нм: 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 250; 5 – 450

Результаты использования данной методики для анализа качества поверхности кристалла после шлифовки и полировки приведены на рис. 4.

Нарушенный слой не всегда имеет аморфную структуру. При диффузии или ионной имплантации в поверхностном слое кристалла в целом сохраняется кристаллическая структура, но с несколько другими, чем в идеальном кристалле, параметрами решетки. Как показывает теоретический анализ [19],

характер угловой зависимости фотоэмиссии в этом случае определяется суммарным смещением поверхности нарушенного слоя по отношению к ее положению в идеальном кристалле (рис. 5), кривая выхода фотоэлектронов определяется формулой:

$$\chi(\Theta) = C | \vec{E}_0 + \exp \{ \frac{i2\pi u}{d} \} \vec{E}_h |^2,$$

где u — смещение поверхности, а d — межплоскост-

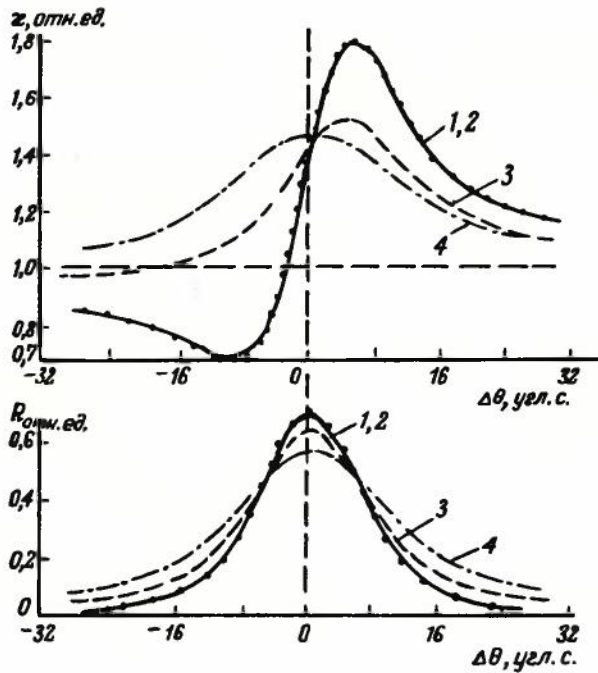


Рис. 4. Экспериментальные кривые фотоэмиссии χ (а) и отражения R (б) для монокристаллов германия, прошедших различную обработку поверхности для (220)-отражения при Cu_K -излучении: 1 — химическое травление; 2 — химико-механическая полировка; 3 — полировка алмазной пастой АСМ-1; 4 — полировка алмазной пастой АСМ-3

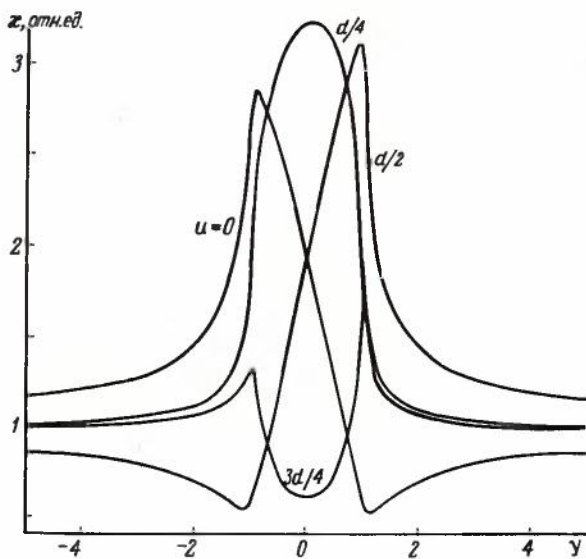


Рис. 5. Расчетные кривые угловой зависимости выхода фотоэлектронов для различных значений смещения u поверхности кристалла (γ — угловая переменная)

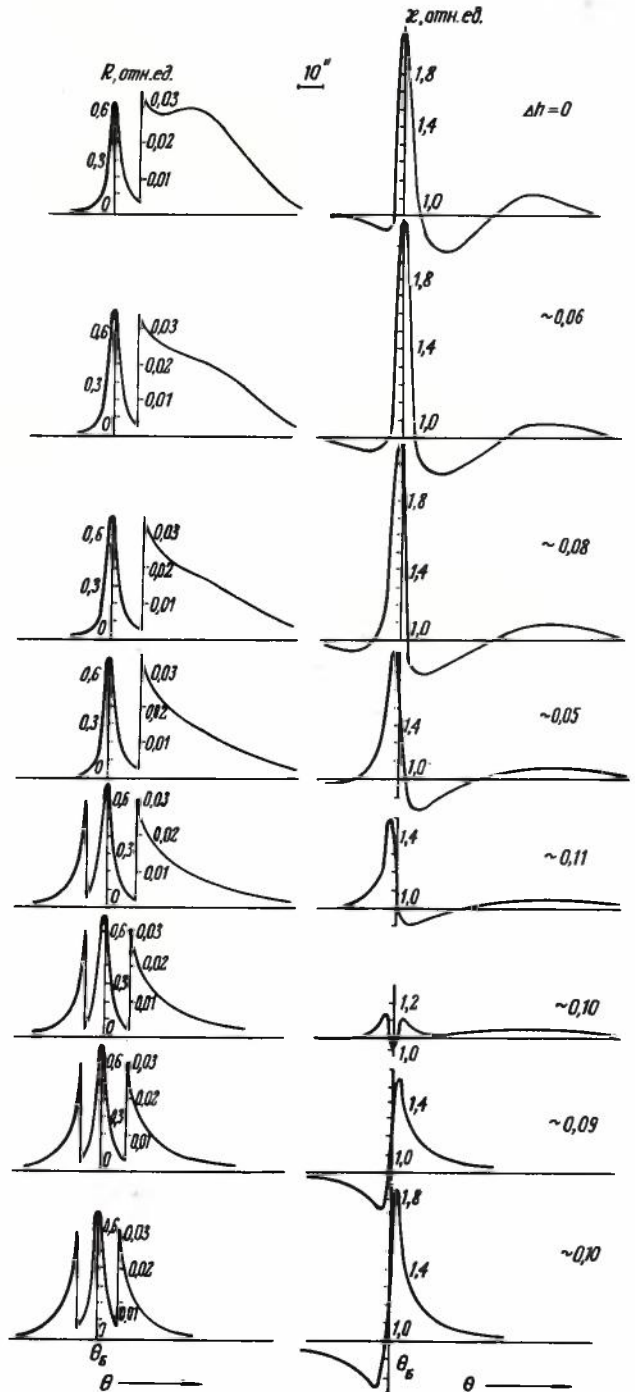


Рис. 6. Экспериментальные кривые отражения и фотоэмиссии для автоэпитаксиальной структуры GaAs с толщиной пленки 0,6 мкм при ее послойном удалении для (440)-отражения, при Cu_K -излучении; $\Delta\lambda$ — толщина стравленного слоя в микронах

ное расстояние. Как видно из этой формулы, даже очень малые смещения поверхности (примерно равные межплоскостному расстоянию) резко меняют кривые фотоэмиссии. Следовательно, для данного типа нарушенных кристаллов фотоэмиссионный метод обладает высокой чувствительностью к очень малым смещениям поверхности кристалла. Оценки показали, что этим методом могут быть измерены смещения около $0,001$ нм. На рис. 6 представлены кривые фотоэмиссии автоэпитаксиальной структуры GaAs при ее послойном удалении [11]. Как видно из рисунка, по форме кривой фотоэмиссии можно установить величину смещения поверхности. Так при $\Delta h = 0,1$ мкм кривой соответствует суммарное смещение $3d/4$, при $\Delta h \approx 0,05$ мкм — смещение $d/2$.

Кривые фотоэмиссии более информативны по сравнению с кривыми отражения (рис. 7) [11], так как имеют ярко выраженный интерференционный характер, в то время как на кривых отражения большая толщина эпитаксиальной пленки сказывается лишь в появлении дополнительного пика. Получение и той и другой информации (по кривым отражения и фотоэмиссии) дает более детальное представление о структуре нарушенных слоев. Полное описание структурных изменений в слое может быть сделано с помощью двух функций, одна из которых $u(z)$ характеризует смещение атомных плоскостей от их положения в идеальной решетке, а другая $e^{-w(z)}$ — так называемый статический фактор, определяющий степень разупорядочения атомов в атомных плоскостях, или степень аморфизации слоя.

Рассеивающие свойства слоя описываются с помощью введенных характеристик выражением, которое является в общем случае комплексной функцией, имеющей действительную и мнимую части

$$R(\Theta) = |R(\Theta)| e^{i\varphi(\Theta)}$$

где R — интенсивность отражения.

Очевидно, что для определения амплитуды рассеяния

необходимо иметь данные двух независимых экспериментов, чем и являются кривые фотоэмиссии и рентгеновского отражения. По кривым отражения определяется квадрат модуля амплитуды $|R(\Theta)|^2$, а по кривым фотоэмиссии — ее фаза $\varphi(\Theta)$. Решение этой задачи требует постановки эксперимента для случая, когда глубина выхода фотоэлектронов предельно мала (значительно меньше толщины нарушенного слоя) [19].

Глубину выхода электронов можно менять двумя путями. Первый путь состоит в использовании длинноволнового рентгеновского излучения, а второй — в регистрации электронов различных энергетических групп. Разделение электронов по энергиям осуществляется с помощью 127° анали-

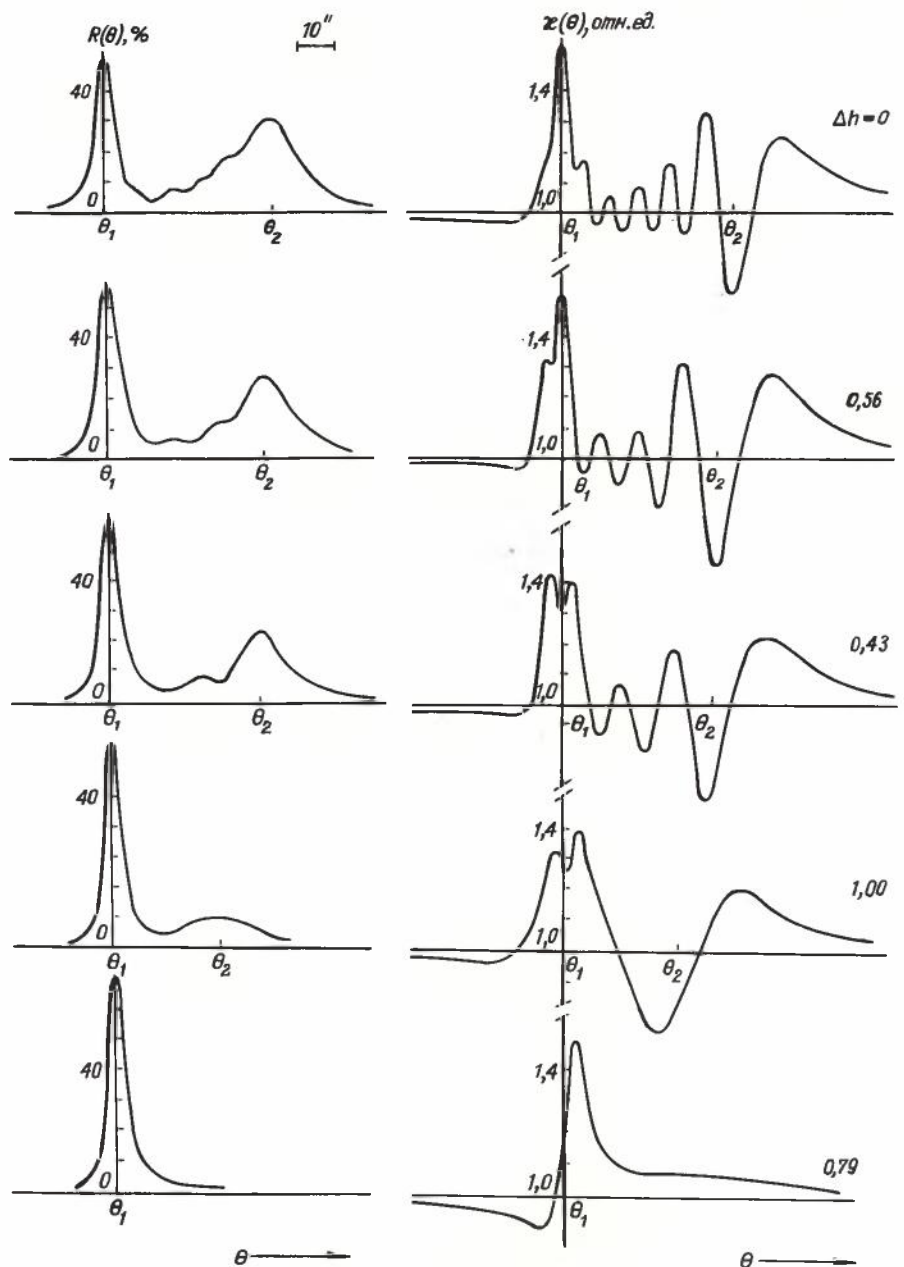


Рис. 7. Экспериментальные кривые отражения и фотоэмиссии для автоэпитаксиальной структуры Ge с толщиной пленки $3,1$ мкм при послойном ее удалении для (440) — отражения при Cu K_α -излучении; Δh — толщина стравленного слоя в микронах

затора, помещенного в вакуумный объем схемы для измерения фотоэмиссии [15, 18].

Наряду с методами, в которых используются вакуумные схемы, разработан принципиально новый метод регистрации фотоэлектронов [20], основанный на использовании газового пропорционального счетчика (рис. 8), внутри которого устанавливается исследуемый кристалл. Отсутствие вакуумной системы существенно упрощает эксперимент. Метод позволяет использовать стандартные рентгеновские спектрометры, характеризуется большой эффективностью счета и простотой замены образцов, а также возможностью регистрации электронов различных энергетических групп.

Флуоресцентное излучение является одним из первых в ряду вторичных излучений, экспериментально измеренных при дифракции рентгеновских лучей [2]. Измерения проводились на монокристаллах германия с использованием MoK_{α} -излучения. Выбор кристалла и вида излучения обусловлен тем, что возникающее в германии GaK_{α} -излучение слабо поглощается самим кристаллом и обеспечивает высокую интенсивность флуоресценции. Однако большая глубина выхода флуоресцентного излучения по сравнению с фотоэмиссией значительно уменьшает информативность кривой флуоресценции.

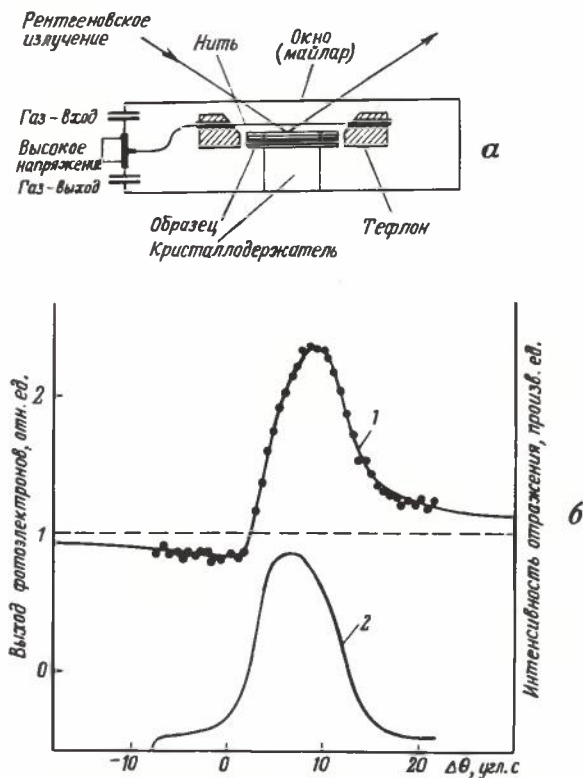


Рис. 8. Схема пропорционального проточного счетчика для регистрации фотоэмиссии при дифракции (а); кривые фотоэмиссии (1) и (220)-отражения (2) при SiK_{α} -излучении (б)

Предположим, что глубина выхода излучения намного превосходит длину экстинкции $L_{\text{экс}}$, тогда каждый возникающий квант флуоресцентного излучения, независимо от глубины, на которой он появился, регистрируется детектором. Число поглощенных рентгеновских квантов $N_{\text{п}}$ пропорционально разнице между интенсивностями падающего и отраженного лучей, т.е.

$$N_{\text{п}} \sim 1 - P_R.$$

В этом случае угловая зависимость выхода флуоресценции представляет собой перевернутую кривую отражения. Конечность глубины выхода приводит к появлению на "хвостах" кривой слабой асимметрии (рис. 9). Поэтому пространственное распределение волнового поля в кристалле слабо проявляется из-за большой глубины выхода излучения. Глубину выхода можно уменьшить, регистрируя излучение, выходящее под малым углом к поверхности образца.

Другой путь выявления пространственной структуры волнового поля заключается в измерении флуоресцентного излучения от примесных атомов, локализованных вблизи поверхности кристалла. В этом случае эффективной глубиной выхода флуоресценции $L_{\text{фл}}$ является глубина залегания примеси. При $L_{\text{фл}} \ll L_{\text{экс}}$ кривая выхода флуоресценции полностью аналогична кривой выхода фотоэмиссии [3]. В связи с этим возникают значительные трудности в процессе эксперимента. Малая глубина залегания примеси предполагает ее малое суммарное количество, и поэтому появляется необходимость выделения слабого флуоресцентного излучения от примеси на фоне интенсивного излучения (комптоновского, теплового диффузного и флуоресцентного) от кристалла. Это требует использования детекторов с высокой разрешающей способностью (например, Si-Li твердотельного

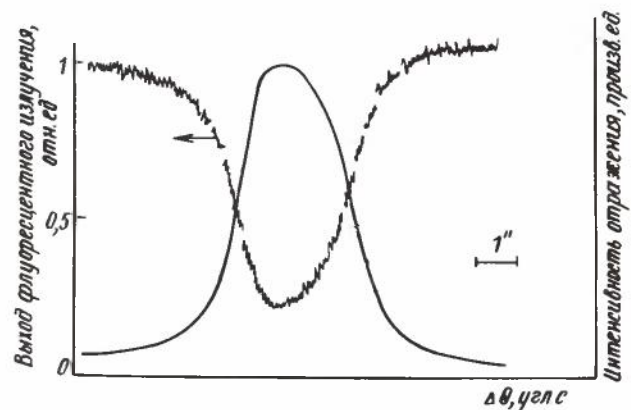


Рис. 9. Экспериментальные кривые флуоресценции и (220)-отражения от кристалла германия при MoK_{α} -излучении

детектора) и, что более существенно, большого времени измерения (десятки часов).

Еще один способ усиления когерентных дифракционных явлений заключается в таком подборе энергий падающего и регистрируемого вторичного излучений, чтобы измеряемое флуоресцентное излучение сильно поглощалось в кристалле, т.е. имело малую глубину выхода. На рис. 10 приведена кривая флуоресцентного Si_K^{α} -излучения от кристалла крем-

ния, измеренная при дифракции Mo_K^{α} -излучения и имеющая ярко выраженную асимметричную форму. Глубина выхода Si_K^{α} -излучения в кремнии имеет

довольно малую величину (≈ 12 мкм), которая оказывается много больше длины экстинкции. Однако здесь сказывается то обстоятельство, что нормальный коэффициент поглощения Mo_K^{α} -излучения в

кремнии очень мал, так что вне области полного отражения кривые флуоресценции и фотоэмиссии аналогичны, а внутри области кривая флуоресценции повторяет обращенную кривую отражения рентгеновских лучей.

При исследовании угловой зависимости P_K^{α} -флуоресцентного излучения кристалла GaP [4] регистрируемое излучение имело очень малую глубину выхода, поэтому существовала возможность проследить за распределением волнового поля внутри кристалла и выявить неэквивалентность P- и Ga-сторон кристалла. Следовательно, для выявления структуры волнового поля в кристалле с помощью флуоресценции необходим подбор специальных условий. Но даже наличие слабой асимметрии на кривой выхода флуоресцентного излучения позволяет решить ряд практических задач. Например, при измерении угловой зависимости выхода флуоресценции от примесных атомов мышьяка, введенных в монокристалл кремния, наблюдаемая асимметрия кривых (220)- и (111)-отражений может однозначно указывать на то, что атомы мышьяка замещают атомы кремния.

Возможности описываемого метода были продемонстрированы при измерении угловой зависимости выхода флуоресцентного излучения от атомов мышьяка, которые внедряли в монокристалл кремния на малую глубину (≈ 40 нм) [6]. В подготовленные таким образом кристаллы имплантировали ионы азота с энергией 60 кэВ. Внедренные ионы вызывали смещение поверхностного слоя кристалла, содержащего атомы мышьяка. Полученные при этом кривые флуоресценции для различной величины смещения аналогичны кривым фотоэмиссии. Смещение поверхности кристалла на доли межатомного расстояния в этих кривых проявляется так же резко, как в случае фотоэмиссии. Проведенные оценки точности определения смещения дают величину $\approx 0,002$ нм.

Таким образом, флуоресцентное излучение может быть использовано для исследования структуры имплантированных слоев, у которых флуоресцирующие атомы расположены в тонком поверхностном слое, но эти измерения требуют значительно большего времени по сравнению с фотоэмиссией.

Внутренний фотоэффект. Подобно оптическим лучам, рентгеновские кванты, поглощаясь кристаллом, вызывают генерацию неравновесных носителей заряда. В последующем процессе диффузии происходит пространственное разделение носителей противоположного знака, что в стационарных условиях приводит к появлению разности потенциалов на образце.

Электрическое поле $n-p$ перехода на поверхности кристалла усиливает наведенную рентгеновским излучением ЭДС.

Так как количество генерируемых носителей заряда пропорционально сечению фотоэффекта, то при измерении угловой зависимости ЭДС вблизи брэгговских узлов можно ожидать, что эта зависимость будет, как и в предыдущих случаях, определяться спецификой пространственного распределения волнового поля в кристалле при дифракции рентгеновских лучей.

При внешнем фотоэффекте и флуоресцентном излучении одним из параметров, определяющих конкретное проявление динамических эффектов, является глубина выхода излучения из кристалла. При внутреннем фотоэффекте таким параметром является длина диффузии носителей заряда [21–23]. На рис. 11 приведены кривая дифракционного отражения и угловые зависимости ЭДС для трех монокристаллов кремния с различным удельным сопротивлением, в поверхностные слои которых на глубину около 1,5 мкм методом диффузии введены ионы фосфора с поверхностной концентрацией 10^{21} см $^{-2}$. Как видно из рисунка, несмотря на малую интенсивность падающих рентгеновских лучей (которая сильно ограничивается их предварительной коллимацией), наводимая ЭДС вполне доступна измерению и составляет сотни микровольт. Наблюдается ярко выраженная асимметрия кривых фото-ЭДС,

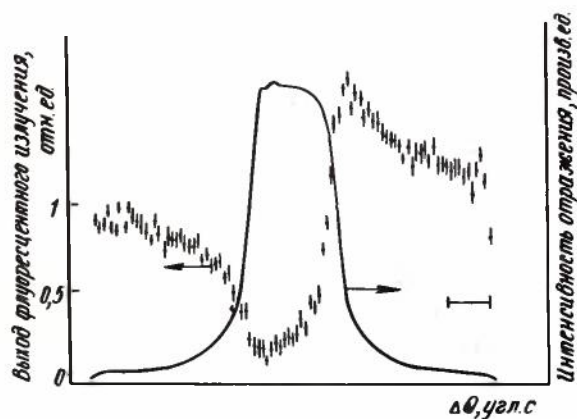


Рис. 10. Экспериментальные кривые флуоресценции и (220)-отражения от кристалла кремния при Mo_K^{α} -излучении

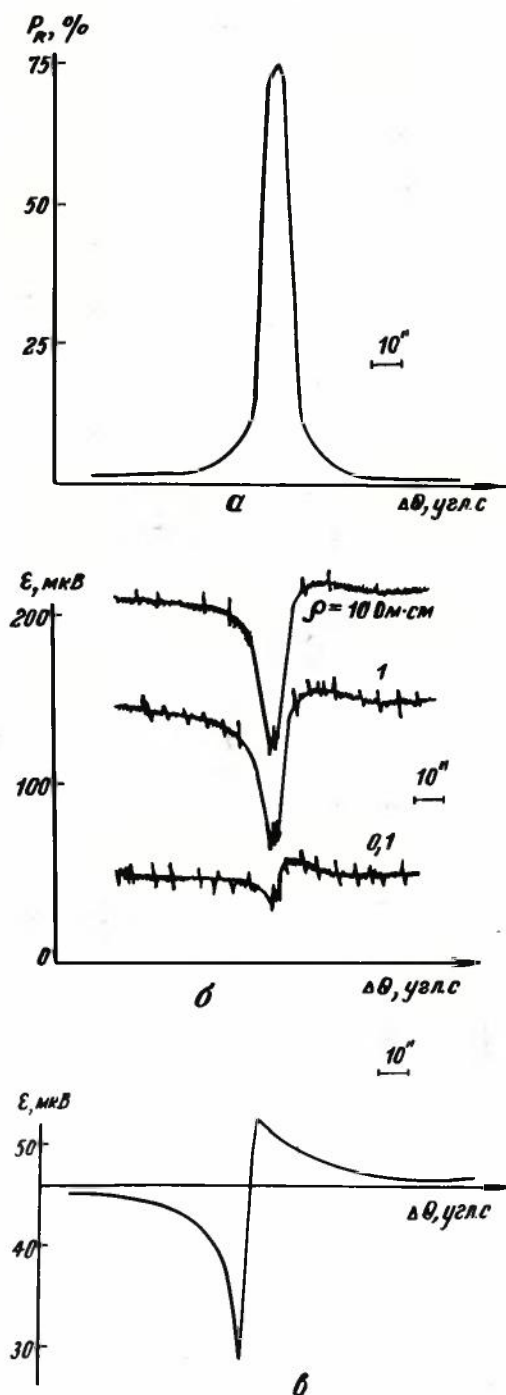


Рис. 11. Кривые дифракционного (111)-отражения (а) и фото-ЗДС, соответствующие образцам с различным удельным сопротивлением (б), и кривая фото-ЗДС ($\rho = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) в увеличенном масштабе (в)

величина ϵ (\ominus) вдали от углов Брэгга сильно меняется при переходе от одного образца к другому, что полностью коррелирует с уменьшением длины диффузии носителей по мере уменьшения сопротивления образцов. Кривая отражения при этом практически одинакова для всех трех образцов.

Рассмотренные методы, основанные на измерении вторичных процессов, могут быть реализованы на базе стандартных рентгеновских спектро-

метров, что позволит их использовать для изучения структуры поверхности слоев монокристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинскер З.Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. — М.: Наука, 1974. — 368 с.
2. Batterman B.W. An effect dynamical diffraction in fluorescent X-ray scattering. — Appl. Phys. Let., 1962, vol. 1, p. 68–69.
3. Golovchenko J.A., Batterman B.W., Brown W.L. Observation of internal X-ray wave fields during Bragg diffraction with an application to impurity lattice location. — Phys. Rev. B, 1974, vol. 10, p. 4239–4243.
4. Trucano P. Use of dynamical diffraction effects on X-ray fluorescence to determine the polarity of GaP single crystals. — Phys. Rev. B, 1976, vol. 13, p. 2524–2531.
5. Batterman B.W. Detection of foreign atom sites by their X-ray fluorescence scattering. — Phys. Rev. Let., 1969, vol. 22, p. 703–705.
6. Andersen S. Kjaer, Golovchenko J.A., Maier G. New application of X-ray standing-wave fields to solid state physics. — Phys. Rev. Let., 1976, vol. 37, p. 1141–1145.
7. Ефимов О.Н., Шемелев В.Н., Круглов М.В. Исследование монокристаллов с помощью внешнего фотоэффекта в условиях брэгговской дифракции. — В кн.: Ученые записки Ленинградского государственного университета. — Л., 1974, № 370, с. 83–90.
8. Шемелев В.Н., Круглов М.В. Внешний фотоэффект из совершенных монокристаллов германия в условиях брэгговского (111) — отражения рентгеновских лучей. — ФТТ, 1972, т. 14, с. 3556–3562.
9. Фотоэмиссия при брэгговской дифракции рентгеновских лучей в кристалле с аморфной пленкой / М.В. Круглов, Е.А. Созонтов, В.Н. Шемелев, Б.Г. Захаров. — Кристаллография, 1977, т. 22, с. 693–697.
10. Применение метода внешнего фотоэффекта в условиях брэгговского отражения для исследования структуры германия при механической обработке / М.В. Круглов, В.Н. Шемелев, Б.Г. Захаров, Е.А. Созонтов. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1975, вып. 10, с. 124–130.
11. Созонтов Е.А., Круглов М.В., Захаров Б.Г. Определение деформаций в эпитаксиальных структурах методом внешнего фотоэффекта. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1979, вып. 7, с. 108–113.
12. Photoemission as a method for investigation the structure of surface layers / A.M. Afanasev, V.E. Baturin, R.M. Imamov e.a. — In: Proc. 7-th Intern. Vac. Congr. and 3-rd Intern. Conf. Solid Surfaces. Vienna, 1977, p. 2209–2212.
13. Афанасьев А.М., Ковальчук М.В., Ковьев в Э.К. Рентгеновская дифрактометрия вторичного излучения и кристаллическая структура тонких слоев. — В кн.: Материалы XI Всесоюзного совещания по применению рентгеновских лучей для исследования материалов. — М.: Наука, 1976, с. 80–81.
14. Теоретическое и экспериментальное исследование диффузионных и имплантированных слоев монокристаллов с помощью совокупного анализа рентгеновских и фотоэмиссионных кривых / А.М. Афанасьев, В.Е. Батури, Р.М. Имамов и др. — В кн.: Материалы XII Всесоюзного совещания по применению рентгеновских лучей для исследования материалов. — М.: ВИНТИ, 1979, с. III-02.
15. Kikuta S.K., Takahashi T. and Tuzi Y. Variation of the yield of electrons emission from a silicon single crystal with the diffraction condition of exiting X-rays. — Phys. Let., 1975, vol. 50A, p. 453–454.
16. Annaka S. Direction dependance of the intensity anomaly of the X-ray thermal scattering accompanying the Bragg case reflection. — J. Phys. Soc. of Japan, 1968, vol.24, p. 1332–1337.
17. Annaka S., Kikuta S., Kohra K. Intensity anomaly of thermal and Compton scattering of X-ray accompanying the Bragg reflection. — J. Phys. Soc. Japan, 1965, vol.20, p.2093.
18. Double-crystal, vacuum X-ray diffractometer / S. Kikuta, T. Takahashi, Y. Tuzi, R. Tukudome. — Rev. Sci. Instrum., 1977, vol. 48, p. 1576–1580.
19. Афанасьев А.М., Кон В.Т. Внешний фотоэффект при дифракции рентгеновских лучей в кристаллах с

нарушенным поверхностным слоем. — ЖТФ, 1978, т. 74, с. 300–313.

20. A new method of measuring electron emission from monocystals under X-ray diffraction condition/ N. Hertel, M. V. Kovalchuk, A. M. Afanasev, R. M. Imamov. — Phys. Let., 1980, vol. 75A, p. 501–502.

21. Фокин А.С. Угловая зависимость величины электрического напряжения при дифракции рентгеновского излучения кремниевым *p-n* переходом. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1977, вып. 8, с. 59–61.

22. Фокин А.С. Рентгеновский спектрометр для исследования внутреннего фотоэффекта в *p-n* переходах. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1978, вып. 8, с. 30–36.

23. Афанасьев А.М., Ковьев Э.К., Фокин А.С. Дифракция рентгеновских лучей и электрофизические свойства кристаллов. — Письма в ЖТФ, 1978, т. 28, с. 348–351.

Статья поступила 23 апреля 1980 г.

УДК 621.5 385.032.21

В. Н. Барышев, В. А. Батырев, М. В. Кудояров,
В. П. Марин, Ю. В. Меньшинин

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛО- КЕРАМИЧЕСКОГО КАТОДА НА ОСНОВЕ $W - Y_2O_3 - Al_2O_3$

Комплексное исследование структуры металлокерамического катода с применением оже-электронной спектроскопии и рентгеновского микроанализа позволяет изучить химическое взаимодействие компонентов катодного материала.

Металлокерамическая система на основе вольфрама, содержащая в качестве основного эмиссионного компонента окись иттрия с активирующей присадкой окиси алюминия, является перспективным катодным материалом, широко применяемым в электровакуумном производстве.

Основным фактором, ограничивающим работоспособность катода, является выработка эмиссионной составляющей с эмиттирующей поверхности на глубину до 30–100 мкм.

Для создания эффективных катодов с заданными характеристиками исследовалось распределение компонентов на поверхности и по глубине образцов кермет-катада $W - Y_2O_3 - Al_2O_3$.

Поверхностный анализ образцов проводился в сверхвысоковакуумной камере с оже-спектроскопическим цилиндрическим анализатором [1]. Спектры оже-электронов регистрировались в энергетическом диапазоне от 0 до 2000 эВ и снимались непосредственно с эмиттирующей поверхности и в приповерхностной зоне при послойном травлении, которое проводилось пучком ионов аргона с ускоряющим напряжением 2 кэВ в течение 20–50 мин на глубину до 0,05–0,1 мкм.

Характер распределения основных элементов (иттрия и алюминия) на большей глубине исследо-

вался с помощью рентгеновского микроанализатора [2]. Проводился также расчет усредненных значений содержания Y_2O_3 и Al_2O_3 на рабочей поверхности [3]. Интенсивность рентгеновского излучения Y и Al в отработавших образцах, возбужденная линейным источником, сравнивалась с аналогичной интенсивностью исходных образцов, а затем рассчитывалось содержание окислов иттрия и алюминия на основании пропорциональности концентраций элементов и интенсивности испускаемого излучения.

Образцы катодного материала $W - Y_2O_3 - Al_2O_3$ были получены методом порошковой металлургии, при этом смесь порошков подвергалась холодному прессованию и спеканию в атмосфере водорода. Полученный материал состоял из зерен окиси иттрия и алюмоитриевого соединения, равномерно распределенных в вольфрамовой матрице. Рентгеновский микроанализ (рис. 1) показал, что соединение содержит 70–75% Y_2O_3 и 20–25% Al_2O_3 . Это соответствует фазе $2Y_2O_3 \cdot Al_2O_3$ согласно диаграмме состояния $Y_2O_3 - Al_2O_3$ [4], т. е. в металлокерамическом материале перед его эксплуатации вся окись алюминия взаимодействует с окисью иттрия, и в первую очередь с ее мелкими зернами.

Состав приповерхностной области исходного материала кермет-катада существенно отличается от объемного состава.

Во-первых, при определении усредненной поверхностной концентрации методом рентгеновского микроанализа на глубину 1–3 мкм наблюдалось повышение содержания Y_2O_3 и уменьшение Al_2O_3 . Во-вторых, при профилном оже-ана-

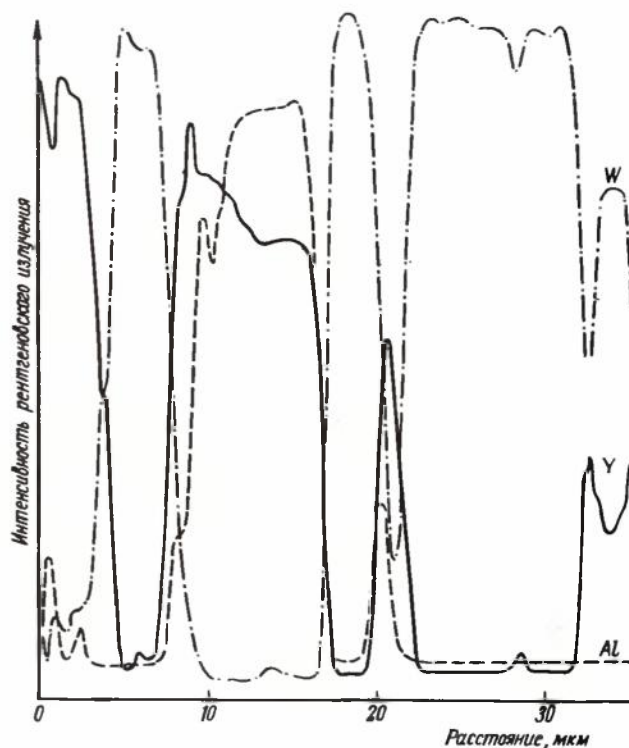


Рис. 1. Распределение W, Y, Al в объеме кермет-катада после технологической обработки

лизе не было обнаружено пика оже-электронов алюминия, что свидетельствует об отсутствии атомов Al в приповерхностной зоне на глубине $\approx 0,1$ мкм. Стратегически равномерное распределение остальных элементов металлокерамики (W, Y, O) по глубине (рис. 2) доказывает постоянство химического состава. В-третьих, увеличение соотношения амплитуд пиков оже-электронов Y и O, а также Y и W в поверхностном эмиттирующем слое толщиной около 2 нм по сравнению с

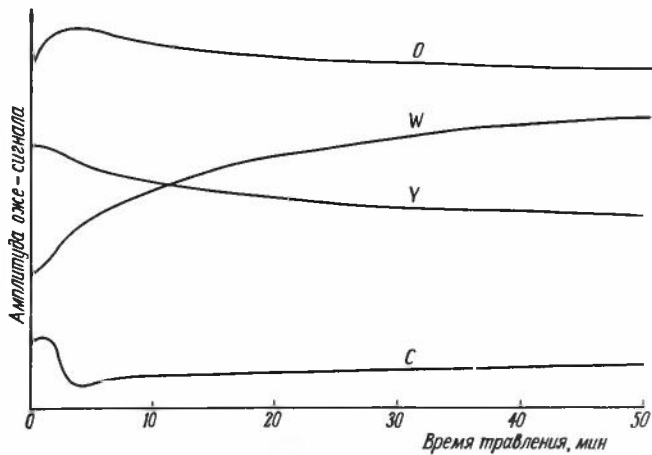


Рис. 2. Распределение элементов в приповерхностной зоне катодной системы W-Y₂O₃-Al₂O₃, прошедшей технологическую обработку

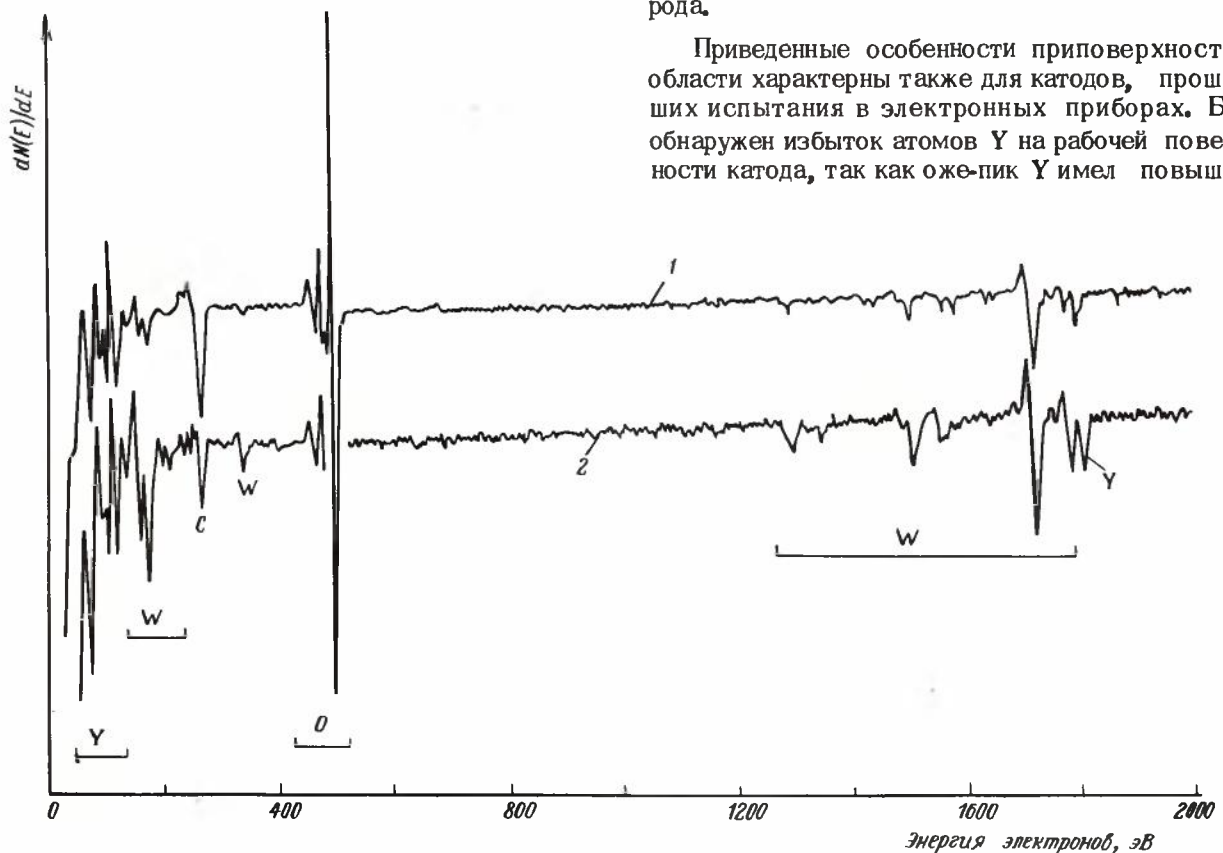


Рис. 3. Оже-спектры катодной системы W-Y₂O₃-Al₂O₃, прошедшей технологическую обработку до (1) и после (2) ионного травления

приповерхностной зоной говорит об обогащении этого слоя атомами иттрия.

Кроме того, с помощью оже-спектроскопии был выявлен оже-пик углерода (рис. 3). Углерод, являясь единственной сопутствующей примесью изучаемого металлокерамического материала, обычно присутствовал на рабочей поверхности образцов в адсорбированном состоянии. Под действием травления ионным пучком амплитуда оже-пика углерода убывала и оставалась затем постоянной в приповерхностной области (см. рис. 2). Изменялась и форма оже-пика углерода (рис. 4), что возможно связано с образованием карбида вольфрама [5]. При локальном оже-анализе наблюдалось одновременное изменение величин оже-пиков вольфрама и углерода. Это свидетельствует о том, что углерод равномерно распределен по всей глубине исследуемых образцов в виде карбидов вольфрама, исключая атомы углерода, адсорбированные на поверхности и легко удаляемые в процессе активирования. Очевидно, что одним из источников объемных загрязнений является их первоначальное присутствие в вольфрамовой основе катодного материала, хотя не исключено наличие следов пластификатора (углеродосодержащего парафина), оставшегося в результате неполного выгорания после спекания металлокерамической массы [6].

Предполагается, что одной из причин улучшения эмиссионных характеристик металлокерамических систем по мере увеличения в их составе окиси иттрия является снижение количества углерода.

Приведенные особенности приповерхностной области характерны также для катодов, прошедших испытания в электронных приборах. Был обнаружен избыток атомов Y на рабочей поверхности катода, так как оже-пик Y имел повышен-

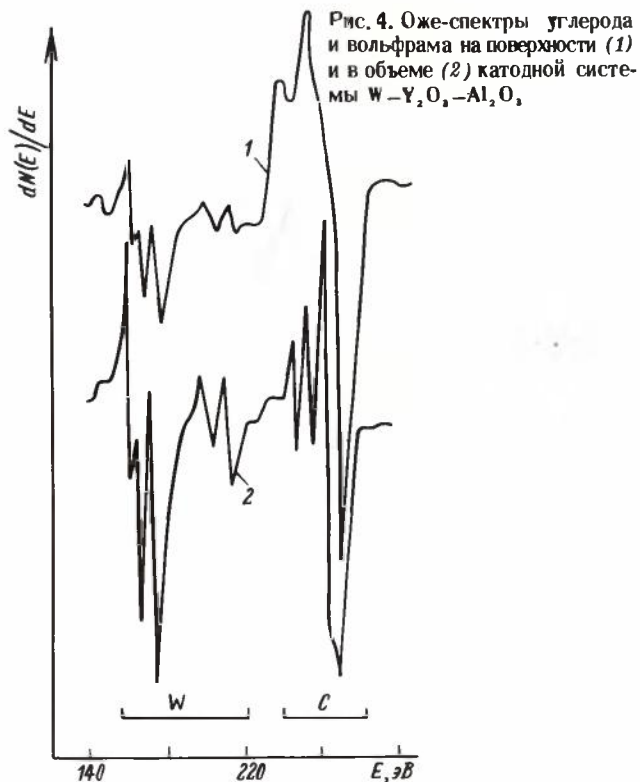


Рис. 4. Оже-спектры углерода и вольфрама на поверхности (1) и в объеме (2) катодной системы $W-Y_2O_3-Al_2O_3$.

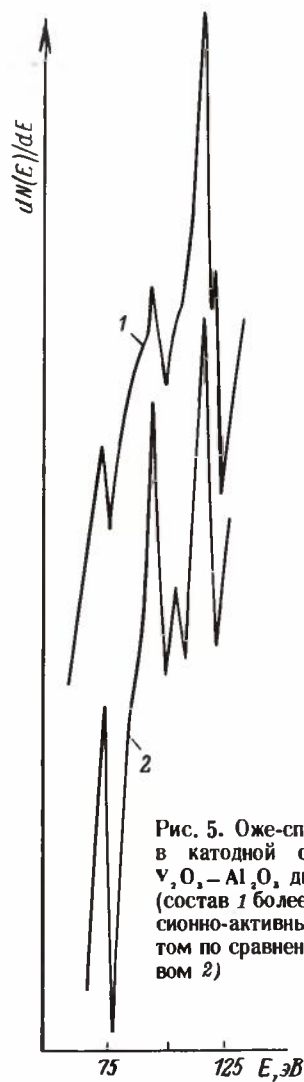


Рис. 5. Оже-спектры иттрия в катодной системе $W-Y_2O_3-Al_2O_3$ двух составов (состав 1 более богат эмиссионно-активным компонентом по сравнению с составом 2)

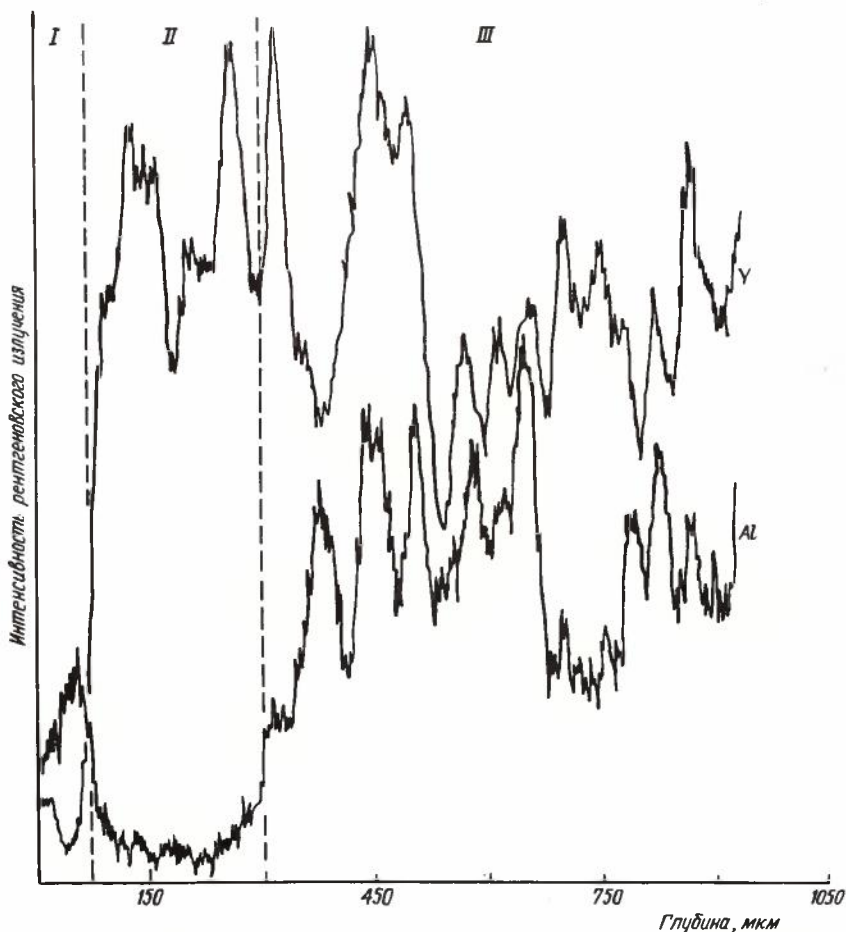


Рис. 6. Распределение Y и Al по торцевой поверхности рабочего образца катодной системы $W-Y_2O_3-Al_2O_3$.

ную интенсивность по отношению к пикам W и O по сравнению с объемным составом материала и по характеру был сходен с оже-пиком металлического иттрия [7]. При увеличении количества эмиссионно-активного компонента в приповерхностной зоне металлокерамического катода эти особенности более ярко выражены (рис. 5). Избыток адсорбированных на поверхности атомов Y в свободном состоянии связан, по-видимому, с процессом спекания в атмосфере водорода, когда часть атомов иттрия восстанавливается из его окиси. Характерно, что избыток свободных атомов металла (Y) обуславливает повышение эмиссионной способности катода на основе окислов редкоземельных элементов (РЗЭ) [8].

Послойный оже-анализ (на глубину до 0,1 мкм) не обнаружил атомов алюминия. Рентгеновское излучение Al было выявлено при проведении поверхностного рентгеноспектрального микроанализа, который показал, что атомы алюминия локализируются в приповерхностной прослойке на глубине 0,1–3 мкм. Так, если предположить, что алюминий находится в материале в виде окиси, то его концентрация в локализованной прослойке составляет примерно 0,15 ($\pm 0,10$) % и остается постоянной при эксплуатации катода до 2000 ч. Таким образом, атомы алюминия не принимают непосредственного участия в процессе эмиссии и основным поставщиком электронов следует считать окись

иттрия. Рабочая поверхность исследуемого трехкомпонентного металлокерамического материала, определяющая эмиссионные характеристики, представляет собой катодную систему $W-Y_2O_3$, покрытую островковой пленкой адсорбированных атомов.

Профильный оже-анализ приповерхностных слоев показал стабильность содержания иттрия и кислорода, что коррелирует с результатами поверхностного рентгеноспектрального микроанализа. Наиболее существенные изменения распределения компонентов, влияющих на работоспособность кермет-катода, наблюдались в слоях, залегающих глубже 3–5 мкм. По мере увеличения наработки происходило постепенное снижение концентрации Y_2O_3 в зоне, непосредственно примыкающей к приповерхностной области, причем толщина этой зоны возрастала, достигая более 25–35 мкм (рис. 6). Однако вследствие постоянной диффузии эмиссионноактивного вещества из более глубоких слоев к эмиттирующей поверхности сохранялась высокая эффективность катодной системы с активированной добавкой Al_2O_3 в течение длительного периода испытания.

Распределение Al_2O_3 по торцевой поверхности отработавших образцов изменяется со временем и имеет более сложный характер по сравнению с Y_2O_3 (см. рис. 6.). На определенной глубине наблюдалась зона, где интенсивность рентгеновского излучения Al была на уровне фона, т.е. атомы этого элемента практически отсутствовали. Толщина зоны выработки возрастала пропорционально продолжительности работы катода, достигая 250–350 мкм при 1000 ч наработки, в дальнейшем выработка Al_2O_3 практически прекращалась. После эксплуатации в течение 700–1000 ч на границе приповерхностной области и зоны выработки образовывалась прослойка, обогащенная атомами Al ; при этом поверхностная концентрация Y_2O_3 снижалась. По-видимому, в этот период возникают условия для создания диффузионного барьера, препятствующего поступлению эмиссионно-активного вещества.

Таким образом, во время испытания металлокерамического катода распределение основных компонентов катодной системы вольфрама, оксидов иттрия и алюминия, алюмоитриевого соединения, а также атомов Y и Al носит ярко выраженный



Рис. 7. Схема зонального распределения основных компонентов металлокерамических катодов в процессе работы

зональный характер (рис. 7). Однако в течение всей работы катода поверхностная концентрация активного вещества сохраняется относительно стабильной, что свидетельствует о больших ресурсных запасах катодной системы $W-Y_2O_3-Al_2O_3$.

По-видимому, окись алюминия ответственна за возникновение "нитей проводимости" молекулярных размеров [9], исходящих из промежуточной зоны, которая залегает на определенной глубине от эмиттирующей поверхности. При наличии тесного контакта между зёрнами W и Al_2O_3 в процессе нагрева, как следует из работы [10], может происходить образование термодинамически устойчивого соединения типа $AlWO_4$, которое легко испаряется при температуре свыше $1000^\circ C$ из металлокерамических катодов, состоящих из смеси W + окислы РЗЭ + Al_2O_3 . Преимущественное испарение вольфрамата $AlWO_4$ вдоль границ зёрен создает дополнительные каналы к рабочей поверхности, обуславливающие подпитку окисью иттрия из объема, что существенно увеличивает стабильность эмиссионных свойств металлокерамических катодов и долговечность приборов. Результаты проведенных исследований показали, что комплексное изучение структуры металлокерамического катода с применением оже-электронной спектроскопии и рентгеноспектрального микроанализа способствует созданию эффективных катодов с заданными эмиссионными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шулман А. Р., Фридрихов С. А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. — М.: Наука, 1977 — 551 с.
2. Электронно-зондовый микроанализ: Сборник. — М.: Мир, 1974. — 260 с.
3. Батырев В. А., Резникова Н. З. — Исследование зонального распределения элементов в материалах микрозондовым методом. — Заводская лаборатория, 1975, № 4, с. 433–435.
4. Диаграммы состояния силикатных систем, Справочник/Н.А.Торопов, В.П. Барзаковский, В.В.Лапин, Н.Н.Курцева. — Л.: Наука, 1969, т. 1, с. 228–232.
5. Протопопов О. Д. Методы электронной спектроскопии. — Обзоры по электронной технике, 1977, вып. 16, — 47 с.
6. Применение электронной оже-спектроскопии в исследованиях состояния поверхности металлокерамических катодов./ В.Н.Барышев, С.С.Еловиков, В.П.Марин, Ю.В.Меньшин. — Электронная промышленность, 1979, вып. 6, с. 55–58.
7. Davis L. E., MacDonald N. C., Palmberg P. W. et al. Handbook of Auger Electron Spectroscopy. — Physical Electronics Industries, Inc., 2nd ed En Edina, 1976. — 251 p.
8. Кульварская Б. С. Анализ влияния некоторых факторов на термоэмиссию катодов из оксидов редкоземельных элементов (на примере окиси иттрия). — ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 7, с. 1501–1504.
9. Dearaley G. A theory of the oxide-coated cathode. — Thin Solid Film, 1969, vol. 3, N 3, p. 161–174.
10. Исследование термодинамической устойчивости $AlWO_4$ и взаимодействия Al_2O_3 с WO_3 при повышенных температурах /В.А.Левицкий, А.Н.Клименко, В.П.Марин и др. — Неорганические материалы, 1977, т. 13, № 4, с. 699–702.

УДК 620.179.16

Б. Е. Пестов

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ УСТАНОВКА "ЭХО-М"

Применение двухканального, параллельного селектирования эхо-импульсов позволило на порядок повысить относительную точность определения характеристик распространения ультразвука в материале образца по сравнению с результатами, получаемыми на установках без блока селекции или с одноканальным селектором.

Среди методов неразрушающего контроля заметное место занимают методы физической акустики, с помощью которых по величинам и изменению характеристик распространения ультразвукового сигнала в материале исследуемого образца определяются упругие константы твердого тела и изменения его структуры. Используя методы физической акустики [1-5], можно исследовать распределение дислокаций, их взаимодействие с примесными атомами, диффузионные процессы, реакцию материала на изменение действующих на него внешних факторов (тепловых и радиационных полей, мощных световых импульсов, статических и динамических механических нагрузок и др.).

Применение современных транзисторов и микросхем позволяет разрабатывать более компактную аппаратуру для ультразвуковых исследований с более высокими эксплуатационными характеристиками, чем у созданных ранее приборов [6-8].

Установка "Эхо-М" (см. рисунок) смонтирована на микросхемах, что обеспечило уменьшение ее размеров и массы вдвое по сравнению с установкой второго поколения "Импульс-Ф" [9]. Основные электронные блоки установки размещены в настольном аппаратном шкафу. Блок электроакустического преобразователя, показанного в правом нижнем углу рисунка, содержит усилитель мощности генератора зондирующих импульсов и элементы согласования его с активным элементом электроакустического преобразователя из кварца X- или Y- среза, ниобата лития, сернистого кадмия. Конструктивно он размещается в цилиндрической части преобразователя, на верхнем торце которой устанавливается исследуемый образец. Активный элемент при помощи механизма прижима поджимается с регулируемым усилием к нижнему торцу образца. На рисунке показан образец из стекла.

Для согласования акустических сопротивлений активного элемента и образца между ними помещается переходный слой силиконового масла.

Диэлектрические материалы, примененные в электроакустическом преобразователе, допускают

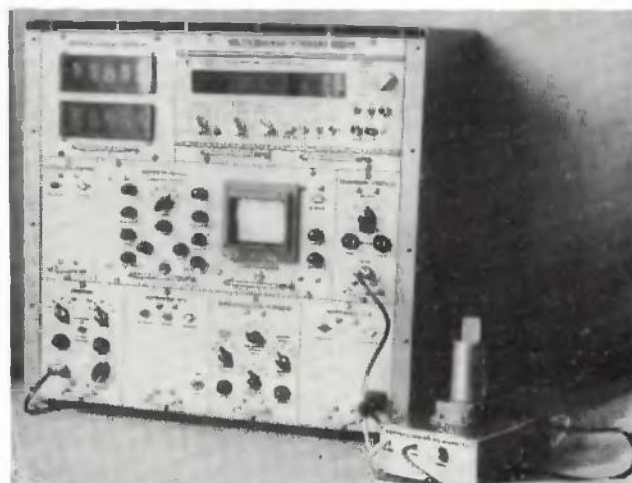
нагрев образца шахтной электропечью до 300°C.

Задающий генератор установки формирует импульсное высокочастотное напряжение. Частота заполнения радиоимпульсов непрерывно контролируется встроенным в установку электронным частотомером ЧЗ-36 с относительной точностью до 10^{-6} , что дает возможность настроить генератор на требуемую по условиям опыта частоту с более высокой точностью, чем при использовании механических или оптических устройств. Цифровой частотомер ЧЗ-36 регистрирует частоты, время распространения и измеряет период повторения зондирующих импульсов.

Сформированные задающим генератором радиоимпульсы поступают на усилитель мощности, а затем на активный элемент электроакустического преобразователя, упругие деформации которого вызывают в исследуемом образце возникновение акустического зондирующего импульса. Распространяясь по материалу образца, этот импульс образует последовательность убывающих по амплитуде акустических импульсов, получающихся в процессе многократного отражения сигнала от торцов образца.

В общем случае величина затухания ультразвукового сигнала обусловлена поглощением энергии волны материалом образца и рассеянием ее на неоднородностях материала. Кроме того, потеря энергии происходит при каждом отражении от торцов. Существующие методики обработки результатов измерений позволяют выделить влияние отдельных факторов на общее затухание, регистрируемое аппаратурой. Имеется также возможность решения обратной задачи — по величине потерь на рассеяние оценить величину зерен в материалах, имеющих поликристаллическую структуру (керамика, ферритах).

Скорость распространения ультразвукового сигнала определяется путем регистрации времени, затрачиваемого этим сигналом на прохождение



Установка "Эхо-М"

акустического пути, кратного удвоенной длине образца.

Результаты измерений фиксируются прибором ЧЗ-36, что обеспечивает высокую точность измерений, облегчает труд оператора, а также исключает возможность субъективной ошибки, возникающей при использовании в подобных устройствах осциллографических или стрелочных индикаторов.

Работа установки основана на принципе временной селекции отраженных эхо-импульсов одновременно по двум каналам, что дает возможность селектировать пары эхо-импульсов любого порядка отражения из последовательности импульсов, вызванных действием на образец одного зондирующего импульса. В свою очередь это позволяет определить параметры селектированных эхо-импульсов, одновременно используя два канала при абсолютных измерениях или получая относительные величины по параметрам двух импульсов, разделенных во времени весьма малыми величинами, равными или кратными периоду повторения эхо-импульса. За столь малое время флуктуации технических параметров установки (коэффициентов передачи отдельных блоков, их частотных и фазовых характеристик, толщины и вязкости переходного слоя, характеристик активного элемента электроакустического преобразователя) пренебрежимо малы, что исключает их влияние на точность регистрируемых установкой значений. Флуктуации параметров установки при длительных измерениях (исследованиях тепловых и последеформационных процессов, старения материалов) не снижают точности определения относительных параметров селектированных импульсов, так как их абсолютные значения меняются идентично.

Новый метод исследования, который можно назвать моноимпульсным, может быть использован при исследовании действия на твердые тела ударных механических, тепловых, радиационных и световых нагрузок.

Осциллографический индикатор выходного напряжения, смонтированный на двухлучевой трубке 9Л01И, служит для визуального наблюдения полного выходного сигнала приемника по первому каналу и индикации процесса селектирования эхо-импульсов по второму каналу. Индикатор используется не в качестве источника количественной информации о регистрируемых установкой параметрах, а для наблюдения на его экране осциллограммы, которая дает возможность следить за отсутствием искажений селектированных эхо-импульсов и выбирать оптимальный коэффициент усиления приемника.

Применение в установке эхо-импульсного метода исследования требует постоянного соединения входа высокочувствительного супергетеродинного приемника с электроакустическим преобразователем, а следовательно, и с выходом усили-

теля мощности генератора зондирующего импульса. Для защиты входа приемника от перегрузки его зондирующим импульсом применен двухсторонний диодный ограничитель и схема стробирования входного каскада приемника. Предусмотрена также возможность стробирования каскадов усилителя промежуточной частоты. Все это позволяет одновременно использовать в установке мощный генератор зондирующего импульса и высокочувствительный приемник, что значительно расширяет ее экспериментальные возможности. Линейность амплитудной характеристики приемника в заданном динамическом диапазоне уровней входного сигнала поддерживается при помощи двух ступенчатых аттенуаторов, вносящих общее ослабление сигнала на 60 дБ, ступенями через 10 и 5 дБ.

Частота напряжения, формируемого гетеродином приемника, контролируется частотомером ЧЗ-36. Установка частоты возможна с точностью до 10^{-6} от номинала. Промежуточная частота выбрана равной 2 МГц. Поэтому частота напряжения гетеродина на всех 12 поддиапазонах устанавливается на 2 МГц выше частоты заполнения зондирующего радиоимпульса, т.е. рабочей частоты установки. Изменение частоты в задающем генераторе зондирующего импульса и в гетеродине приемника достигается изменением постоянного напряжения, подводимого к варикапам соответствующих колебательных контуров.

Модулятор и блок селекции установки объединены в общий блок импульсных устройств, что позволило совместить органы регулировки длительностей селектирующих и зондирующих импульсов. Это повысило оперативность проведения измерений и оптимизировало условия селектирования эхо-импульсов. Блочная конструкция установки с использованием нормализованных вставных блоков типа "Вишня" упрощает ремонт и профилактику оборудования, а также модернизацию отдельных блоков. Все фиксируемые установкой параметры могут быть выведены в общепринятом коде на ЭВМ для автоматизации обработки данных. Оба канала селектирования импульсов также имеют внешний выход для подключения выносных измерительных приборов более высокого класса точности.

Техническая характеристика

Диапазон рабочих частот, МГц	5-50
Длительность зондирующих импульсов, мкс	2-10
Частота повторения зондирующих импульсов, кГц	1-10
Амплитуда зондирующих импульсов, В	≥ 40
Амплитуда выходных импульсов, В	≤ 5
Чувствительность приемника (при $P_c/P_{ш} = 3$), мкВ	40
Разрешающая способность по длительности, мкс	5
Абсолютная точность измерения времени, мкс	0,1

Абсолютная точность измерения амплитуды импульса, В	
при встроенном вольтметре Ф-200	0,01
при встроенном приборе В2-29 (максимально допустимая амплитуда 1,4 В)	0,0001
Габариты, мм	500×500×480
Напряжение питания, В	220(50 Гц)

Использование установки для исследования структуры и свойств ферритов, стекла, керамики, оптических монокристаллов, а также металлов и сплавов позволило решить ряд актуальных вопросов электронного материаловедения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972. — 307 с.
2. Ноздрев В.Ф., Федорищенко Н.В. Молекулярная акустика. — М.: Выс. школа, 1974. — 288 с.
3. Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела /Под ред. У.Мэзона. — М.: Мир, 1969. — 375 с.
4. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть Б/Под ред. У.Мэзона — М.: Мир, 1967. — 362 с.
5. Физическая акустика, принципы и методы/Под ред. У. Мэзона и Р.Терстона. — М.: Мир, 1974. — 429 с.
6. Бражников Н.И. Ультразвуковая фазометрия. — М., Энергия, 1968. — 272 с.
7. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1970. — 238 с.
8. Электронная аппаратура ультразвуковых установок для исследования свойств твердого тела/М.А. Криштал, Б.Е. Пестов, В.В. Давыдов, И.В. Троицкий — М.: Энергия, 1974. — 225 с.
9. Пестов Б.Е. Ультразвуковая установка "Импульс-Ф" для исследования структуры твердых тел. — Радиотехника, 1978, т.33, № 7, с. 70-71.

Статья поступила 14 мая 1979 г.

КОНТРОЛЬ ПЛАСТИН И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ

УДК 621.317.799:621.316 315.592

В.В. Батавин, В.И. Прилипко,

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПЛАСТИН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Метрологическое обеспечение изготовления полупроводниковых пластин высокого качества базируется на применении неразрушающих, бесконтактных методов контроля.

Качество исходных пластин в значительной степени предопределяет структуру и объем технологических потерь в процессе производства приборов и в конечном счете уровень их технических характеристик.

К основным параметрам, подлежащим контролю в производственных условиях, относятся толщина пластины и ее непараллельность, изогнутость (прогиб), неплоскостность, профиль фаски, длина базового среза, шероховатость поверхности, удельное сопротивление, макро- и микронеоднородность по удельному сопротивлению, качеству обработки поверхности (риски, сколы и прочие механические

нарушения поверхности), дефекты кристаллической решетки. Необходимость получения пластин с высоким качеством поверхности обуславливает требования к чистоте и точности не только технологических, но и контрольно-измерительных операций, что связано с применением неразрушающих, бесконтактных методов контроля.

Толщина пластины — параметр, наиболее часто контролируемый в процессе изготовления пластин. Помимо обязательного выходного контроля в технологическом процессе предусматривается многократный межоперационный контроль перед проведением групповых операций шлифовки и полировки, требующих сортировки пластин по толщине. Это определяет высокие требования к метрологическим характеристикам и производительности контрольно-измерительной аппаратуры. В настоящее время в производстве используется измеритель толщины с емкостным датчиком, выполненным в виде цилиндрического щупа. Контролируемая пластина помещается на опорах между двумя встречными датчиками (рис. 1, а). Возникающие при этом изменения емкости датчиков преобразуются в электрические сигналы, пропорциональные расстояниям h_1 и h_2 между торцевыми поверхностями датчиков и соответствующими поверхностями пластины. При известном расстоянии между датчиками H вычисляется толщина пластины. Рабочий диапазон применяемых в настоящее время измерителей толщины составляет 1–1000 мкм, случайная составляющая погрешности измерения не превышает $\pm 2,5$ мкм с доверительной вероятностью 0,95. Однако при многократном повторении операций 100%-ного контроля эти приборы не обеспечивают необходимой производительности процесса измерений. Представляется целесообразной разработкой комплексных измерительных систем, включающих в свой состав промышленные роботы для выполнения операций извлечения контролируемой пластины из технологической тары, помещения ее на рабочем столе в позицию измерения и последующей загрузки в технологическую тару с сортировкой пластин на группы с заданным диапазоном толщин.

Непараллельность и изогнутость пластин контролируются с помощью того же прибора, что и толщина. Пластина перемещается относительно емкостных датчиков по определенной траектории. Начальная точка этой траектории принимается за

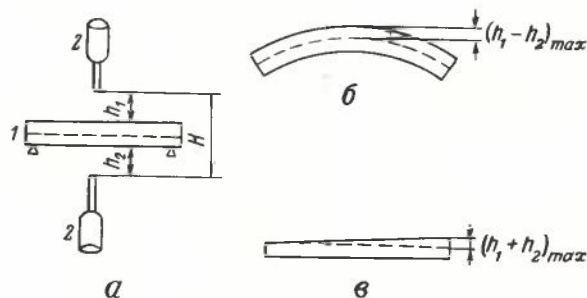


Рис. 1. Измерение толщины (а), изогнутости (б) и непараллельности (в) пластин: 1—пластина, 2—датчики

опорную. В случае измерения изогнутости опорная точка выбирается в центре пластины, а при измерении непараллельности — в периферийной области. Во время перемещения пластины прибор регистрирует и запоминает максимальные сигналы, пропорциональные величинам $(h_1 - h_2)_{\max}$ и $(h_1 + h_2)_{\max}$. Первый из них характеризует изогнутость срединной линии пластины (рис. 1, б), второй — непараллельность (рис. 1, в), отнесенные к расстоянию между опорной точкой и точкой, в которой эти сигналы регистрируются.

В условиях промышленного применения в целях увеличения производительности процесса измерения перемещение пластины относительно датчиков может осуществляться по весьма ограниченной траектории, покрывающей лишь незначительную долю площади пластины, поэтому не всегда достигается объективность описанного способа измерения изогнутости и непараллельности.

Поверхность изогнутой пластины, как правило, не имеет осевой симметрии и профиль ее содержит несколько вершин вогнутостей и выпуклостей. Чтобы получить объективную информацию об изогнутости поверхности пластины с таким сложным профилем, необходимо сильно увеличивать длину траектории перемещения пластины, охватывая как можно большую часть площади поверх-

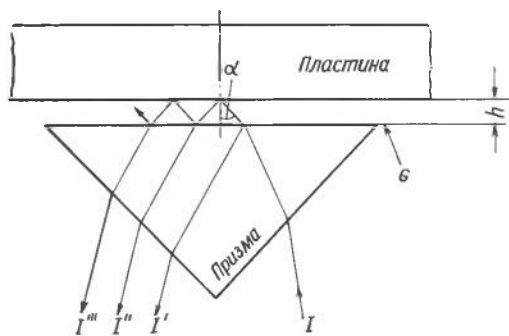


Рис. 2. Измерение непараллельности и изогнутости методом широкоугольной интерференции



Рис. 3. Вид интерференционных полос равной высоты при широкоугольной интерференции от реальной поверхности пластины: 1—4—вершины; 5—7—впадины

ности. Это, однако, приводит к увеличению длительности измерений.

В известной мере эти трудности преодолеваются использованием методов широкоугольной, панорамной интерференции (рис. 2). Луч света I от монохроматического источника излучения направляется через стеклянную призму на поверхность контролируемой пластины. За счет многократного отражения от поверхности призмы и пластины луч I расщепляется на компоненты I' , I'' и т.д., интерферирующие друг с другом с разностью фаз, накопленной на оптической длине пути в зазоре h . Гипотенузная грань G призмы обычно принимается за эталонную, поэтому ее неплоскостность должна быть по возможности минимальной. Если поверхность пластины изогнута, величина h является функцией координаты, и проектируемая на экран интерференционная картина будет состоять из серии чередующихся темных полос, представляющих собой линии равной высоты h .

Число интерференционных полос между выбранными точками поверхности пластины характеризует разность высот этих точек относительно эталонной грани призмы:

$$\Delta h = n \frac{\lambda}{2 \cos \alpha},$$

где n — число интерференционных полос; λ — длина волны монохроматического излучения; α — угол падения луча на поверхность образца. Угол между гипотенузной и боковыми гранями призмы обычно выбирается так, чтобы величина $\frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \approx 1$ мкм.

Получаемое с помощью метода широкоугольной интерференции панорамное изображение полос равной высоты дает наиболее объективную информацию о реальном профиле поверхности пластины. Однако практическое применение этого метода для контроля изогнутости пластины сопряжено с трудностями получения численного значения результата измерения. Поскольку стрела прогиба, характеризующая изогнутость пластины, достигает 60 мкм и более, на интерферограмме появляется большое число полос (более 60), которые лежат настолько близко друг к другу, что их подсчет представляет собой трудоемкую и утомительную операцию, а в некоторых случаях и невозможен вследствие перекрытия полос. Преодолеть эти трудности можно путем вывода интерференционного панорамного изображения на телевизионный экран и подсчета числа полос с помощью электронного луча.

Неплоскостность есть наибольшее расстояние от точек реальной поверхности пластины до прилегающей плоскости. Контроль этого параметра осуществляется методом панорамной интерференции. Для измерения неплоскостности этим методом необходимо устранить изогнутость пластины, что выполняется на столе, снабженном вакуумным прижимом. С помощью регулировочных винтов стола добиваются минимального числа

интерференционных полос на экране. Эта операция проводится для того, чтобы исключить наклон пластины относительно гипотенузной грани призмы и тем самым сориентировать прилегающую плоскость параллельно эталонной. На интерференционной картине отмечают экстремальные точки, которые проявляются как центры участков, окруженных замкнутыми интерференционными полосами в виде колец искаженной формы (рис. 3). Точки классифицируют на вершины и впадины, для чего с помощью регулировочных винтов слегка приближают столик с закрепленной на нем контролируемой пластиной к поверхности эталонной гипотенузной грани призмы. Те точки, от которых интерференционные кольца разбегаются в стороны, являются вершинами, а те, в которые кольца сбегаются, — впадинами. Выбирают две соседние вершину и впадину, разделенные наибольшим числом полос интерференции. Это число полос (на рис. 3 — число полос между точками 4 и 6) определяет величину неплоскостности и характеризует качество пластин. В производстве контроль качества пластин по неплоскостности проводится по малой выборке из товарной партии пластин.

Для получения достоверных значений неплоскостности полупроводниковых пластин технические характеристики измерительного прибора и процедура измерений должны удовлетворять определенным требованиям. Это касается прежде всего требований к неплоскостности эталонной грани призмы и поверхности стола прибора, к которому прижимается пластина. Необходимо, чтобы неплоскостность этих поверхностей не превышала 0,5–1 интерференционных колец (0,5–1 мкм). Поверхность стола и контактирующая с ним поверхность пластины перед проведением измерений должны быть тщательно обеспылены. В противном случае мелкие частицы пыли в результате вакуумного прижатия пластины будут вызывать ее искривление, что приведет к получению ложной информации о величине неплоскостности. Тот же эффект может быть вызван неправильным выбором формы, размеров и расположения воздушных канавок на поверхности стола. Погрешность измерения в значительной мере зависит от неплоскостности нерабочей стороны, которой она прижимается к столу, так как эта неплоскостность приводит к искривлению пластины при ее вакуумном прижатии, и, следовательно, к получению искаженного значения истинной величины неплоскостности рабочей стороны пластины. Последнее обстоятельство не является, однако, препятствием к промышленному использованию метода панорамной интерференции для измерения неплоскостности пластин по следующей причине. Ограничения на величину неплоскостности пластин вводятся для обеспечения высокого качества операций фотолитографии. В процессе экспонирования фоторезиста пластина, как и в процессе измерений, прижимается с помощью вакуума к столу, поэтому четкость получаемого изображения рисунка фотошаблона определяется неплоскостностью не только рабочей поверхности пластины, но и ее

нерабочей стороны. Таким образом, требования к величине неплоскостности характеризуют качество обработки обеих сторон пластины. Исключительная важность этих требований и большая трудоемкость операций контроля неплоскостности пластин диктуют создание более производительных бесконтактных методов и средств измерений формы поверхности пластин.

Закругление края пластины (фаска) является одним из важных факторов, определяющих качество технологических операций изготовления полупроводниковых приборов. Формирование фаски на пластинах позволяет устранить многие специфические виды брака и негативные явления, возникающие при механической обработке пластины, нанесении фоторезиста, фотоз экспонировании, эпитаксии, транспортировке. Скалывание острых краев пластин при механической обработке приводит к ухудшению качества их рабочей поверхности (появлению царапин, рисок и др.). Сколы на краях могут возникать и при извлечении пластин из технологической тары. Образующаяся при этом крошка попадает на рабочую поверхность пластины. При эпитаксиальном наращивании это приводит к появлению дефектов структуры эпитаксиального слоя, а в местах краевых сколов могут возникать дислокации. Нанесение фоторезиста на поверхность пластины, не имеющей фаски, сопровождается образованием на ее краях кольцевого валика, что в дальнейшем приводит к ухудшению качества экспонирования. В процессе роста эпитаксиального слоя на пластине без фаски также возможно образование кольцевого валика ("короны").

Профиль фаски характеризуется шириной и высотой (расстоянием от начала искривления до точки профиля с заданным вертикальным смещением относительно поверхности пластины). Для контроля профиля фаски используется метод движущегося шупа с регистрацией вертикальных перемещений на ленте самопишущего прибора. Механические перемещения шупа преобразуются в электрический сигнал с помощью механотрона. Полученную профилограмму сопоставляют с шаблоном, на котором обозначен коридор, ограниченный предельно-допустимыми величинами ширины и высоты фаски. Если измеренный профиль вписывается в коридор шаблона, пластина считается годной по этим параметрам.

Диаметр пластины и длина базового среза. Контроль этих параметров выполняется механическими средствами, при использовании которых возможны разрушения краев пластины. В связи с этим возникает необходимость в применении бесконтактных методов контроля.

Шероховатость поверхности полупроводниковых пластин должна соответствовать 14 классу чистоты ($R_z \leq 0,05$ мкм). Контроль шероховатости проводится с помощью профилографа-профилометра модели 252 с вертикальным увеличением $20000\times$ и алмазным щупом с радиусом закругления иглы 0,002 мм.

Удельное сопротивление и неоднородность его распределения контролируются четырехзондовым методом с помощью прибора ИУС-3. Измерения проводятся в 5 точках, одна из которых помещена в центре пластины, а остальные на взаимно-перпендикулярных диаметральных линиях на расстояниях от центра, равных половине радиуса. Однородность по удельному сопротивлению оценивается величиной

$$V_{\rho} = \left| \frac{\bar{\rho}_K - \bar{\rho}_Ц}{\bar{\rho}_K + \bar{\rho}_Ц} \right| \cdot 100\%$$

где $\bar{\rho}_K$ — среднее значение удельного сопротивления для четырех точек, удаленных от центра на половину радиуса; $\bar{\rho}_Ц$ — среднее значение удельного сопротивления в центре (для двух измерений).

Микронеоднородность по удельному сопротивлению особенно сказывается при изготовлении микросхем с большой плотностью упаковки элементов. Наиболее характерной для монокристаллов, полученных методом Чохральского и бестигельной зонной плавкой, является спиральная неоднородность, возникающая в слитке при его выращивании в условиях несимметричного теплового поля. Поскольку устранение спирального эффекта представляет большие технические трудности, спиральная неоднородность встречается довольно часто и служит одной из главных причин, снижающих качество полупроводниковых приборов.

Спиральная неоднородность по удельному сопротивлению представляет собой периодические колебания удельного сопротивления вдоль образующей слитка, наиболее сильно проявляющиеся в его периферийных областях. Так как при выращивании слитка фронт кристаллизации не является плоским, то в сечении слитка также наблюдаются периодические колебания удельного сопротивления. Учитывая негативную роль спиральных неоднородностей и возможность их обнаружения на поперечных сечениях слитка, необходимо включать в технические условия на пластины требования на допустимый уровень периодических колебаний удельного сопротивления. Микронеоднород-

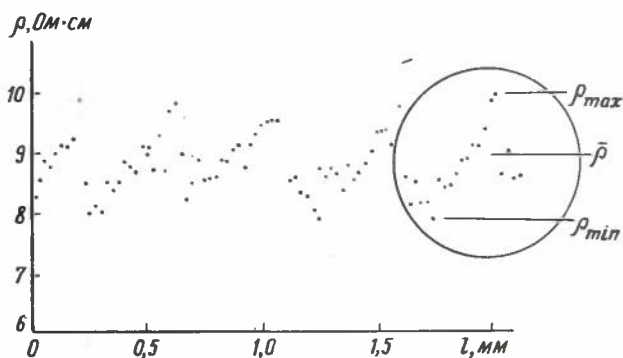


Рис. 4. Характерный вид периодической микронеоднородности в монокристалле кремния марки КДБ-10 при шаге перемешивания 20 мкм

ность таких полупроводников, как германий и кремний, может быть измерена методом сопротивления растекания [1]. Измерения проводят на пластинах после операции финишной полировки поверхности. Количественно микронеоднородность периодического характера оценивается величиной

$$V_{\rho} = \left| \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\rho_{max} + \rho_{min}} \right| \cdot 100\%$$

где ρ_{max} и ρ_{min} — максимальное и минимальное значения удельного сопротивления в соседних экстремумах (рис. 4).

Дефекты кристаллической структуры непосредственно влияют на характеристики полупроводниковых приборов. Поэтому технические требования к пластинам полупроводниковых материалов регламентируют допустимые нормы на содержание таких структурных несовершенств, как дислокации, выделения второй фазы, кластеры точечных дефектов, дефекты упаковки и др. Обнаруживаются такие дефекты с помощью стандартных методов селективного химического травления и идентифицируются по характерным для каждого вида дефектов фигурам травления [2]. Подсчет плотности дефектов проводится под микроскопом в соответствии с планом контроля, зависящим от плотности и распределения дефектов по площади пластины. Особую опасность формирования в объеме полупроводника различного рода структурных дефектов представляет слоистая спиральная неоднородность, возникающая в результате периодической модуляции скорости роста кристалла и обуславливающая периодичность как в распределении неравновесной концентрации точечных дефектов структуры, например вакансий и междоузельных атомов в бездислокационном материале, так и в распределении атомов примесей, у которых эффективный коэффициент распределения на границе расплав — твердое тело сильно зависит от скорости роста монокристалла. После охлаждения слитка в определенных витках спирали создаются благоприятные условия для возникновения сильно пересыщенного раствора точечных дефектов и примесей. Высокая концентрация дефектов структуры и примесных атомов усиливает их взаимодействие. Обе причины приводят к тому, что в процессе охлаждения слитка, а также при проведении термообработок, предусмотренных технологическим циклом изготовления полупроводниковых приборов, в определенных витках спирали резко ускоряется распад твердых растворов с образованием различного рода примесных комплексов, кластеров точечных дефектов, выделений второй фазы, дефектов упаковки и других структурных несовершенств. Образующиеся дефекты в свою очередь могут служить центрами осаждения избыточных растворов других примесей, которые не подвергаются воздействию спирального эффекта из-за слабой зависимости эффективного коэффициента распределения от скорости роста монокристалла. Таким образом,

например, происходит образование в монокристаллах кремния частиц SiO_2 , возникающих в результате распада пересыщенного раствора равномерно распределенного кислорода на центрах, которыми могут служить комплексы вакансий. В результате этого явления при равномерном распределении кислорода наблюдается спиральное распределение концентрации частиц SiO_2 в объеме монокристалла [3].

Вследствие того, что спиральная неоднородность представляет собой наиболее опасный источник структурного несовершенства, контролю этого параметра уделяется особое внимание. Если описанные выше процессы фазовых превращений проявляются в ходе остывания монокристаллического слитка после его выращивания, то спиральная неоднородность обнаруживается на пластинах после их селективного травления в стандартных травителях [2] в виде спиральных витков (свирлов), образованных фигурами травления.

Отсутствие свирлов после селективного травления пластин не означает еще, что спиральная неоднородность отсутствует, а может свидетельствовать и о том, что во время охлаждения слитка процессы фазовых превращений происходили недостаточно интенсивно. Однако этот вид неоднородности может проявить себя в дальнейшем, при операциях термообработки. По этой причине необходимо осуществлять периодический контроль спиральной неоднородности в пластинах кремния после их термообработки при высокой температуре. Условия и режим термообработки задаются потребителем и соответствуют типовым высокотемпературным технологическим операциям изготовления конкретного типа приборов.

Поскольку практически сложно устранить спиральную неоднородность, в технических требованиях на пластины указывают не на отсутствие этой неоднородности, а на отсутствие определенного вида сопутствующих дефектов структуры (например, дефектов типа А, представляющих собой частичные дислокации дефектов упаковки, возникающие при осаждении избыточной концентрации междуузельных атомов кремния).

В настоящее время создан ряд приборов для контроля структурного совершенства полупроводниковых пластин. В работе [4] описан прибор на основе инфракрасного поглощения для записи топограммы распределения неоднородностей. Принцип действия прибора состоит в следующем. Пластина полупроводника помещается между источником света и щелью монохроматора и с помощью двухкоординатного сканирующего устройства перемещается относительно луча света. Одновременно с пластиной сканируется планшет с диаграммной бумагой, укрепленный на одной платформе с контролируемой пластиной. С помощью вращающегося пера, не соединенного механически с перемещающейся платформой, на бумаге рисуется система строк. Структурные дефекты и микронеднородности в распределении примесей вызывают локальные изменения коэффициента поглощения, что приводит к модуляции интенсив-

ности света, прошедшего сквозь пластину. Сигнал от приемника излучения, размещенного на выходе из монохроматора, подается на вращающееся перо самописца и регистрируется как всплеск на строчной линии развертки. В результате на бумаге создается изображение топограммы распределения неоднородностей и дефектов структуры по площади пластины. Варьируя длину волны излучения, можно исследовать полупроводники с различной шириной запрещенной зоны и настраиваться на зону наибольшей чувствительности обнаружения по отношению к различным видам исследуемых дефектов. Время записи всей топограммы для пластин диаметром 100 мм не превышает 5 мин. С помощью этого прибора можно выявить спиральные неоднородности в пластинах кремния, не прибегая к их обработке в селективных травителях.

Большими возможностями для исследования и контроля совершенства структуры полупроводниковых пластин обладает инфракрасный лазерный поляризационный микроскоп с выводом изображения на телеэкран. Применение в нем лазерного источника света совместно с телевизионной приставкой позволило улучшить контрастность изображения наблюдаемых структурных дефектов



а



б

Рис. 5. Частицы второй фазы (а) и периодические поля упругих напряжений (б) в монокристаллах кремния. Снимки сделаны с телеэкрана лазерного инфракрасного поляризационного микроскопа

(рис. 5, а) по сравнению с обычно применяемыми для аналогичных целей микроскопами типа МИК-1, МИК-4. Высокие контрастность изображения и чувствительность к полям упругих напряжений в кристаллической решетке дают возможность эффективно использовать инфракрасный лазерный поляризационный микроскоп для обнаружения спиральной неоднородности в монокристаллах полупроводников без применения селективного химического травления и специальных термообработок. Так как спиральная неоднородность характеризуется периодическим распределением концентрации дефектов структуры, в кристалле полупроводника могут возникать упругие напряжения периодического характера, которые можно наблюдать в поляризованном инфракрасном свете вследствие эффекта двойного лучепреломления (рис. 5, б).

Интенсивные научные исследования ведутся в направлении создания инструментальных неразрушающих методов обнаружения и регистрации индивидуальных дефектов структуры. Разработан прибор для обнаружения дефектов структуры в пластинах кремния с выводом изображения на экран электронно-лучевой трубки [5]. Пучок от гелий-неонового лазера сканирует по поверхности кремниевой пластины, помещенной между двумя обкладками конденсатора. Верхняя обкладка прозрачна для лазерного излучения и изолирована от пластины. Поверхность пластины предварительно электрически заряжается от ионного генератора, в результате чего создается обедненный слой. Генерируемые под воздействием лазерного излучения носители заряда локализируются в обедненном слое, что приводит к возникновению электрического поля между обкладками конденсатора. При наличии дефекта неравновесные носители рекомбинируют вблизи него с большей скоростью, поэтому электрическое поле, а следовательно, и фотонапряжение в области дефекта меньше, чем в бездефектном участке поверхности пластины. Сигналы фотонапряжения преобразуются в изображение на экране электронно-лучевой трубки, которое позволяет судить о размерах и форме дефектов структуры.

Применение рассмотренных методов обеспечивает надежный промышленный контроль качества пластин полупроводниковых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. — М.: Советское радио, 1976. — 93 с.
2. Обзоры по электронной технике: Методы наблюдения и контроля дефектов в полупроводниковых материалах и структурах/Ю.М. Литвинов, Т.И. Слюжикова, Ф.Р. Хашимов. — М., 1976, вып. 3. Сер. 6. Материалы. — 33 с.
3. Батавин В. В. Распад пересыщенного твердого раствора кислорода в бездислокационном кремнии. — Кристаллография, 1970, т. 15, № 1, с. 125—135.
4. Matare H. F., Van Eeck P. Wafer homogeneity tester using variable frequency IR absorption scanning. — Sol. State Techn., 1979, N 9, p. 101—106.
5. Electronic Production, 1979, vol. 8, N 3, p. 13.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

УДК 621.317.799:621.382

О. Ф. Вихлянецв, Н. Н. Егоров,
А. И. Сидоров, В. Д. Чумак

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПО ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Рассмотрены особенности применения статистического контроля для приемочных испытаний эпитаксиальных структур.

Математико-статистические методы приемочного контроля готовых изделий являются одной из современных форм контроля качества продукции [1, 2]. Однако конкретный план контроля должен разрабатываться с учетом специфики контролируемой продукции. Наиболее важными параметрами эпитаксиальных структур являются толщина и удельное сопротивление эпитаксиального слоя. Каждый из этих двух параметров характеризуется номиналом x_H и относительным номинальным разбросом $V_H = 2\sigma/x_H$, где σ — среднее квадратическое отклонение величины x в партии.

Исходные данные для выбора величин x_H и V_H , а также плана приемочного контроля могут быть получены на основе анализа экспериментальных зависимостей выхода годных ИС от величины параметра x . Зависимость выхода годных ИС от толщины эпитаксиального слоя показана на рис. 1. Для определения влияния разброса V на относительный выход годных ИС зависимость $y/y_H = f_1(x)$ необходимо преобразовать в $y/y_H = f_2(V, x_H)$. Предположим, что величина x распределена по нормальному закону, тогда указанное преобразование можно провести следующим образом:

$$f_2(V, x_H) = \frac{2}{\sqrt{2\pi} x_H V} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{4(x-x_H)^2}{x_H^2 V^2}} f_1(x) dx.$$

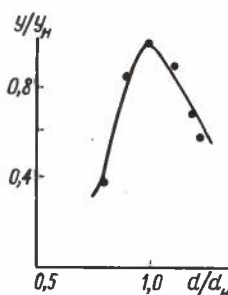


Рис. 1. Экспериментальная зависимость выхода годных ИС от толщины эпитаксиального слоя

В зависимости от вида функции $f_1(x)$ это преобразование может быть выполнено аналитически или графически. Преобразованная кривая приведена на рис. 2.

Оптимальное значение величины x_H можно получить из условия:

$$\frac{\partial f_2(V, x_H)}{\partial x_H} \Big|_{x_H = x_H^{\text{ОПТ}}} = 0.$$

Зависимость $y/y_H = f_2(V, x_H)$ является исходной для выбора величины номинального разброса V_H .

Для этого определяется величина V_H из условия

$$\frac{y}{y_H} \Big|_{V = V_H} = 0,90 \div 0,95. \text{ По известной величине}$$

V_H находят номинальную величину разброса в партии V_H , выбирая ближайшую минимальную величину, кратную пяти, как это принято для эпитаксиальных структур (5; 10; 15 и 20%). Предельная допустимая величина разброса V_{max} , используемая при статистическом контроле, определяется потребителем на основе технико-экономического анализа процесса изготовления ИС.

Основными исходными данными для определения плана приемочного контроля являются величины: α (риск поставщика) – вероятность отклонения годной партии с разбросом $V = V_H$ и β (риск потребителя) – вероятность принятия партии с разбросом $V = V_{\text{max}}$. Оптимальное значение величины α находится в интервале 0,01–0,05. Значение величины β выбирается обычно равным 0,05 или 0,1.

Выбор подходящего плана контроля может быть осуществлен по методике, изложенной в ГОСТе 18242-72. При этом следует учитывать, во-первых, что при разрушающем методе контроля экономически нецелесообразно контролировать более одной пластины из технологической партии, т.е. партии, полученной в одном эпитаксиальном процессе. Во-вторых, для обеспечения однородности контролируемой партии входящие в ее состав технологические партии должны быть получены по возможности на одной эпитаксиальной установке в течение не очень длительного времени, например, в течение суток. В-третьих, должно быть выполнено условие случайности выборки. В качестве примера рассмотрим случай, когда контроль толщины эпитаксиального слоя $d_{\text{ЭС}}$ осуществляется на пластине в трех точках, лежащих на диаметре, перпендикулярном базовому срезу. При плане контроля (объем выборки $n=3$, приемочное число $c=0$) совокупность из трех точек измерения на пластине можно считать случайной выборкой, если нет значимого различия величин $d_{\text{ЭС}}$ в разных точ-

ках пластины и между пластинами. Однако в реальных условиях это может не выполняться, что связано с определенными закономерными изменениями величины $d_{\text{ЭС}}$ между отдельными участками пьедестала эпитаксиальной установки. Это может привести к завышению вероятности приемки партии. Экспериментальная зависимость значения $\Delta L = L_{\text{несл}} - L_{\text{сл}}$ от величины разброса V толщины эпитаксиального слоя приведена на рис. 3 ($L_{\text{несл}}$ – вероятность приемки партии, если в выборку включаются все три измерения на пластине; $L_{\text{сл}}$ – вероятность приемки партии, когда выборка формируется случайным образом, т.е. каждая из трех точек измерения на каждой пластине имеет равную вероятность попасть в выборку $n=3$; $V = 2\sigma/d_{\text{ЭС}}^{\text{НОМ}} 100\%$, где σ – среднее квадратическое отклонение величины $d_{\text{ЭС}}$). При увеличении разброса V возрастает величина ΔL и при $V = 10 \div 15\%$ это различие уже существенно. Однако при $V < 5 \div 6\%$ величина ΔL практически равна нулю.

Анализ распределения параметра x в технологической партии показывает, что при величине разброса в партии менее 5% различия величин x между отдельными точками на пластине, а также между пластинами статистически незначимы и величины x распределены по нормальному закону.

Таким образом, для того чтобы не увеличивать риск потребителя при $V > 5\%$ в случае, если разброс параметра x определяется различием между пластинами, при выборочном контроле целесообразно измерять величину x в одной точке, случайным образом выбранной из трех возможных точек контроля на пластине.

Достоверность оценки уровня качества продукции по результатам выборочного контроля определяется статистической условной достоверностью выбранного плана контроля y и погрешностью измерения $V_{\text{изм}}$. Величину y для случая, когда α и $\beta < 0,1$, можно определить по приближенной форму-

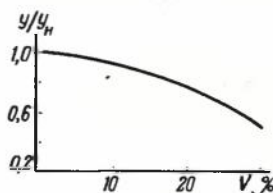


Рис. 2. Расчетная зависимость выхода годных ИС от разброса толщины эпитаксиального слоя

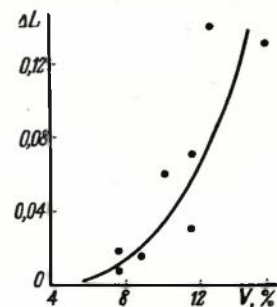


Рис. 3. Экспериментальная зависимость величины ΔL от разброса толщины эпитаксиального слоя

ле [3]: $y = 1 - (\alpha + \beta)$. При $\alpha, \beta = 0,05$ $y = 0,9$.

Погрешность измерения параметра может оказывать существенное влияние на вероятность приемки партии. Разброс параметра, определенный по результатам измерения методом, имеющим погрешность $V_{\text{изм}}$, будет $V = V_0 \sqrt{1 + (V_{\text{изм}}/V_0)^2}$, где V_0 — истинный разброс величины x .

Вероятность приемки партии данного качества уменьшается при увеличении погрешности измерения. Для исключения влияния погрешности измерения необходимо обеспечить выполнение условия $V_{\text{изм}} < 0,2 V_0$. Это может быть достигнуто применением точных методов измерения либо проведением параллельных измерений.

Таким образом, при проведении статистического контроля необходимо учитывать целый ряд особенностей эпитаксиальных структур, к наиболее важным из которых относятся наличие определенной функциональной зависимости выхода годных приборов от контролируемого параметра, характер формирования выборки, в том числе точек контроля на пластине, риск поставщика и потребителя, а также точность измерения. Правильный выбор методики статистического контроля гарантирует высокую эффективность рассмотренного метода контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиндовский Э., Шюрц О. Статистические методы управления качеством. — М.: Мир, 1976, 420 с.
2. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. — М.: Мир, 1970, 368 с.
3. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. — М.: Металлургия, 1979, 88 с.

Статья поступила 3 апреля 1980 г.

УДК 536.5

В. С. Белоусов, В. В. Зотов,
Ю. Ф. Козлов, А. И. Сидоров

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ

Разработанный оперативный и достаточно точный способ измерения температурного поля в диапазоне $850\text{--}1250^\circ\text{C}$ основан на особенностях перераспределения мышьяка и сурьмы, имплантированных в кремниевую пластину. Точность измерения температуры составляет $\pm 5^\circ\text{C}$, локальность — 300 мкм .

При проведении высокотемпературных процессов технологии изготовления ИС (таких, как эпитаксиальное наращивание и диффузионный отжиг)

очень важно локально, с высокой воспроизводимостью и точностью измерять распределение температурного поля. Разработанный метод определения температурного поля на поверхности кремниевой пластины заключается в измерении поверхностного сопротивления ионно-имплантированного слоя после проведения термического процесса. Диапазон измеряемых температур $850\text{--}1050^\circ\text{C}$ для слоев, легированных мышьяком, и $1050\text{--}1250^\circ\text{C}$ — для слоев, легированных сурьмой.

Метод основан на особенностях диффузионной разгонки ионно-имплантированных в кремний сурьмы и мышьяка*. При энергии имплантированных ионов $50\text{--}100\text{ кэВ}$ и значительных дозах имплантации в подложке образуется аморфный легированный слой, в котором примесь находится в неактивном состоянии. При последующем низкотемпературном окислении во влажном кислороде имплантированный слой исчезает, а вся примесь сосредоточивается на границе раздела $\text{Si}\text{--}\text{SiO}_2$. В процессе дальнейшей термообработки примесь активируется и диффундирует в кремний, при этом коэффициент диффузии экспоненциально зависит

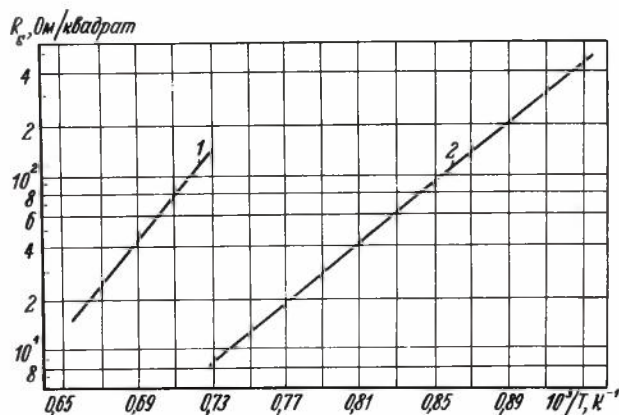


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления кремниевой пластины, легированной сурьмой при дозе $6 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-2}$ (1) и мышьяком при дозе $1,8 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-2}$ (2) от температуры ($t_{\text{отж}} = 20\text{ мин}$).

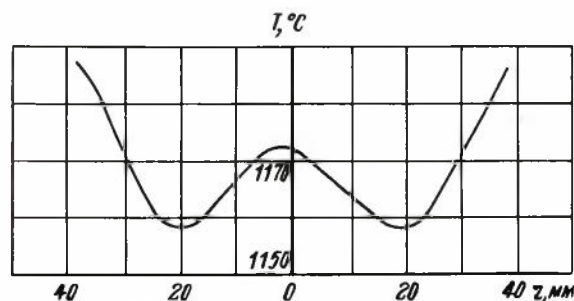


Рис. 2. Распределение температуры по диаметру пластины в процессе эпитаксиального наращивания

*Белоусов В.С., Зотов В.В., Сидоров А.И. Измерение температурного поля на пластинах кремния с использованием имплантированных скрытых слоев, легированных сурьмой. — Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1979, вып. 12, с. 49–52.

от температуры. Поверхностное сопротивление кремния до истощения примеси, сосредоточенной на границе раздела Si-SiO₂, также экспоненциально зависит от температуры (рис. 1). Как следует из рисунка, величина энергии активации в указанных зависимостях приблизительно равна половине величины энергии активации диффузии ($R_s \sim \sqrt{D_i t}$, где D_i – собственный коэффициент диффузии, t – время диффузии).

Более низкий температурный интервал поверхностного сопротивления кремния, легированного мышьяком, объясняется более высокой предельной растворимостью мышьяка (примерно на порядок большей, чем у сурьмы) и, соответственно, большим коэффициентом диффузии. Распределение температуры по диаметру пластины в процессе эпитаксиального наращивания приведено на рис. 2. При времени термообработки не менее 20 мин погрешность определения температуры не превышает $\pm 5^\circ\text{C}$. Локальность измерения температуры при использовании зондовой головки с расстоянием между зондами 100 мкм составляет около 300 мкм.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.

УДК 621.382

В. И. Бредихин, В. Н. Генкин,
А. Р. Салманов, А. Н. Щелоков

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Предлагаемый экспрессный метод контроля обеспечивает возможность отдельного определения характерного времени линейной рекомбинации и коэффициента квадратичной рекомбинации, что позволяет оценить вклад в эти процессы соответственно глубоких и мелких примесей в структурах арсенида галлия.

Экспрессное измерение неразрушающим методом одной из важнейших характеристик полупроводников – времени жизни неравновесных носителей заряда τ – может быть использовано на входном и выходном контроле качества полупроводниковых материалов для ИЭТ, а также для проведения широкого круга научных исследований при разработке технологических процессов получения этих материалов. Измерение этого параметра представ-

ляет особый интерес при изготовлении высококачественных полупроводниковых структур для фотоприемных устройств, приборов СВЧ техники, сверхбыстродействующих интегральных схем и других изделий.

Устройство для измерения τ в эпитаксиальных структурах арсенида галлия на полуизолирующей подложке методом релаксации фотопроводимости (рис. 1) состоит из источника коротких импульсов монохроматического излучения длительностью t_c , источника импульсного напряжения, прижимных емкостных контактов для подключения образца в электрическую цепь, электрического фильтра, регистрирующего прибора и задающего генератора, который синхронизирует работу источника света и импульсного источника напряжения таким образом, что фотовозбуждение носителей заряда происходит в тот момент, когда в образце создается квазистатическое электрическое поле.

Источник световых импульсов для возбуждения неравновесных носителей облучает образец монохроматическим излучением с длиной волны, лежащей в области основного поглощения полупроводниковой структуры.

Источник импульсного напряжения представляет собой генератор прямоугольных импульсов с такой длительностью, что созданное квазистатическое электрическое поле в образце поддерживает фототок в течение всего времени его существования. Использование в устройстве импульсного напряжения вместо постоянного уменьшает нагрев образца и повышает точность измерения времени жизни неравновесных носителей заряда. Кроме того, использование импульсного напряжения позволяет увеличить величину напряженности ускоряющего квазистатического поля в образце до предпробойных значений и тем самым во столько же раз повысить чувствительность устройства.



Рис. 1. Блок-схема устройства для измерения времени жизни неравновесных носителей

Выход источника импульсного напряжения последовательно соединен с емкостными контактами, выполненными в виде плотно прижимающихся к поверхности образца плоских металлических пластин с тонкими диэлектрическими прокладками и расположенными друг от друга на расстоянии размера светового пятна.

Экспрессность метода и неразрушаемость объекта исследования обеспечиваются возможностью использования таких прижимных контактов благодаря относительно малым значениям $\tau \sim 0^{-7} \div 10^{-8}$ с, что исключает процесс нанесения на исследуемую структуру омических контактов.

Во избежание наводок от постороннего излучения образец помещается в экран. Подключение образца с помощью емкостных пластин в электрическую цепь с импульсным источником напряжения позволяет существенно снизить величину падения напряжения на контактах и тем самым увеличить чувствительность устройства. Длительность импульсов напряжения t_H в данном случае должна удовлетворять условию $t_H \ll RC_K$, где R — сопротивление образца, а C_K — емкость прижимных контактов. При этом сопротивление емкостных контактов много меньше омического сопротивления образца и практически не влияет на напряженность электрического поля внутри полупроводниковой



Рис. 2. Характерный импульс фотопроводимости, регистрируемый на осциллографе

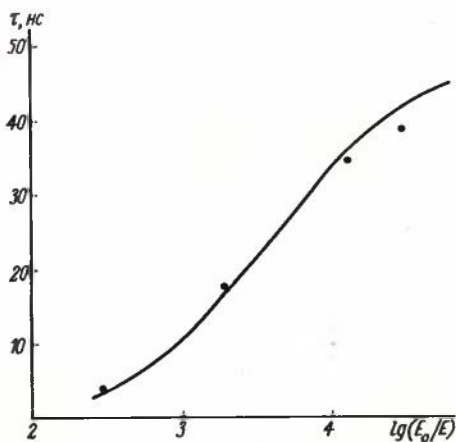


Рис. 3. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от уровня возбуждения; точками обозначены экспериментальные данные

структуры. Для импульсов фототока, длительность которых $t_{\Phi} \sim \{ \tau; t_c \} \ll t_H$, сопротивление контактов также пренебрежимо мало.

Синхронизация работы импульсных источников светового излучения и электрического напряжения в устройстве осуществляется задающим генератором, обеспечивающим такой рабочий режим, при котором фотовозбуждение неравновесных носителей в образце происходит тогда, когда к нему приложено напряжение, создающее квазистатическое электрическое поле.

Электрический фильтр представляет собой, как правило, совокупность нагрузочного сопротивления, переходной емкости и согласующего каскада, сигнал с которого поступает на регистрирующий прибор. Этим прибором может быть широкополосный осциллограф, регистрирующий форму импульса фототока, по спаду которого определяется τ , или тауметр, непосредственно выдающий показания времени жизни неравновесных носителей.

Изменение концентрации неравновесных носителей n во времени после прекращения светового воздействия описывается с учетом линейной и квадратичной рекомбинаций уравнением

$$dn/dt = -\frac{1}{\tau_0} n - \beta n^2,$$

где τ_0 — время жизни при линейной рекомбинации, β — коэффициент квадратичной рекомбинации.

Эффективное время жизни неравновесных носителей определяется соотношением $\tau = \tau_0 / (1 + \beta \tau_0 n)$.

Выражая n через энергию (A) возбуждающего лазерного излучения, получим $\tau = \tau_0 / (1 + A/A_0)$, где величина $A_0 = \delta S \hbar \omega / \beta \tau_0 (1 - r)$; δ — глубина освещаемого слоя $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ см; S — площадь освещаемой поверхности образца; \hbar — постоянная Планка; ω — частота возбуждающего излучения; r — коэффициент отражения поверхности полупроводниковой структуры.

При измерении времени жизни неравновесных носителей в структурах арсенида галлия с толщиной эпитаксиального слоя 10–17 мкм в качестве источника фотовозбуждения использовалось излучение второй гармоники лазера на YAG: Nd³⁺. Длина волны излучения равнялась 0,532 мкм, а длительность импульсов 8 нс. Импульсы фотопроводимости регистрировались на осциллографе С1-11 (рис. 2).

Время жизни неравновесных носителей измерялось в структурах с концентрацией свободных носителей заряда n_0 в эпитаксиальном слое от $5 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Типичный вид зависимости τ от энергии возбуждающего излучения приведен на рис. 3 для значения $n_0 = 3,8 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

Расчетные значения τ_0 и β , а также концентрации мелких примесей N с фактором eE/kT в зависимости от n_0 приведены в таблице.

$n_{01}, \text{см}^{-3}$	$\tau_{e1}, \text{нс}$	β	$N_e \frac{E}{kT}, \text{см}^{-3}$
$4,98 \cdot 10^{14}$	45	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{15}$
$3,84 \cdot 10^{15}$	45	$6 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{16}$
$1,74 \cdot 10^{17}$	35	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{16}$
$2,18 \cdot 10^{18}$	17	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{15}$

По этим данным легко можно провести оценки наличия примесных центров в исследуемых структурах. В частности, если считать, что линейная рекомбинация в арсениде галлия обусловлена глубокими примесями с сечением захвата $\sim 3 \cdot 10^{-16} \text{см}^2$ [1], то их концентрация для всех измеренных образцов составляет $10^{16} - 10^{17} \text{см}^{-3}$. Если принять, что процесс квадратичной рекомбинации идет через мелкие уровни с энергией E и сечением захвата $\sim 5 \cdot 10^{-14} \text{см}^2$ [2], то из полученных выше результатов следует, что величина энергии этих уровней $E < 0,1 \text{эВ}$.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет экспрессно неразрушающим способом контролировать время жизни неравновесных носителей и одновременно оценивать концентрацию мелких и глубоких примесных центров в исследуемых полупроводниковых структурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин В.И., Генкин В.Н., Соустов Л.В. Фотопроводимость полупроводящего GaAs в условиях интенсивного возбуждения. - ФТП, 1976, № 10, с. 1220-1222.

2. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел - М: ИЛ, 1962, 558 с.

Статья поступила 2 апреля 1980 г.



КРЕМНИЕВЫЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ, ВЫРАШЕННЫЕ НА ПРОФИЛИРОВАННОЙ САФИРОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Используются для изготовления полупроводниковых тензочувствительных датчиков.

Наименование параметра	Подложка	Гетероэпитаксиальный слой	Уругочувствительный элемент
Структура	Монокристаллическая	Монокристаллическая	-
Ориентация	(1012)	(001)	-
Тип проводимости	-	p	-
Удельное сопротивление, Ом·см	Изолятор	0,001-01	-
Диаметр, мм	25-40	25-40	1,5-6
Диаметр мембраны, мм	-	-	0,8-4
Толщина, мкм	100-250	1-5	-
Толщина мембраны, мкм	-	-	2-50

Пластины изготавливаются с профилем заданной топологии и глубины с кремниевым слоем на плоской стороне.

Упаковка: полистироловые коробки.

РЕКЛАМА ЭП РЕКЛАМА

КРЕМНИЕВЫЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ СО СКРЫТЫМИ СЛОЯМИ n^+ И p^+ ТИПОВ

Используются для изготовления полупроводниковых интегральных схем.

Наименование параметра	Подложка	Слой n^+	Слой p^+	Эпитаксиальный слой
Диаметр	60, 76	-	-	-
Толщина, мкм	400-500	$5 \pm 20\%$	$1,6 \pm 20\%$	$(2-8) \pm 10\%$
Поверхностное сопротивление скрытого слоя, Ом/кв.крат	-	$25 \pm 20\%$	$35 \pm 20\%$	-
Удельное сопротивление, Ом·см	10	-	-	0,3-1,5
Плотность дислокаций, см^{-2}	-	-	-	$\leq 1 \cdot 10^9$
Плотность дефектов упаковки, см^{-2}	-	-	-	$\leq 1 \cdot 10^9$

Упаковка: полистироловые коробки.

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ФОСФИДА ИНДИЯ С БУФЕРНЫМ СЛОЕМ

Используются для изготовления полупроводниковых микросхем, дискретных диодов и транзисторов.

Наименование параметра	Подложка	Буферный эпитаксиальный слой	Активный эпитаксиальный слой
Тип проводимости	Электронный, полупроводящий	Электронный	Электронный
Ориентация	(100)	(100)	(100)
Толщина, мкм	300-500	2-3 5-6	0,15-6,0 20-20
Концентрация носителей заряда, см^{-3}	$(1,1-1,2) \cdot 10^{18}$	$(5-10) \cdot 10^{17}$ $(5-10) \cdot 10^{18}$	$(0,6-5) \cdot 10^{18}$ $(5-10) \cdot 10^{18}$
Подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	-	-	2000-4000
Плотность дислокаций, см^{-2}	$(1-5) \cdot 10^9$	$(1-5) \cdot 10^9$	$(1-5) \cdot 10^9$
Площадь структуры, см^2	4-8	4-8	4-8
Плотность дефектов роста, см^{-2}	-	-	5-10

Упаковка: полистироловые коробки.



ELECTRONZAGRANPOSTAVKA

THE GENERAL SUPPLIER OF THE PRODUCTS
OF THE ELECTRONIC INDUSTRY OF THE USSR

24/2, Ul. Usievicha, Moscow 125315, USSR

Cable: Ezop Telephone: 155-49-15 Telex: 7626

Techsnabekport

Moskva 6-200 ☎ 244-32-85 📠 7239

НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИОННО- ПЛАЗМЕННОГО И ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Освоен выпуск мишеней и штабиков для ионно-плазменного и электронно-лучевого распыления диэлектрических пленок из окиси алюминия и алюмосиликатных стекол. Полученные пленки могут быть использованы в качестве защитных, маскирующих и диэлектрических слоев в МДМ- и МДП-структурах.

Мишени и штабики выпускаются в виде дисков диаметром 130 и 25 мм, толщиной 4–7 и 10–15 мм соответственно. Весовое содержание основного материала 99,9%, окиси кремния 5–30% (по требованию заказчика).

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОК

Материал пленки	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр.}}, \text{В/см}$
Окись алюминия	7	0,005	$1 \cdot 10^7$
Алюмосиликатное стекло с содержанием окиси кремния	5%	0,003	$1 \cdot 10^7$
	10%	0,002	$5 \cdot 10^7$
	30%	0,0035	$1 \cdot 10^7$

АВТОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ АРСЕНИДА ИНДИЯ— НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Структуры предназначены для производства гальваноманитных, оптоэлектронных и других приборов. Представляют собой тонкие легированные слои *n*-типа проводимости, выращенные на подложках из монокристаллического арсенида индия *n*⁺-типа с ориентацией (111) А диаметром 25 и 35 мм.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

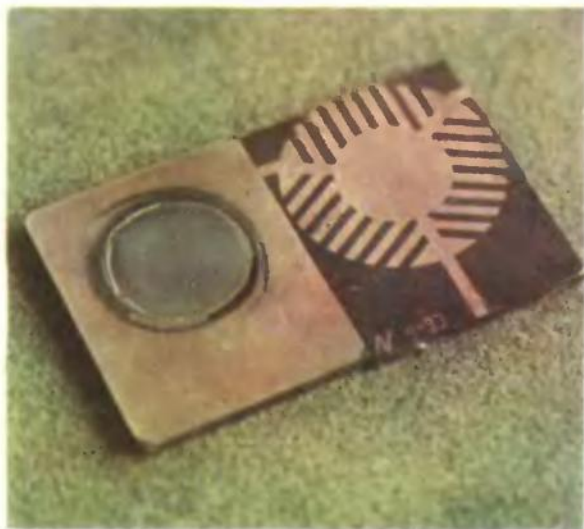
Толщина слоя, мкм 5–20
Концентрация электронов при 77К. см^{-3} $\leq 6 \cdot 10^{15}$
Подвижность электронов при 77К. $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ $\geq 5 \cdot 10^4$

Удостоены золотой медали Международной Лейпцигской ярмарки 1978 г.

ПЛЕНОЧНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ ИЗ СПЛАВА САМАРИЙ-КОБАЛЬТ

Пленочные постоянные магниты из сплава самарий—кобальт, полученные методом ионно-плазменного распыления мишени на металлическую подложку с последующей термообработкой, имеют рекордно высокую удельную магнитную энергию 104 кДж/м^3 , остаточную магнитную индукцию до 0,75 Т, коэрцитивную силу 1200 кА/м.

Магниты удостоены золотой медали Международной Лейпцигской ярмарки 1979 г.



КАТОДЫ ДЛЯ АРГОНОВЫХ И КРИПТОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Прямокальные катоды выполнены в виде спиралей с прямоугольным сечением витков. Работают при давлениях газа 13—150 Па и токах разряда 15—250 А с долговечностью 8 тыс.ч. Катоды имеют государственный Знак качества. В 1979 г. награждены дипломом и золотой медалью ВДНХ.



ДОЛГОВЕЧНЫЕ ХОЛОДНЫЕ КАТОДЫ ДЛЯ АТОМАРНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Холодные катоды с пленкой окиси магния или бериллия применяются в гелий-неоновых и гелий-кадмиевых лазерах. Характеризуются повышенной устойчивостью к катодному распылению в тлеющем разряде, низким уровнем шумов, высокой механической прочностью, долговечностью 5000—50000 ч, что позволило создать отечественные лазеры с высокой надежностью. Рассчитаны на работу при низких давлениях гелий-неоновой смеси и разрядных токах 5—50 мА.

Катоды имеют государственный Знак качества, в 1979 г. награждены золотой медалью ВДНХ.



ПЛЕНОЧНЫЕ ХОЛОДНЫЕ КАТОДЫ ДЛЯ АТОМАРНЫХ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Пленочные холодные катоды с активным покрытием из окиси бериллия имеют рабочие токи 40—50 мА, отличаются повышенной виброударопрочностью. Их долговечность в среде гелия с добавками неона или кадмия при давлениях $1,3-6,7 \cdot 10^2$ Па составляет 5000—50000 ч.

В 1979 г. катоды награждены золотой медалью ВДНХ, в 1980 г. — золотой медалью Международной Лейпцигской ярмарки.



ПЛЮЩЕНКА ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Плющенко из вольфрама и молибдена предназначена для изготовления деталей спиральной формы, в частности плющенко из вольфрама — для создания катодов мощных генераторных ламп.

Повышенная пластичность плющенко, обусловленная применением ультразвукового и электропластического способов обработки, позволяет изготавливать из нее детали сложной формы.

В 1978 г. плющенко из вольфрама и молибдена награждена бронзовой медалью ВДНХ.



ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Материал плющенко	Толщина, мм	Ширина, мм	Шероховатость поверхности R_a , мкм
Вольфрам	$(0,1 \div 0,6) \pm (0,005 \div 0,01)$	$(0,2 \div 2,6) \pm (0,005 \div 0,01)$	$\leq 0,63$
Молибден	$(0,025 \div 0,2) \pm (0,003 \div 0,005) \pm (0,1 \div 0,3)$	0,005	$\leq 0,63$

ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ

Электродные эрозионностойкие материалы из спеченного вольфрама с оксидами редкоземельных элементов применяются в качестве электродов источников высокоинтенсивного оптического излучения, работающих в импульсном или дуговом режимах в широком диапазоне энергий и мощностей разряда. Они имеют повышенную по сравнению с торированным вольфрамом эрозионную стойкость в эмиссии, что обеспечивает увеличение долговечности приборов в 2–5 раз. В материале нет токсичной присадки, поэтому не требуется соблюдения особых санитарных условий при их изготовлении и использовании.

В 1979 г. материалы награждены золотой медалью ВДНХ.



УДК 681.3:621.315.61

И. И. Горянина, Г. А. Иванова,
Ю. В. Кириллов, А. М. Стадник

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС "ОКСИН-3"

Комплекс оборудования обеспечивает низкотемпературное осаждение диэлектрических пленок с равномерностью толщины по пластине $\pm 7,5\%$ и плотностью проколов не более 1 см^2 при скорости осаждения 20–30 нм/мин.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС широкое применение в качестве защитных покрытий и межслойной изоляции нашли низкотемпературные пленки двуокиси кремния, которые обычно легируются фосфором [1, 2].

Эти пленки получают в основном методом осаждения из газовой фазы (окислением моносилана и легирующих гидридов), обеспечивающим высокое качество диэлектрических слоев.

По мере усложнения ИС и полупроводниковых приборов требования к качеству осаждаемых слоев повышаются. Поэтому основной целью разработки оборудования для осаждения низкотемпературных диэлектрических пленок является решение проблемы получения слоев высокого качества.

В табл. 1 приведены технические характеристики установок "Оксин-1", "УНДЛП-2" и автоматизированного комплекса для осаждения низкотемпературных диэлектрических пленок "Оксин-3".

Таблица 1

Технические характеристики оборудования для получения диэлектрических пленок

Характеристика установки	"Оксин-1"	УНДЛП-2	"Оксин-3"
Максимальный диаметр обрабатываемых пластин, мм	75	60	100
Производительность для пластин диаметром 75 мм, шт./ч	~30	18	35
Равномерность по толщине, %	± 10	± 10	$\pm 7,5$
Уровень автоматизации	Не автоматизированы		Возможна работа в автоматическом режиме

Установка "Оксин-1" имеет цилиндрический реактор, "Оксин-3" – горизонтальный с вытеснением потока. Оба типа реакторов обеспечивают примерно одинаковое качество диэлектрических слоев (плотность проколов – около одного на квадратный сантиметр для пленки ФСС толщиной 1 мкм).

Однако реактор горизонтального типа более прост в эксплуатации и обладает большей надежностью.

Автоматизированный комплекс "Оксин-3" включает установку осаждения диэлектрических пленок, установку очистки газов и устройство создания области ламинарного потока обеспыленного воздуха в зоне загрузки-выгрузки. Газовая система комплекса обеспечивает автоматическое поддержание и регулирование расхода реагентов с точностью не хуже $\pm 2\%$ в диапазоне от 0 до $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ с помощью ряда автоматических систем для регулирования и поддержания расхода газов – моносилана, фосфина, кислорода. Принципиально новая элементная база, включающая пневматические клапаны, шаровые вентили и обратные клапаны, обеспечивает герметичность газовой системы и возможность работы с токсичными газами. Использование управления пневматическими клапанами с помощью электромагнитных дало возможность в целях обеспечения безопасности работы вынести электромагнитные клапаны из газового блока.

Установка для осаждения пленок представляет собой трехреакторную систему, каждый реактор которой работает независимо. Длина реактора (рис. 1) – 1000 мм, сечение – прямоугольное ($250 \times 60 \text{ мм}$), материал – нержавеющая сталь. Внутри камеры установлен резистивный нагреватель в виде трубчатых электронагревателей длиной 360 мм с равномерным распределением температуры ($\pm 10^\circ\text{C}$) по длине 320 мм. Нагреватель представляет собой графитовую плиту ($240 \times 330 \text{ мм}$), на поверхности которой помещается подложкодержатель с пластинами. Один конец реактора соединен с металлическим основанием, на котором смонтировано газовпускное устройство, а другой – с вентиляцией посредством вытяжного канала. Загрузка-выгрузка пластин производится через загрузочные люки с дверью, причем дверь может открываться только по окончании процесса. Три реакционные камеры (рис. 2) располагаются одна под другой, что

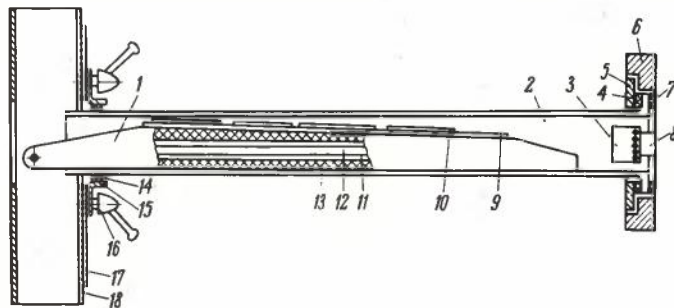


Рис. 1. Схема реактора установки осаждения диэлектрических пленок: 1 – нагреватель; 2 – реакционная камера; 3 – диффузор; 4, 7, 14 – прокладка; 5 – планка; 6 – передняя головка; 8 – штуцер; 9 – кварцевая плита; 10 – кремниевая пластина; 11 – термопара; 12 – трубчатый электронагреватель; 13 – графитовая плита; 15 – передвижной кронштейн; 16 – зажимной винт; 17 – зажимное устройство; 18 – вентиляционный кожух.

обеспечивает сокращение площади и удобство обслуживания.

Газовая система комплекса испытывалась на герметичность избыточным давлением. Место течи определялось с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-7А специально разработанным методом зонда. Испытуемая газовая система при этом наполнялась гелием до давления $4 \cdot 10^5$ Па. Места течи определялись зондом, который через форвакуумный насос соединялся с гелиевым течеискателем. Данный метод обеспечивает определение места утечки в разветвленных трубопроводах и элементах газовой системы.

Как правило, степень очистки магистральных газов, например азота, сравнительно невысока (точка росы -65°C), поэтому для получения высококачественных слоев необходима дополнительная финишная очистка газов. Различные типы установок для очистки газов обычно не имеют автоматического управления режимом работы, что затрудняет применение их в составе автоматизированного оборудования. Поэтому для комплекса была разработана установка финишной очистки газовой среды, обеспечивающая непрерывную очистку газов с помощью двух фильтров, один из которых находится в режиме очистки, а другой — в режиме регенерации. Смена режимов осуществляется автоматически.

Комплекс "Оксин-3" внедрен в промышленную эксплуатацию. В его реакционную камеру одновременно могут загружаться 16 пластин диаметром 60 мм, 9–12 пластин диаметром 75 мм или 4 пластины диаметром 100 мм. Равномерность осаждаемых слоев в условиях оптимальных режимов при скорости осаждения 20–30 нм/мин не хуже $\pm 7,5\%$.

На рис. 3 представлена линейная зависимость скорости осаждения пленки от расхода моносилана

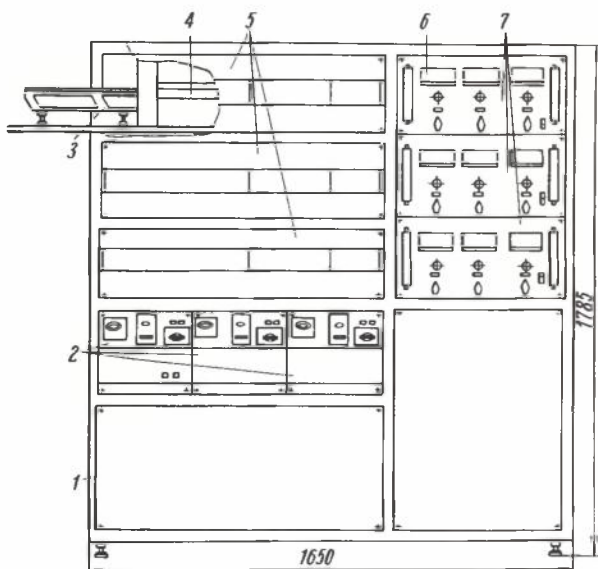


Рис. 2. Схема установки осаждения диэлектрических пленок: 1 — станина; 2 — блоки ограничения температуры; 3 — направляющая; 4 — нагреватель; 5 — реакционные камеры; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — газораспределительные панели

при температуре $T_{\text{const}} = 450^\circ\text{C}$; на рис. 4 — зависимость скорости осаждения пленки от температуры при постоянном расходе азота 70 л/мин, моносилана — 0,9 л/мин и отношении $\text{O}_2 : \text{SiH}_4 \approx 8$ (содержание SiH_4 в Ar составляет 4%). Длительность процесса осаждения слоя толщиной 1 мкм при скорости 50 нм/мин не более 30 мин для каждого реактора.

При эксплуатации комплекса были выявлены характер и основные причины неравномерности осаждаемых слоев ФСС в реакторе — отклонение от оптимального режима осаждения, негерметичность камеры в месте впуска газа, неточная установка подложкодержателя (табл. 2) — и определены возможности их устранения.

Таблица 2
Характер и основные причины неравномерности осаждаемых слоев ФСС в реакторе

Характер неравномерности слоев ФСС	Причина
Толщина пленки у газовпускного устройства меньше, чем в противоположном конце реактора	Большой расход кислорода
Толщина пленки у газовпускного устройства больше, чем в конце реактора	Малый расход кислорода
Толщина пленки у одного края подложки больше, чем у другого	Несимметричное расположение нагревателя относительно газовпускного устройства
Толщина пленки у одного угла больше, чем у другого	Натекание воздуха при негерметичном уплотнении трубы со стороны газовпускного устройства
Отсутствует воспроизводимость по толщине пленки от процесса к процессу	Натекание воздуха при негерметичном уплотнении трубы со стороны газовпускного устройства
При проведении процесса без кислорода на пластинах образуется слой SiO_2 ; диэлектрический слой не осаждается или значительно тоньше требуемого	В азоте в больших количествах присутствует кислород

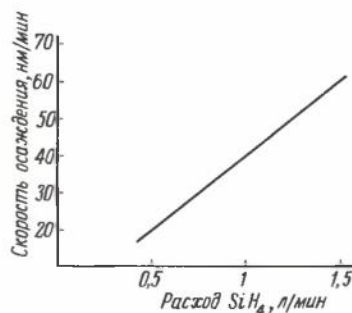


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения пленки от расхода 4%-ного моносилана в аргоне при $T = 450^\circ\text{C}$

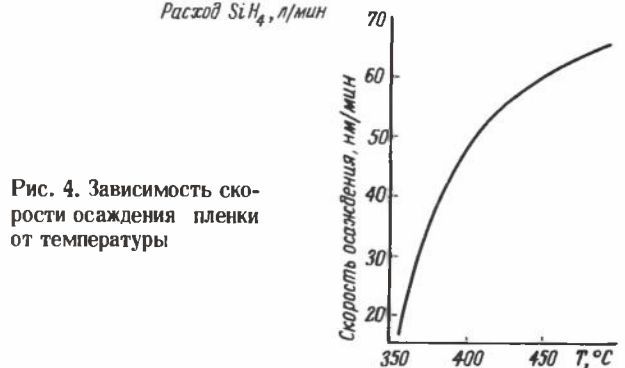


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения пленки от температуры

Качество низкотемпературного диэлектрического слоя определялось по количеству включений в виде частиц и радужных пятен, а также по диэлектрической прочности, сплошности и равномерности. Как правило, включения в виде частиц (в основном размером более 1 мкм) оказывают значительное влияние на процесс фотолитографии. Включения в виде радужных пятен нарушают целостность пленки и ведут к пробое. Подсчет количества включений проводился по двум взаимно перпендикулярным диаметрам в светлом поле микроскопа при увеличении $100\times$.

Основными причинами образования включений являются недостаточная степень чистоты реакционных камер и кварцевых подложек. Для получения слоев с минимальным количеством включений необходимо после каждого осаждения пленок толщиной 15 мкм проводить очистку реакционной камеры и кварцевых подложек травлением в растворе плавиковой кислоты.

Установлено, что не все включения ведут к пробое. Это было показано путем подсчета включений по двум перпендикулярным диаметрам, по которым подсчитывалось и количество пробоев. При условии проведения очистки нагревателей не реже одного раза в смену, когда число включений, считая радужные пятна, в среднем равно 10, коли-

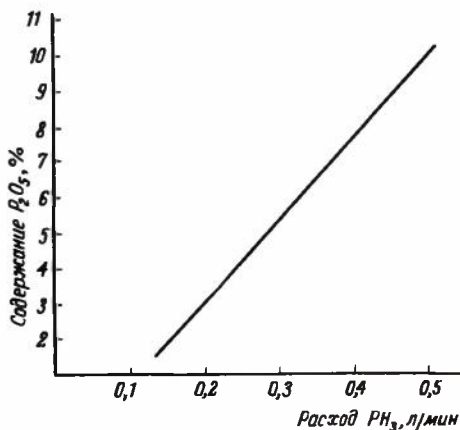


Рис. 5. Зависимость содержания P_2O_5 в пленке ФСС от расхода PH_3 (1,5% в аргоне)

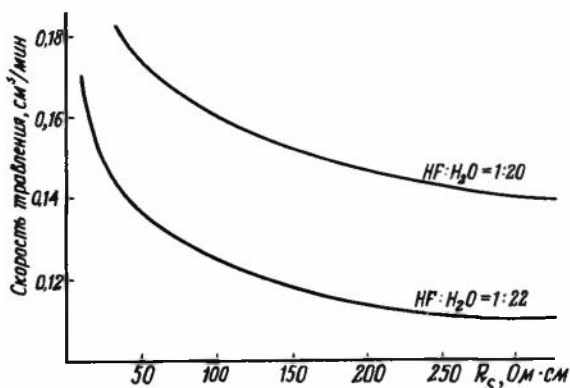


Рис. 6. Зависимость скорости травления пленки ФСС от поверхностного сопротивления

чество пробоев по двум перпендикулярным диаметрам не превышает $1-2 \text{ см}^{-2}$.

Концентрация P_2O_5 в пленке ФСС определялась по значению поверхностного сопротивления R_s на пластине КДБ-7,5 после термической обработки в течение часа в среде азота, а также с помощью ИК спектроскопии [3]. Содержание P_2O_5 в пленке зависит от расхода PH_3 (рис. 5). Зависимость скорости травления пленки ФСС в буферном травителе от концентрации P_2O_5 (поверхностного сопротивления) в пленке представлена на рис. 6.

Анализ качества слоев показал, что разработанный комплекс может быть использован в современном производстве ИС и полупроводниковых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Werner Kern. Chemical vapor deposition systems for glass passivation of integrated circuits. — Solid-State Technol., 1975, Dec., vol. 18, N 12, p. 25-33.
2. Werner Kern. Chemical vapor Deposition techniques for glass passivation of semiconductor devices. — Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron. Conference NAECON, New York, 1975, p. 93-100.
3. Clark Beck. Phosphorus concentration in low temperature vapor deposited oxide. — Solid-State Technol., 1977, Dec., vol. 120, N 9, p. 58-60.

Статья поступила 18 апреля 1980 г.



ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ
АРСЕНИД-ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Структуры предназначены для изготовления цифро-буквенных индикаторных устройств в дискретном и матричном исполнении красного, оранжевого и желтого свечения.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

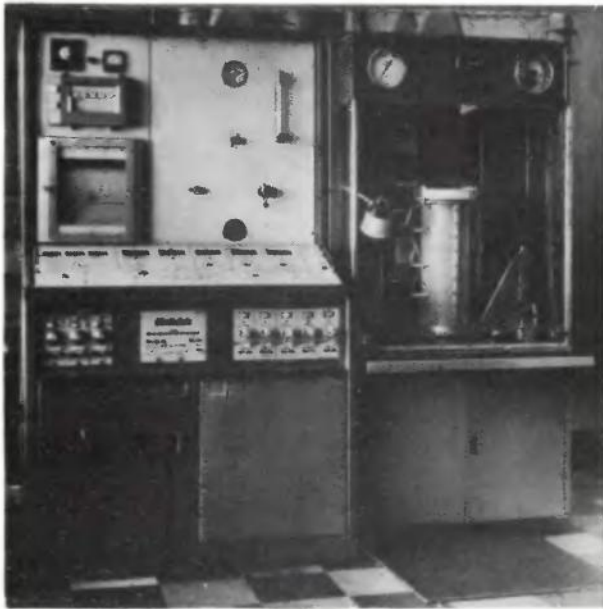
Материал	Подложка			Эпитаксиальный слой	
	GaAs	GaP	GaAs _{1-x} P _x	GaAs _{1-x} P _x	GaAs _{1-x} P _x
Легированная примесь	Ge, Si	S, Ge	Te, Se	Te, Se, N	Te, Se, N
Концентрация носителей, см ⁻³	$10^{17}-5 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}-2 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{18}-2 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{18}-2 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18}-1 \cdot 10^{19}$
Ориентация	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
РазорIENTATION, град.	1-3	4-6	-	-	-
Содержание фосфита галлия, %	-	-	36-40	65-70	85-92
Толщина, мкм	350-400	300-350	-	-	-
Толщина основного слоя	-	-	30	40	50
Толщина переходного слоя	-	-	20	20	20
Изоляция структуры, см ²	-	-	6-20	6-20	6-20
Удельная яркость тестовых диодов, кд·м ⁻² ·А·см ⁻²	-	-	>170	>100	>200
Длина волны излучения в максимуме, нм	-	-	645-665 (красный)	610-645 (оранжевый)	575-595 (желтый)

Упаковка: полистироловые коробки.

УДК 539.231

А. Е. Алексанов, М. Н. Алексеев, Б. И. Мясников

УСТАНОВКА 02 ЭЖС40-1 ДЛЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО НАРАЩИВАНИЯ АРСЕНИДА ИНДИЯ



Техническая характеристика

Давление газов в каналах, кПа	20–30
Точность поддержания расхода газов по всем каналам, %	± 3
Скорость вращения подложкодержателя, об/мин	10 ± 2
Стабильность поддержания установленного профиля температуры, °С	± 1
Градиент температуры в зоне расположения подложек на длине 100 мм, °С	± 1
Точность воспроизведения заданного профиля температуры, °С	± 2
Равномерность профиля температуры по заданной окружности, °С	± 2
Потребляемая мощность, кВт	15
Габариты, мм	2000 × 1000 × 2025
Масса, кг	1450

Установка выполнена на базе ПХО-ГАФГ-30-1 и предназначена для получения эпитаксиальных пленок арсенида индия на монокристаллических подложках хлоридно-гидридным методом из газовой фазы.

В состав установки входят рабочий стол, шкаф газораспределения и шкаф управления.

На рабочем столе расположена нагревательная камера, представляющая собой трехсекционную печь сопротивления с тремя различными по температуре самостоятельно регулируемым зонами. В печи помещается кварцевый реактор, внутри которого находится вращающийся пьедестал с подложками. Предусмотрена возможность отдельного вертикального возвратно-поступательного перемещения печи и реактора от гидропривода. В нижней части реактора имеются патрубки для ввода и вывода технологических газов.

В шкафу газораспределения находятся баллоны с технологическими газами, регулирующая арматура и соединительные трубопроводы, в шкафу управления — источники питания, силовые цепи, цепи управления технологическим процессом в ручном и автоматическом режимах.

Установка позволяет одновременно получать 14 структур диаметром до 35 мм.

Статья поступила 10 июня 1980 г.

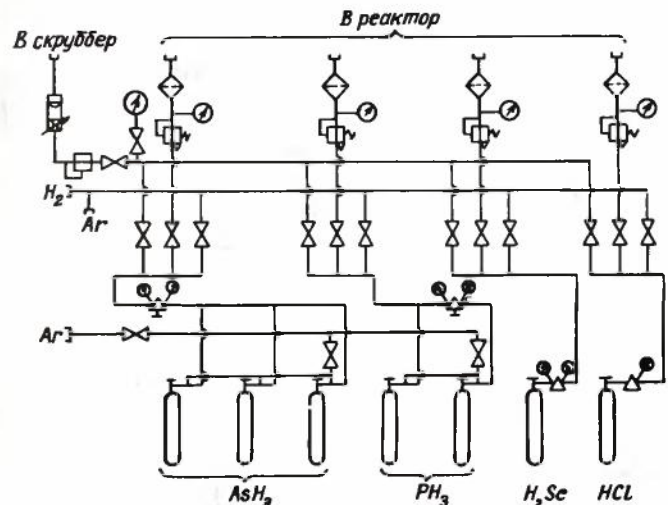
УДК 621.382.002.5

А. Е. Алексанов, М. Н. Алексеев, А. А. Ильичева

БЛОК ГАЗОНАПУСКА

Предназначен для смешивания и подачи технологических газов в производстве эпитаксиальных структур.

Блок газонапуска представляет собой герметичный металлический шкаф, внутри которого установлены баллоны с технологическими газами и газораспределительная арматура, устойчивая к воздействию этих газов. Схема газораспределения показана на рисунке.



Техническая характеристика

Число устанавливаемых баллонов (ГОСТ 949–73)	7
Применяемые газы	арсин, фосфин, хлористый водород, селеноводород или теллуридоводород
Давление газов на выходе, Па	4·10 ⁻⁵ –10 ⁵
Габариты, мм	1710×735×2010

В блоке осуществляется фильтрование и смешивание газов, регулирование и контроль их давления, имеется возможность опрессовки линий высокого и низкого давления. Блок снабжен звуковой и световой сигнализацией, действующей при открывании дверей, системой вытяжной вентиляции.

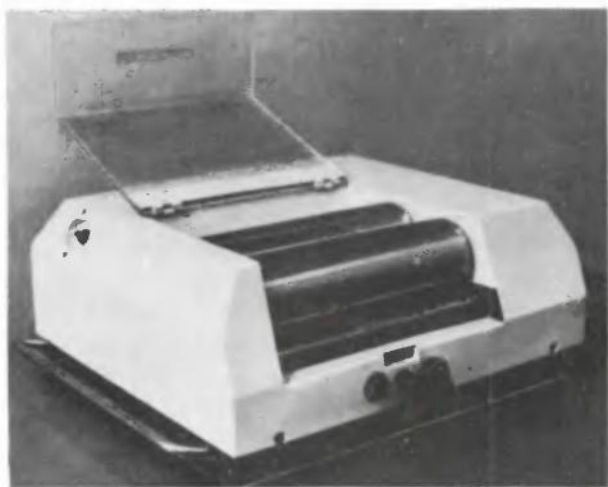
Статья поступила 1 апреля 1980 г.

УДК 621.315.592.079.002.5

И. Е. Васильев, Ю. А. Коровин

УСТАНОВКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПАСТ

Установка предназначена для приготовления небольших количеств проводниковых, резистивных и диэлектрических паст, применяемых в производстве толстопленочных микросхем.



Техническая характеристика

Количествоготавливаемой пасты, г	15-50
Размеры валков, мм:	
диаметр	80
длина	250
Частота вращения, оборотов/с	
заднего валка	2,50; 2,08; 1,67
переднего валка	0,83; 0,70; 0,55
Величина зазора между валками, мм	0-1(±0,01)
Цена деления отсчетного лимба, мм	0,01
Привод валков	реверсивный
Мощность электродвигателя, кВт	0,12
Напряжение питания, В	220
Габариты, мм	390×450×205
Масса, кг	53

Рабочий узел установки состоит из двух валков (переднего и заднего). Для приготовления проводниковых и резистивных паст применяются металлические валки, для диэлектрических паст — валки с капролоновой рубашкой, защищающей пасты от металлических включений.

Задний валок смонтирован в стойках основания, которые являются направляющими "ласточка на хвоста". Основание закреплено в поддоне и несет на себе основные узлы установки.

Опоры переднего валка с направляющими "ласточка на хвоста" представляют собой каретку, обеспечивающую сохранение параллельности оси валка при ее перемещении. Перемещение каретки осуществляется микрометрическим винтом, на котором установлен лимб.

Привод валков обеспечивается электродвигателем посредством ступенчатой клиноременной передачи и двойного червячного редуктора. Задний валок вращается в три раза быстрее переднего. Частота вращения валков имеет ступенчатую регулировку. Рабочее вращение валков — встречное с захватом пасты сверху. Нанесенная на передний тихоходный валок паста захватывается и перемешивается быстроходным задним валком. Благодаря небольшим рабочим зазорам между валками паста в процессе перемешивания растекается вдоль валков. Снятие и возвращение растекающейся к краям валков пасты производится шпателем вручную. В нише под валками установлена съемная ванночка для сбора случайно оброненной пасты.

Установка стоит на четырех резиновых амортизаторах. Для обеспечения виброгашения и звукоизоляции кожух изнутри оклеен поропластиком.

Эксплуатация установок данного типа показала рациональность их использования для мелкосерийного и многономенклатурного производства толстопленочных микросхем, когда требуется приготовление различных паст в небольших количествах.

По сравнению с винтовыми мешалками, применяемыми для изготовления однотипных паст в больших количествах, разработанная установка характеризуется более простой конструкцией и удобством очистки после окончания процесса.

Пасты, полученные на установке, соответствуют ОСТ 25796-79, обеспечивают заданные удельное сопротивление и ТКС, разброс по номиналу в схемах ±20%, а также необходимые реологические свойства.

Статья поступила 18 апреля 1980 г.

УДК 621.3.049.772.2.002.5

В. Н. Филатов, Л. В. Щербаков

УСТАНОВКА НАНЕСЕНИЯ ПАСТ

Установка применяется при изготовлении толстопленочных микросхем со сложным рисунком повышенной четкости: БГИС, термопечатающих матриц, СВЧ схем.

Нанесение паст на подложки является одной из основных операций производства микросхем по толстопленочной технологии. Качество нанесения во многом определяется совершенством оборудования.

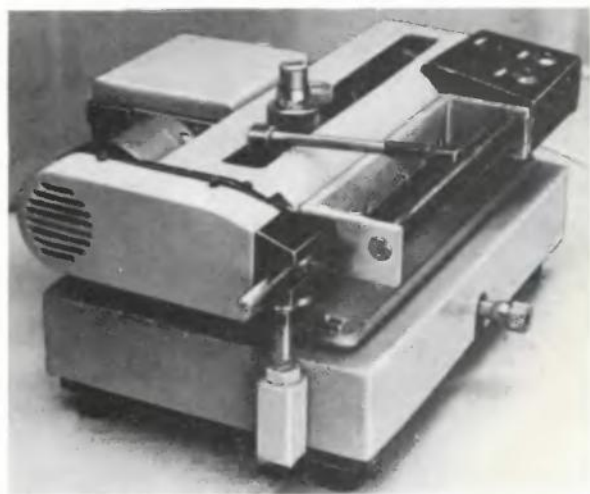
Установки для нанесения паст можно разделить на две группы. К первой группе относятся автоматические и полуавтоматические установки, которые недостаточно универсальны, сложны по

конструкции, в наладке и обслуживании, но характеризуются точностью и стабильностью нанесения. Во вторую группу входят простейшие установки типа микрометрических столиков с ручным приводом ракеля, обладающие универсальностью, но не обеспечивающие достаточной стабильности и хорошего качества нанесения, что объясняется влиянием субъективного фактора на технологические параметры (скорость, давление ракеля).

Высокая производительность автоматического оборудования не всегда экономически оправдана, поскольку толсто пленочная технология находит широкое применение не только при массовом выпуске микросхем одного типа, но и при единичном выпуске широкой номенклатуры микросхем частного применения. Поэтому на производственном участке или в экспериментальной лаборатории, которые должны быть укомплектованы несколькими устройствами для нанесения разных паст при использовании подложек разных типоразмеров, коэффициент загрузки оборудования недостаточно высок.

Изготовлено и испытано устройство нанесения паст, предназначенное для контактной и бесконтактной печати на промышленных участках мелкосерийного производства микросхем и в лабораториях, которое обладает универсальностью и простотой конструкции.

Устройство настольного типа состоит из микрометрического столика и блока печати.



Техническая характеристика

Поле печати, мм.....	50×150
Ход ракеля, мм.....	150
Скорости ракеля, мм/с.....	20; 45; 85
Возврат ракеля.....	ручной
Пределы регулировки по осям X и Y, мм.....	± 4,5
Пределы угловой регулировки, град.....	± 5
Мощность привода, Вт.....	18
Напряжение питания, В.....	220 (50 Гц)
Габариты, мм.....	355×255×185
Масса, кг.....	15

Микрометрический столик служит для установки и фиксации подложек и трафарета. Подложки устанавливаются в сменные многоместные кассеты и имеют двойное крепление: механическое (зажимами кассеты) и вакуумное (от вакуумной магистрали). Установка может быть снабжена комплектом сменных кассет для подложек размерами 11×11; 9,5×20,5; 24×36; 48×60 мм или другими в пределах поля печати. Совмещение трафарета с подложками осуществляется микрометрическими винтами, регулировка зазора между трафаретом и подложками — винтами трафарета. Предусмотрена работа с трафаретными рамками от широко распространенных микрометрических столов с ручным приводом ПШ-40—48.

Блок печати включает в себя направляющие, каретку ракеля, привод и пульт управления, установленные на плите, которая может откидываться относительно микрометрического столика. Привод имеет клиноременную и винтовую передачи, соответствующие трем скоростям. Каретка ракеля сцепляется с винтом с помощью зажимной гайки, включающейся от рукоятки. Ракель снабжен винтом настройки давления. Управление приводом осуществляется от пульта. Блок печати регулируется относительно микрометрического столика и фиксируется в рабочем положении с помощью клиновых замков.

Формирование слоев при испытаниях установки осуществлялось методом сеткографии через сетчатые трафареты (сетки № 67, 004 и 0071) и методом контактной печати через биметаллические трафареты. Были использованы проводниковые пасты ПП-1, ПП-3, диэлектрические пасты ПК-1000-30, ПИ-14, ПИ-50, резистивные пасты ПР на основе серебра и палладия и ПТР на основе соединений рутения. В качестве органических составляющих паст применялись ланолин, канифоль, вакуумное масло, этилцеллюлоза и α-терпинеол. Вязкость паст, определяемая по растекаемости навески пасты 0,15 г под грузом 250 г, соответствовала 16—25 мм.

Испытания показали, что установка обеспечивает значительно более высокую четкость отпечатка и равномерность толщины слоя при нанесении рисунка по сравнению с микрометрическим столом, имеющим ручной привод.

Простота конструкции, удобство эксплуатации, возможность перестраивания с одной схемы на другую позволяют эффективно использовать установку для нанесения паст при изготовлении толсто пленочных изделий со сложным рисунком слоев, имеющим большое число протяженных линий и требующим повышенной четкости.

Статья поступила 18 апреля 1980 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И КАДРЫ

ЛУЧШИЕ ТЕХНОЛОГИ ОТРАСЛИ

ПРЕДВИДЕТЬ ЗАВТРАШНИЙ ДЕНЬ



Розе Егоровне Хитровой – технологу участка нанесения люминофорных покрытий – до сих пор памятен тот день, когда она взяла в руки долгожданный экран для цветного кинескопа с наконец-то получившимися точками триад. Радость того дня, волнение и чувство глубокого удовлетворения от проделанной работы и определили ее выбор в жизни. С этого момента начинается отсчет ее маленьких и больших трудовых побед на посту технолога.

Освоение выпуска первых кинескопов проходило нелегко. Были теоретические знания, но опыт практической работы пришел не сразу. Не раз Р.Е.Хитрова обращалась с вопросами к кадровым рабочим, специалистам других участков, изучала пособия, справочники, допоздна засиживалась за технологическими картами. Чтобы выяснить причины "вспышек" брака, надо было разложить техпроцесс на главные и второстепенные составляющие.

Большую пользу принесли поездки на родственные предприятия. Блокноты заполнялись цифрами, расчетами, сведениями. Ее производственный опыт пополнялся новыми приобретениями.

Первой среди технологов участка Роза Егоровна Хитрова организовала в своей смене производственные "летучки", где знакомила рабочих с прогрессивными приемами труда. Особенностью пятиминутки – прообраза будущих целевых курсов повышения квалификации – было то, что на них она не только рассказывала о причинах возникновения брака на данной операции, но и наглядно показывала, как его устранить.

Хитрова сумела повысить ответственность исполнителей, делая акцент не на выписывании листов депремирования, а на разъяснении последствий некачественной работы.

Анализ многочисленных экспериментов, поставленных Р.Е.Хитровой и технологом участка первых испытаний Н.М.Жильцовой, позволил создать систему исследования истинных причин брака.

Если раньше о причинах "вспышек" некоторых видов брака говорилось лишь предположительно, то теперь стало ясно, какие рычаги производственного механизма следует задействовать, чтобы исключить неполадки. На основе полученных выводов были разработаны организационно-технические мероприятия, после внедрения которых удалось снизить нормативные потери более чем на 20% и значительно сократить разновидности брака.

Росло деловое сотрудничество Хитровой с технологами других смен, участков. Так, совместный анализ отчетов по браку типа "невыведение" привел к необходимости скорейшего внедрения жесткого спейсера. В результате качество кинескопов значительно повысилось.

Вот уже несколько лет подряд Розу Егоровну Хитрову называют в числе лучших рационализаторов предприятия. Не один год она работала над ликвидацией такого ранее распространенного вида брака, как "свертывание суспензии". На линии нанесения люминофора сейчас освоены технологические операции по двойному раскручиванию суспензии, что позволило значительно улучшить качество покрытий.

Большую часть своих рационализаторских предложений Роза Егоровна подает в соавторстве с другими специалистами. Так, была исключена из техпроцесса операция "сушка экранов", которая производилась ранее при помощи энергоемких ламп. Теперь подложку наносят на влажную внутреннюю поверхность экрана. При этом упростилась технология, ежегодно экономия составляет 112 тыс. кВт ч электроэнергии.

Пожалуй, нет на участке ни одного новшества, к разработке которого Роза Егоровна не имела бы непосредственного отношения. Многие из ее творческих находок нередко являлись закономерным

продолжением разговора, начатого на семинаре "Опыт комплексного управления качеством", которым руководит главный технолог предприятия В.В.Селютин.

Одно из намеченных личным творческим планом предложение по улучшению качества печати, поданное в соавторстве с инженером-юстировщиком А.Н.Четкиным, стабилизирует размер точки, сокращает брак типа "отлипание". Продолжается работа по напылению линз и выбору оптимальной прозрачности их для каждого цвета.

В десятой пятилетке достигнуты существенные результаты, в которых есть доля труда и технолога Р.Е.Хитровой: повышена яркость выпускаемых цветных кинескопов более чем в 1,3 раза, увеличена их долговечность, а главное — непрерывным потоком из цеха, носящего звание "Цех высокой культуры производства", движутся по конвейеру цветные кинескопы с государственным Знаком качества.

Свой производственный опыт по совершенствованию приемов труда, передовые навыки она охотно передает товарищам, являясь председателем цехового методического совета 23 школ коммунистического труда. Под контролем Хитровой составление учебной тематики для этих школ, подготовка обзорных лекций, проведение показательных занятий. Все это способствует неуклонному росту ее технических знаний, умение видеть перспективы завтрашнего дня.

О. А. Полукеев

В ЕДИНСТВЕ С КОЛЛЕКТИВОМ



В стекольном цехе привычно видеть Раису Сергеевну Воронецкую. Легко и быстро проходит она к прессам, останавливается у мощных машин,

следа за их работой. Сосредоточенная, серьезная, держится естественно, привычно. По всему видно, что это опытный специалист.

Начальник бюро стекла, главный технолог завода Раиса Сергеевна трудится здесь с 1966 года и в ответ на добросовестную работу, умение последовательно решать важные для производства вопросы, взыскательность к самой себе, чуткое отношение к людям и справедливую к ним требовательность снискала всеобщее уважение. В ее характере привлекает многое, но что самое главное, она — истинный человек труда, ощущающий себя в единстве с коллективом. С любовью выполняет она многообразные обязанности технолога. Да и как не любить эту профессию. Ведь от технологии зависит судьба выпускаемого изделия. Раиса Сергеевна контролирует правильность соблюдения режимов технологических процессов, добивается их усовершенствования, участвует в отработке инструмента и оснастки.

Молодым специалистом после окончания Ленинградского технологического института поступила Раиса Сергеевна на стекольный завод. Здесь представилась возможность применить свои знания, получить производственную закалку. А потом был другой завод, самое его зарождение. "Мы приехали сюда мастерами, нам предстояло "выводить" стекловаренную печь, — вспоминает Раиса Сергеевна. — Стали мастерами смен, а после реорганизации в цехе — технологами. Потом меня перевели в бюро стекла. Долго была технологом. Позднее, когда предложили стать начальником, я согласилась".

Опыт работы со стеклом уже был немалый, впереди ждала интересная перспектива. Ведь стекло — многообещающий материал. Многое в нем еще не разгадано. И процесс его изготовления еще нуждается в усовершенствовании.

"Сейчас завод переходит на изготовление новой продукции. Уже наваривается печь. Все начинается сначала. Продукция будет иметь ряд специфических особенностей, а значит, предстоят новые трудности, — говорит Воронецкая. — Чаше всего работаем в контакте со старшим технологом цеха. Следим за устранением брака. Весь технологический процесс изготовления стеклодеталей разработан у нас в бюро. Немало новшеств уже внедрено. Например, чтобы ликвидировать брак "цветная полоса", были установлены мешалки в фидере (перемешивание стекла является положительным фактором, поскольку при этом улучшается однородность массы). Основная задача состоит в том, чтобы не только курировать стекольное производство, но вместе с цехом отрабатывать новую технологию, внедрять и совершенствовать ее".

Особенности новой продукции, о которой говорит Раиса Сергеевна, определяются тем, что она изготавливается из стекла разного по составу, более высокотемпературного. Кроме того, детали изделий должны точно соответствовать геометри-

ческим размером. Отсюда жесткие требования к пресс-инструменту и оборудованию.

Раиса Сергеевна Воронецкая, активно содействуя повышению выхода годных стеклоизделий, внедряет новую технологическую оснастку. Она разработала условия конкурса по безлокальной обработке сферы, в результате внедрения которой уменьшится трудоемкость, а также сократится число работников, занятых в производстве. Будучи человеком целеустремленным, Воронецкая не отстает от принятых решений, направленных на усовершенствование технологии, внедрение новых процессов, и, как правило, добивается успеха.

"Мы работаем вместе в отделе уже 10 лет — говорит зам. главного технолога завода Г.В.Элкин. — Я знал Воронецкую и раньше, когда она была начальником участка стекольного цеха. Это очень опытный инженер, прекрасно знает стекольное производство. Пользуется большим авторитетом. Непосредственно под руководством Воронецкой освоено немало новых изделий. Вся существующая технология создана под ее руководством. Взять хотя бы варку качественного стекла на печах непрерывного действия. Не все здесь ладилось сначала, случался и массовый брак. А благодаря работе Воронецкой и технологов стекольного цеха этот процесс сейчас полностью отлажен. Или, например, технология сварки изделий. Процент выхода годных среди них раньше всегда был низкий, а сейчас он постоянно выше планового, особенно последние три года".

Недавно вместе со своими коллегами Раиса Сергеевна предложила частично заменить калиевую селитру, используемую в качестве сырья, менее дефицитным поташом.

Подготовка к выпуску новых изделий — сегодня основная задача на заводе и вообще в стекольном производстве. Чтобы решить ее, понадобилось перестроить стекловаренную печь. Сейчас уже заканчивается ее наладка. Без помощи работников бюро стекла здесь не обошлось. Вся работа, предшествовавшая реконструкции печи — подача заявки на огнеупоры и на металл, получение чертежей от проектных организаций, составление графиков подготовки производства и ремонта печи, графиков выводов и приварки — велась при непосредственном участии и под руководством Воронецкой.

Как коммунист, она ведет большую общественную работу: осуществляет контроль за выполнением социалистических обязательств, проведением политинформаций, выполнением личных творческих планов. По итогам соцсоревнования 1979 года Раисе Сергеевне Воронецкой был вручен почетный диплом победителя.

Т. И. Боровская

В ОБЪЕКТИВЕ — КАЧЕСТВО



Гаврылюк Богдан Александрович — лучший технолог объединения. Его трудовой путь начинался с технического училища, окончив которое он пришел работать на завод электромонтером. Потом служба в армии и, наконец, осуществление заветной мечты — поступление на вечернее отделение механико-технологического факультета политехнического института. Затем работа в отделе главного конструктора в лаборатории надежности.

Сейчас он — технолог цеха сборки цветных кинескопов. Богдан Александрович осваивает новейшие достижения техники, активно ведет общественную работу. На счету Б.А.Гаврылюка 16 рацпредложений, среди которых предложение по уменьшению эмиссионного брака, технология подогрева воздуха, устройство, предотвращающее осаждение солей в индукторе. Экономический эффект от внедрения его предложений составил 7 тыс.руб.

"Удивительно работоспособный, скромный человек, отличный организатор", — такого мнения о технологe Гаврылюке начальник цеха К.Г.Белявский.

Контроль брака... Как просто, казалось бы, отличить бракованную продукцию от качественной. На самом же деле, чтобы контролировать брак, надо знать причину его возникновения. Для анализа брака в цехе используют главным образом физические методы. С их помощью можно как бы материально ощутить брак, увидеть его, будь то осыпание маски или какие-то другие дефекты. Если же встречаются сложные виды брака, то продукцию посылают на химический анализ.

Известно, что к каждому виду продукции существуют определенные требования, которым он должен отвечать. Кинескоп должен соответствовать техническим условиям по электрическим, светотехническим параметрам, а также по товарному внешнему виду. Требуемые электрические параметры обеспечиваются максимальными токами луча. Конечно, кинескоп может работать и при малом токе, но тогда нарушается четкость, фокусировка полей и т.д. Если заметны такие нарушения, значит, продукция бракованная.

Необходимо контролировать равномерность поля основных цветов, которые должны отвечать координатам цветности. Если свечение поля нарушено, значит, нарушен состав люминофора или увеличены его зерна, или нарушена точность сборки кинескопа. Непросто обеспечить и товарный вид кинескопа. Все, начиная от наружного токопроводящего покрытия до взрывозащитного бандажа, должно соответствовать техническим условиям.

Чтобы разбираться во всех тонкостях сложного технологического процесса, необходим не только высокий уровень технических знаний, но и умение их применять, надо быть хорошим практиком. Именно таков Богдан Александрович: он и механик, и электрик, кроме того, прекрасно разбирается в радио-, телемеханике и механике. К нему можно обратиться с любым вопросом.

"С такими людьми, как Богдан Александрович, легко работать. Побольше бы таких, и тогда техническая революция в любой отрасли не была бы проблемой. Этот человек на своем месте", — говорит зам. начальника цеха Я.В.Ястремский.

С самого раннего утра начинает Богдан Александрович свою работу. И весь день у него расписан по часам. Ведь, кроме основной работы, у него еще и немалая общественная нагрузка. Он руководит школой коммунистического труда, его можно встретить на заседании комиссии народного контроля, он выступает с докладами на теоретических семинарах "Труд руководителя".

Г. И. Гупало

В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ



Тринадцатый год работает в сборочном цехе старший инженер Тамара Владимировна Куликова. Она поступила на завод, когда цех только начинал функционировать. Из тех, кто пришел вместе с

ней, остались самые надежные, с первого дня связавшие свою судьбу с жизнью цеха и вынесшие на своих плечах все трудности его становления и организации выпуска первой продукции. Успешно освоив специальности откачницы и монтажницы, она совмещала учебу в институте с работой в цехе и спустя несколько лет стала технологом.

Когда ассортимент выпускаемой цехом продукции обновился, Т.В. Куликовой доверили изготовление одного из сложнейших электронно-лучевых приборов. Теперь от ее квалификации, грамотности, способности творчески решать производственные задачи и оперативно принимать решения стало зависеть качество выпускаемого прибора, процент выхода годной продукции.

Серьезность подхода к решению задач, глубокое изучение физической сущности явлений, внутренняя убежденность в верности собственных выводов и решений — таков рабочий стиль Тамары Владимировны. Он вырос из чувства личной ответственности не только за свою работу, но и за результаты деятельности всех, кто непосредственно участвует в освоении и внедрении прибора.

На XXV съезде КПСС тов. Л.И.Брежнев сказал "Практическое внедрение новых научных идей — это сегодня не менее важная задача, чем их разработка". Освоение прибора осуществляется при тесном взаимодействии основных разрабатывающих, вспомогательных отделов института и цехов опытного завода. Чтобы не было разрыва между стадиями цикла исследование—производство, технологу, отвечающему за прибор, нередко приходится быть и исследователем, и конструктором, и организатором.

Спорой в трудной и напряженной работе Тамара Владимировна служит коллектив, в котором каждый может рассчитывать на помощь и активное участие в своей работе квалифицированного коллеги и компетентного руководителя.

Тамара Владимировна Куликова — активный рационализатор цеха. Под ее непосредственным руководством был проведен ряд работ по новой технике: по совершенствованию технологических процессов, улучшению конструкции прибора, модернизации оборудования, регенерации узлов и деталей с целью их повторного использования.

Обладая достаточно высоким уровнем практических и теоретических знаний, Тамара Владимировна тем не менее заботится о его постоянном повышении, знакомится с новинками научно-технической информации по своей тематике — ведь практика предлагает все более сложные задачи. В настоящее время Тамара Владимировна назначена ведущим технологом электронно-лучевого прибора нового поколения. При ее непосредственном участии проходит освоение прибора в производстве.

Деятельная натура Тамары Владимировны не позволяет ей оставаться в стороне и от общественной жизни завода. Член ВОИРа, НТО, Т.В. Куликова находит время и для проведения занятий с рабочими на курсах целевого назначения по улучшению качества прибора. Молодые специалисты, приходящие в цех, в старшем инженере Куликовой видят пример самого добросовестного, серьезного и ответственного отношения к работе.

За высокие производственные показатели и общественную активность Т.В.Куликова не раз поощрялась руководством цеха и завода.

Л. А. Шустина, А. Ф. Кодесс



Ю. Т. ПАНКРАТОВ

Нелегко добиться звания «Лучший технолог» на производстве, где трудится более ста технологов. Юрий Тимофеевич Панкратов завоевывал это звание неоднократно. Награжден знаком «Победитель социалистического соревнования 1979 года». Свой личный творческий план он выполнил досрочно с годовым экономическим эффектом 2400 руб.

Панкратов поступил на завод инженером в отдел главного технолога, но работа непосредственно на производстве привлекала его больше, и вот уже 14 лет он трудится в одном из основных цехов завода — старшим технологом.

За эти годы многое сделано им для того, чтобы ручной труд, применявшийся ранее в цехе, взяли на себя машины. Внедрен целый ряд мероприятий, позволивших сократить цикл отжига деталей с восьми часов до сорока пяти минут при улучшенном качестве.

Основное внимание уделяет Юрий Тимофеевич повышению выхода годных деталей и улучшению качества выпускаемых изделий. При его активном участии в цехе внедряется комплексная система управления качеством продукции. В течение 1979 года 26 деталей, выпускаемых цехом, аттестовано на заводской Знак качества. Как опытный специалист, Панкратов щедро передает свой опыт молодым работникам цеха, возглавляя техническую учебу и являясь заместителем председателя квалификационной комиссии цеха.

В цехе действуют производственно-технические курсы и школа передовых методов труда. Юрий Тимофеевич активно помогает руководителям учебных групп в составлении программ, контролирует проведение занятий, выступает с лекциями.

Панкратов постоянно учится сам, регулярно совместно с членами техбюро цеха посещает занятия, проводимые на заводе, интересуется новинками производства, часто выступает с информацией на цеховых совещаниях.

Юрий Тимофеевич является также активным рационализатором, он приобщил к этому виду творчества многих молодых инженеров и рабочих цеха.

Коллектив цеха в течение нескольких лет занимает классные места в межцеховом социалистическом соревновании, второй год держит переходящее Красное знамя, успешно справляется с заданиями десятой пятилетки.

Взятые обязательства — пятилетний план завершить за четыре с половиной года, а пятилетний задание по выпуску товарной продукции и по росту производительности труда к 110-й годовщине со дня рождения В.И.Ленина — выполнены.



А. З. ШУСТРОВА

Асия Зинятовна Шустрова — технолог технохимического участка сборочного цеха осциллографических трубок. После окончания химико-технологического института она работала в отделе главного технолога, затем как опытному и знающему производству специалисту, ей доверили трудный и ответственный участок работы в цехе. Цех встретил Асию Зинятовну массой нерешенных проблем, большим перечнем номенклатуры. Ведь через технохимический участок, выполняющий функции небольшого цеха, проходят все группы приборов.

Работая в тесном контакте с рабочими, Шустрова решает производственные задачи. Одним из первых ее успехов стала унификация силикама. В результате смены люминофора и отработки технологии почти в два раза снижен брак экранов. В короткий срок она доработала технологию изготовления шкалы. В технологическом процессе устранило применение азотной кислоты.

Умело организовала и направила А.З.Шустрова творческий поиск коллектива рабочих и инженерно-технических работников на решение ряда важных для цеха проблем: разработана и внедрена унифицированная технология выжигания органической пленки, успешно внедряется станок для ее нанесения, механизирован комплекс операций изготовления экранов.

Большое значение имеет работа, направленная на ликвидацию применения аквадага в конструкциях некоторых приборов, так как она позволит значительно снизить трудоемкость, процент брака по посторонним частицам, повысить технологичность и качество осциллографических трубок.

В кратчайшие сроки цехом и участком освоен целый ряд новых приборов. И здесь большая доля труда Асии Зинятовны Шустровой. За последнее время трудоемкость на ее участке снизилась на 18% при увеличении объема продукции почти в полтора раза.

Асия Зинятовна — активный рационализатор. За три последние года она подала шесть рационализаторских предложений, пять из которых уже внедрены в производство.

Шустрова строго следит за исполнением своих указаний, уверенно ведет участок к достижению новых рубежей.



Р.М.ЗУБКОВ

Сегодня среди лучших технологов производственного объединения называют Романа Михайловича Зубкова — человека знающего и инициативного, специалиста с большим производственным опытом.

Непросто даже перечислить все те вопросы, в решении которых принимал участие Роман Михайлович, заботясь о качестве цветных кинескопов, повышении производительности труда, снижении процента брака, замене дорогостоящих материалов. В цехах объединения уже привыкли к тому, что там, где есть затруднения в производстве, где требуется оперативно найти правильное решение по устранению брака или добиться скорейшего внедрения в производство новых, более совершенных технологических процессов, непременно появляется этот спокойный, с приветливой улыбкой человек и дело начинает спориться.

Первый помощник и советчик Романа Михайловича — научно-техническая информация. За новинками отечественной и зарубежной специальной литературы и передовым опытом родственных предприятий Р.М.Зубков следит систематически, отлично их знает и всегда умело использует. Это помогает ему постоянно быть на переднем крае производства, поддерживает его интерес к исследовательской, твор-

ческой работе. Роман Михайлович — автор актуальных научно-технических статей, изобретений и рационализаторских предложений, реализация которых позволила сэкономить многие тысячи рублей.

Сегодня Р.М.Зубков руководит работой, направленной на дальнейшее улучшение светотехнических параметров кинескопов для цветного телевидения и уменьшение брака по оргпенке. Он щедро делится своими знаниями с товарищами по работе, передавая им свой опыт и творческое отношение к решению исследовательских и производственных задач. А 20 лет назад он сам пришел на завод учеником испытателя кинескопов. Благодаря трудолюбию, пылливому уму и, конечно, тем условиям, которые создаются в объединении для повышения квалификации рабочих и ИТР, Роман Михайлович за сравнительно короткое время без отрыва от производства стал прекрасным инженером-технологом. Объединение в полном смысле слова вырастило высококвалифицированного специалиста и теперь по праву гордится им.

Высокие показатели в труде, активное участие в общественной жизни коллектива помогли Роману Михайловичу стать Ударником коммунистического труда, завоевать знак «Победитель социалистического соревнования». Думается, с этих позиций он не отступит и в будущем.

Лучшим технологом завода названа **Ида Николаевна Хорольская** — старший инженер участка нанесения люминофорных покрытий.

И.Н.Хорольская пришла сюда, когда еще продолжалось строительство завода. При ней были установлены первые конвейерные машины для нанесения покрытий на экраны кинескопов, позволившие механизировать около 50 отдельных операций. Много сил и энергии вложила Ида Николаевна в разработку технических заданий на эти уникальные машины, в освоение массового выпуска цветных

кинескопов. Работы, проведенные при активном участии ст. инженера Хорольской, в частности модернизация технологических схем конвейерных линий, разработка и внедрение новых материалов и процессов, разработка требований к отдельным узлам машин с целью механизации трудоемких операций, дали большой экономический эффект.

Хорольская И.Н. — творчески мыслящий, инициативный инженер, правильно понимающий задачи современного социалистического производства и активно содействующий их выполнению.



Л. И. НОВОЖИЛОВА

«Сегодня работать лучше, чем вчера — завтра лучше, чем сегодня!», — под таким девизом трудится Лидия Ивановна Новожилова, инженер-технолог участка сплавов.

Работая на этом участке с 1967 года, она постоянно добивается высоких производственных показателей. Коллектив, руководимый ею, носит звания «Участок коммунистического труда» и «Участок высокой технологической дисциплины». В заводском социалистическом соревновании он не раз занимал призовые места, ему присвоено почетное звание «Лучший участок электронной промышленности». Коллектив участка в течение многих лет работает на самоконтроле, среди его членов — шесть отличников качества. Система организации социалистического соревнования за повышение эффективности производства и качества работы предусматривает комплексное совершенствование технологии каждой производственной операции, улучшение организации и обслуживания рабочего места, внедрение передового опыта, изучение и использование внутрипроизводственных резервов. Именно эти важные вопросы привлекают внимание Лидии Ивановны Новожиловой.

Более 20 рационализаторских предложений Л.И.Новожиловой направлены на экономию материалов, усовершенствование технологических процессов и улучшение условий труда рабочих.

Л.И.Новожилова является пропагандистом в экономической системе образования. На общественных началах она ведет техническое обучение кадров, главную цель которого видит в том, чтобы, увязывая теоретические вопросы с практическими делами своих слушателей, развивать их творческую активность, повышать уровень их политического сознания.



А. С. БУКАТОВ

Лучший технолог предприятия Александр Семенович Букатов работает над процессами отделки поверхности мелких массовых деталей высокотехнологичными методами. Сокращение объема ручного труда, повышение производительности, создание безопасных условий работы при использовании пожароопасных и токсичных материалов определяют актуальность проводимых Букатовым работ.

Для уменьшения трудоемкости отделочно-зачистной обработки он предложил виброабразивный метод, который можно использовать для удаления грубого облоя; зачистки заусенцев и скругления острых кромок; чистового шлифования, полирования и глянцеваания; очистки поверхности от окалин, следов коррозии, окисных пленок; тонкой очистки поверхности от различного рода загрязнений. Метод позволяет обрабатывать детали всевозможной конфигурации и из различных материалов.

Однако внедрить виброабразивную обработку в производство оказалось непросто. Отсутствовало серийное изготовление и централизованная поставка оборудования и рабочих сред для нее. В этих условиях и проявился характер Александра Семеновича Букатова. Его настойчивость, инициатива, умение установить связи с другими организациями принесли положительные результаты: на предприятии были приняты в эксплуатацию две отделочные вибрационные машины.

Заменяя устаревшую технологию, Букатов творчески использует технологические возможности вибрационной обработки. Так, например, он предложил декоративное матирование, которое позволило устранить ручную полировку, повысить производительность обработки и снизить требования к качеству исходной поверхности. За разработку и внедрение новой техники А.С.Букатов награжден бронзовой медалью ВДНХ СССР.

Александр Семенович является председателем заводского совета ВОИРа. В настоящее время Букатов проводит комплекс работ по освоению прецизионного виброполирования изделий сложной конфигурации из твердых материалов.

ЛУЧШИЕ ПО ПРОФЕССИИ



ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВ

Когда Виктор Александров начинал трудиться в цехе шлифовки экранов, работа не ладилась: то и дело шел брак. Но молодой рабочий не падал духом, во время пересменки старался наверстать упущенные секунды. Наставник Николай Морозов щедро делился с ним производственным опытом.

Изо дня в день Виктор все основательнее познавал приемы шлифовки. Иногда казалось, что профессия покорилась, но промахи все-таки были. И тогда Виктор вновь и вновь вникал в ее тонкости. Всякий раз выяснял причины брака, искал способы их устранения. Изучал природу «зажогов», причины недополировки поверхности экранов. По нескольку раз проверял и перепроверял свои выводы, бился над тем, чтобы обрести сноровку.

Своей цели стать мастером шлифовки Виктор достиг. К тому же стал наставником молодежи, хотя сам еще молод.

Теперь на участке знают, что Виктор Александров может и устранить брак, и предостеречь от

него. А молодым шлифовщикам он не только покажет, как справиться со «следом обреза» или с «недоработкой углов на грубой шлифовке», но и посоветует тренировать глазомер и, что самое важное, научит «понимать» стекло, ощущать его свойства.

Испытав все трудности локальной обработки экранов, Александров взялся за усовершенствование шлифовального станка. Разработанное им приспособление облегчало условия труда и позволяло каждому шлифовщику работать одновременно на двух модернизированных станках. Все хлопоты по доводке станка взял на себя механик Анатолий Сергеевич Бороздинов. Внедрение предложения позволило почти вдвое увеличить производительность труда.

В 1977 и 1979 годах коммунист Александров был признан лучшим шлифовщиком отрасли. Личное пятилетнее задание он завершил еще 1 декабря 1979 года. Здесь считают, что участок шлифовки проверяет людей на прочность. Виктор Александров сдал этот экзамен на «отлично».

В июле 1959 года Татьяна Николаевна Иванова 18-летней девушкой пришла на завод. Тогда он еще только строился. Таня стала строителем. Затем вместе с другими девушками и юношами ее направили учиться для приобретения специальности. Вернулась Таня с дипломом сборщицы полупроводниковых приборов и приступила к работе в сборочном цехе.

Поработав некоторое время, Таня решила попробовать свои силы на другом поприще. И вот она — лаборант-металлограф. Здесь, в центральной заводской лаборатории, помимо специальных знаний, понадобились высокая точность исполнения, аккуратность, внимание, предельная собранность. Были неудачи, разочарования, огорчения. Все это позади. Сейчас Татьяна Николаевна имеет самый высокий квалификационный разряд. Выполняет самые сложные анализы по исследованию структуры металлов и сплавов. Ее рукам подвластно все.

Примеру матери последовала дочь Галина. Окончив профессионально-техническое училище, она пришла в заводскую лабораторию химического анализа, чтобы стать химиком-технологом.

Одной из первых в лаборатории Татьяне Николаевне Ивановой присвоено звание «Ударник коммунистического труда». Не раз по итогам социалистического соревнования она отмечалась как «Лучшая по профессии». С большой охотой она делится производственным опытом с другими лаборантами.

Татьяна Николаевна — общительный человек, хороший товарищ, коллектив ей доверил пост бессменного казначея ВОИРа.

Она награждена медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И.Ленина», а также общесоюзным знаком «Победитель соцсоревнования». Недавно Т.Н.Ивановой присвоено звание «Ветеран завода».



Н. Г. ГОЛОВИН

Николай Георгиевич Головин — один из самых высококвалифицированных рабочих завода, лучший слесарь-инструментальщик, носящий звания «Отличник качества», «Ударник коммунистического труда».

Свое ежемесячное задание Головин выполняет на 125—130%, пятилетнее — было закончено к 1 октября 1979 года. Ему поручают самые сложные и ответственные заказы, к любому заданию он подходит творчески, находя наиболее точные и экономичные решения.

Николай Георгиевич — активный рационализатор, на его счету 16 рацпредложений с экономическим эффектом 1,2 тыс.руб. Все они направлены на усовершенствование конструкции оснастки, применяемой на заводе, снижение трудоемкости и расхода дефицитных материалов.

Николай Георгиевич — председатель цехового комитета, организатор социалистического соревнования рабочих на основе личных творческих планов под девизом «Пятилетке качества и эффективности — наш ударный труд и рабочую гарантию». Опыт организации цехом этого коллектива социалистического соревнования широко изучен и распространен по всему заводу.

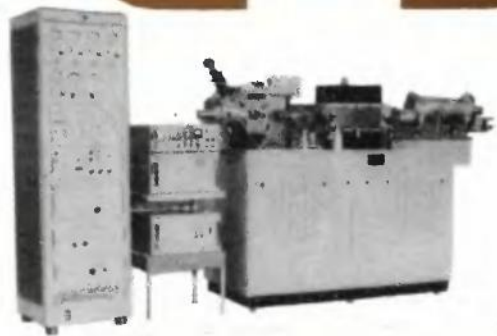
Большую работу Николай Георгиевич выполняет в профкоме завода, являясь председателем жилищно-бытовой комиссии. Человек, влюбленный в свою профессию, он много беседует с молодежью, поступающей на завод, с учениками подшефных школ. За последние годы он воспитал двух молодых рабочих, ставших высококвалифицированными специалистами. Николай Георгиевич — один из самых уважаемых на заводе людей. Коллектив ценит его за скромность, честность и отзывчивость, за теплоту, с которой он относится к людям.

Николай Георгиевич — победитель городского смотра-конкурса профессионального мастерства. В 1978 и 1979 гг. награжден знаками «Победитель социалистического соревнования».

Настоящий разрез составлен по материалам, поступившим в редакцию в начале этого года.

РЕКЛАМА ЭП РЕКЛАМА

ЭМАЛ-2



Масс-спектрометр ЭМАЛ-2 с двойной фокусировкой, оснащенный лазерно-плазменным ионным источником, предназначен для безталонного определения атомного содержания микропримесей всех элементов периодической системы с чувствительностью до $3 \cdot 10^{-7} \%$, разрешением 7000 и локальностью $1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Регистрация производится на фотопленку.

ЭП СООБЩЕНИЯ ЭП

ВЫСТАВКА—СМОТР "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В СССР"

15 октября 1980 г. на ВДНХ СССР открылась выставка-смотр «Научно-техническая информация в СССР», 11 тематических разделов которой отображают структуру и уровень развития Государственной системы научно-технической информации (ГСНТИ), показывают передовой опыт работы ее звеньев, характеризуют направления дальнейшего совершенствования системы и методы более эффективного использования информации для ускорения научно-технического прогресса.

Деятельность ГСНТИ в целом как крупнейшей в мире централизованной информационной системы представлена во вступительном разделе. Приводятся данные, характеризующие результаты работы системы по информационному обеспечению исследований, разработок и производства на основе справочно-информационного массива, объем которого превысил 1800 млн. документов, роль автоматизации и механизации информационных процессов, а также результаты международного сотрудничества СССР в области НТИ.

Раздел «Всесоюзные органы НТИ» посвящен деятельности 10 Всесоюзных центров НТИ по обработке мирового потока документальных источников информации и выпуску на ее основе различных информационных материалов и по другим видам информационного обслуживания.

Экспонаты раздела «Межотраслевые территориальные органы НТИ» дают представление о результатах информационной деятельности 14 республиканских институтов научно-технической информации и 18 их отделений, а также 109 территориальных центров НТИ, о распределении обязанностей между органами НТИ региональной сети, демонстрируют свыше 20 форм информационного обеспечения специалистов.

Основные достижения отраслевых систем научно-технической информации (ОСНТИ) 28 отраслей и ведомств демонстрируются в разделе «Отраслевые системы НТИ», экспонаты которого характеризуют деятельность центральных отраслевых органов НТИ и возглавляемых ими ОСНТИ, их роль в повышении уровня научных исследований и разработок, повышении эффективности производства и качества выпускаемой продукции. Представлены автоматизированные системы НТИ четырех министерств: АСНТИ «Реферат» (Минприбор), АСНТИ «Электроника» (Минэлектронпром), АИПС «Электротехника» (Минэлектронтехпром) и АСНТИ «Энергия» (Минэнерго), а также показаны результаты деятельности

четырёх тематических информационных объединений по химии, машиностроению, строительству и сельскому хозяйству.

Результаты информационной работы еще одного звена ГСНТИ, включающего около 12 тысяч информационных служб объединений, институтов, промышленных предприятий и различных организаций, отображены в разделе «Органы научно-технической информации в научных и производственных объединениях, на предприятиях и в организациях народного хозяйства». Показаны такие прогрессивные формы информационного обеспечения, как избирательное распределение информации, дифференцированное информационное обеспечение руководителей, межотраслевой обмен информацией, подготовка информационных докладов о важнейших достижениях науки и техники и других аналитических материалов для использования при перспективном и текущем планировании научно-производственной деятельности.

Достижения органов НТИ различных уровней в разработке и внедрении автоматизированных систем научно-технической информации представлены в разделе «Автоматизация и механизация информационных процессов». Показаны результаты функционирования документальных и фактографических АСНТИ во Всесоюзных органах НТИ, тематических объединениях, отраслевых центрах НТИ и республиканских информационных институтах. Большой интерес вызывает у специалистов демонстрация экспериментально-пускового комплекса первой очереди сети автоматизированных центров НТИ, обеспечивающего диалоговый режим обработки информации с теледоступом по каналам связи, а также устройства для автоматизированного поиска информации на микрофишах «Пуск-1» и выводного микрофотопечатающего устройства «Рифма-1».

Экспозиция раздела «Научно-техническая пропаганда» широко освещает современные формы и методы пропаганды достижений науки, техники и передового опыта органами НТИ различных уровней, демонстрирует возможности использования радио, кино, телевидения и других технических средств для повышения эффективности информационно-пропагандистской работы. С этим разделом тесно связана экспозиция раздела «Взаимное использование научно-технических достижений», показывающая действующий в стране порядок обмена научно-техническими достижениями (НТД), результаты работы органов НТИ по отбору и передаче НТД, роль ВИМИ и ВНИЦ в межотраслевом обмене информацией. В этом разделе представлено 140 натуральных образцов, в том числе 25 действующих.

Организационная структура системы повышения квалификации информационных работников, формы и методы обучения специалистов ОНТИ и БТИ, а также потребителей информации показаны в разделе «Подготовка и переподготовка кадров для ГСНТИ».

Опыт кооперирования национальных информационных систем, организации международных специализированных и отраслевых систем НТИ стран-членов СЭВ представлен в разделе «Международное сотрудничество в области НТИ».

Экспозиция раздела «Дальнейшее совершенствование и развитие системы НТИ в СССР» знакомит с этапами создания государственной автоматизированной системы научно-технической информации (ГАСНТИ), которая строится как сеть взаимосвязанных автоматизированных центров НТИ. Показаны перспективы использования общегосударственной системы передачи данных для реализации ГАСНТИ, значение проблемно-ориентированных баз данных, формы и методы фактографического информирования специалистов на основе АСНТИ, возможности автоматизированных систем лексикографического обслуживания.

Система НТИ электронной промышленности представлена в разделах «Отраслевые системы научно-технической информации», «Научно-техническая пропаганда», «Взаимное использование научно-технических достижений», где отражены роль и значение научно-технической информации для дальнейшего развития электронной техники, перспективные направления научно-информационной деятельности (НИД), способствующие повышению научного уровня и эффективности исследований и разработок, сокращению сроков создания и внедрения передовой техники и технологии, повышению качества выпускаемой продукции. Наибольший интерес у посетителей выставки вызывают: структурно-функциональная схема ОСНТИ «Электроника»; подсистема управления НИД, являющаяся частью комплексной системы управления качеством продукции одного из производственных объединений; функционирование ОНТИ в единой системе управления качеством разработок в НПО; формы и методы научно-методического руководства ОСНТИ; организация информационного оппонирования перспективных и текущих планов исследований и разработок, программно-целевое информационное обеспечение НИР и ОКР; отраслевая сеть автоматизированных центров НТИ на базе АСНТИ «Электроника» как звено государственной системы НТИ; использование методов голографии при создании информационно-поисковых систем; аналитический метод формирования информационной базы в системе дифференцированного информационного обеспечения руководителей; информационное моделирование разрабатываемых изделий; метод формирования комбинаторных фактографических картотек; способы выявления научно-технических достижений в разработках предприятий и передачи их в народное хозяйство; результаты создания отраслевой сети центров научно-технической пропаганды; новые технические средства пропаганды достижений отрасли; способ применения хозрасчета в информационной службе НПО.

К открытию выставки-смотря было приурочено Всесоюзное совещание информационных работников «Итоги работы Государственной системы научно-технической информации в десятой пятилетке и задачи по ее дальнейшему развитию в 1981—1985 годах».

Председатель Государственного комитета СССР по науке и технике академик

Г.И.Марчук в своем вступительном слове подчеркнул значение информационных ресурсов в ускорении научно-технического прогресса, отметил роль распределенных автоматизированных банков данных и необходимость улучшения технического оснащения органов НТИ и определил основные направления развития ГСНТИ в 11-й пятилетке.

В докладе начальника управления научно-технической информации и пропаганды ГКНТ тов. Н.Б.Арутюнова были рассмотрены вопросы совершенствования структуры ГСНТИ и ее основные количественные характеристики, формы и методы информационного обеспечения НИР, ОКР, производства и управления; отмечена необходимость создания сети взаимосвязанных автоматизированных центров НТИ и оснащения звеньев ГСНТИ техническими средствами, а также повышения квалификации информационных работников; указана возможность внедрения хозрасчета и повышения экономической эффективности ГСНТИ, укрепления международного сотрудничества в области НТИ.

Директор ВИНТИ профессор А.И.Михайлов привел результаты выполнения программы работ по созданию Государственной автоматизированной системы НТИ, сформулировал задачи на 11-ю пятилетку, а также охарактеризовал основные элементы первой очереди сети автоматизированных центров НТИ.

Итоги деятельности Международного центра научно-технической информации (МЦНТИ): создание научно-методического обеспечения международной системы НТИ стран-членов СЭВ, справочно-информационное обеспечение НИР, комплексных проблем и долгосрочных программ, взаимодействие МЦНТИ с информационными центрами социалистических стран, формирование комплексных информационных баз, разработка, генерация и распространение пакетов прикладных программ — были освещены в докладе директора МЦНТИ профессора Л.Н.Сумаркова.

В докладах, сообщениях и выступлениях руководителей и ведущих специалистов органов НТИ были отмечены недостатки в организации НИД, сформулированы основные задачи различных звеньев ГСНТИ в ускорении научно-технического прогресса, а также намечены пути их решения.

В период работы выставки проводятся Всесоюзная конференция «Вопросы организации системы обмена научно-технической информацией на магнитных лентах», Всесоюзное совещание по повышению квалификации информационных работников, Всесоюзный семинар «Основные направления совершенствования библиотечно-информационного обслуживания специалистов на базе единых отраслевых и территориальных СИФ» и другие мероприятия по обмену передовым опытом информационной работы.

Новикова Л.С.

**ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ВЫП. 1 (85) — 12 (96) НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА
"ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ" ЗА 1980 Г.**

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
Из социалистических обязательств трудящихся электронной промышленности на 1980 год по досрочному выполнению пятилетнего плана и достойной встрече 110-й годовщины со дня рождения В.И.Ленина	1	3	<i>Гохитанд А.Д.</i> Оценка и стимулирование напряженности планов	2	7
<i>Стуколов П.М.</i> Задачи отрасли по улучшению планирования и совершенствованию хозяйственного механизма	2	3	<i>Иванов В.И.</i> Использование программных методов при формировании перспективных планов	2	23
<i>Чернышев А.А.</i> Основные направления экономии материальных ресурсов	3	3	<i>Шульдин Г.К.</i> Совершенствование системы ценообразования в отрасли ..	2	24
<i>Пролейко В.М.</i> Комплексный подход к созданию бытовой радиоэлектронной аппаратуры	4	3	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ		
Из решения межотраслевого совещания по применению микропроцессоров и микро-ЭВМ	7	Оборот титула	<i>Шишков А.П.</i> Совершенствование коллективных форм организации труда в научно-производственном объединении	2	27
<i>Федоров В.А.</i> Современное состояние и перспективы развития материалов для твердотельной электроники	8-9	3	<i>Языков Д.С.</i> Совершенствование организации производства на промышленном предприятии	2	30
<i>Митюшин Ю.Б.</i> Развитие автоматизированных систем управления в отрасли	10	3	<i>Скворцов Н.Н.</i> Формирование структуры производственно-хозяйственного комплекса	2	32
Из решения межведомственного научного совета по проблемам измерений	11-12	Оборот титула	<i>Жильцов В.И., Марков В.И., Никольский А.Н., Фельдман И.З.</i> Автоматизация управления научно-производственным комплексом	2	36
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА			<i>Зеленцов Г.Н.</i> Повышение эффективности АСУО и АСУП	2	40
ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПЛАНОВОЙ РАБОТЫ			<i>Зеленукин В.С.</i> Оперативные формы управления производством	2	44
<i>Васенков А.А.</i> Программно-целевые методы планирования и перспективы и. развития	2	7	<i>Аникин В.И., Бальзамов В.Л., Беница Э.Ф.</i> Сокращение ручного труда на предприятиях отрасли	2	45
<i>Гольденберг М.Н., Молчанов Э.Д., Юдин Б.В.</i> Планирование и стимулирование повышения качества продукции	2	10	УСИЛЕНИЕ РОЛИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЫЧАГОВ И СТИМУЛОВ		
<i>Баранов В.А.</i> Разработка системы нормативов для перспективного планирования	2	12	<i>Лебедев В.П.</i> Совершенствование экономических и организационных методов управления объединением ...	2	49
			<i>Силаев А.Ф.</i> Дальнейшее совершенствование хозрасчета в отрасли	2	51

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Тестов Г.В.</i> Вопросы учета выполнения договорных обязательств на предприятиях отрасли.....	2	55	<i>Гречишников О.А., Ривкин Л.М., Сосновский В.Н.</i> Перспективное планирование новых разработок бытовой радиоэлектронной аппаратуры	4	7
<i>Сазонов О.Н.</i> Хозрасчетные бригады и пути повышения эффективности их работы.....	2	57	<i>Макаревич М.Я., Сальков А.В.</i> Использование прогрессивной технологии для создания новых образцов изделий	4	10
СОЗДАНИЕ НОВЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИБОРОВ И УЗЛОВ – ПУТЬ СНИЖЕНИЯ ИХ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ			<i>Баллер М.Э., Николаев В.Т.</i> Автоматизированная система оперативного учета материальных потоков в производстве бытовой РЭА	4	12
<i>Бакрунов О.А., Газаров А.А., Гусев А.А., Гуськов Г.Я., Стукалов В.Н., Шаранок В.И., Шлыков А.А.</i> Комплексная микроминиатюризация электронной аппаратуры	3	42	<i>Николаев В.Т.</i> Проблемы разработки и выпуска бытовых кассетных магнитофонов	4	13
РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ – РЕЗЕРВ ИХ ЭКОНОМИИ			<i>Степанов В.Ф., Филатов О.В.</i> Развитие АСУ объединением на базе ЕС ЭВМ	5	3
<i>Сакатунов Ю.С.</i> Стандартизация сырья и материалов – средство повышения их качества	3	51	<i>Голованов Л.Д., Горский В.П., Стеблова Г.И., Степанов В.Ф.</i> Построение автоматизированной системы управления основными фондами в объединении	5	6
<i>Иофис Н.А.</i> Проведение организационно-технических мероприятий по экономии материалов в производстве ЭЛП	3	64	ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ		
<i>Бухман А.А., Сакатунов Ю.С.</i> Остродефицитные металлы – под контроль ..	3	66	<i>Бурлаков В.А., Иофис Н.А., Сиприков И.В.</i> Канальные и микроканальные электронные умножители на основе полупроводящих материалов с объемной проводимостью.....	1	19
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГЕНЕРАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ – ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК РЕСУРСОВ			<i>Горохов В.А.</i> Физические основы конструирования и схемотехники интегральных оптоэлектронных реле и переключателей	1	23
<i>Бухман А.А.</i> Отходы редких металлов – в производство	3	68	<i>Кармазинский А.Н.</i> Теоретические основы синтеза принципиальных схем логических элементов.....	6	52
<i>Фитисков В.И.</i> Организация работ по реставрации и регенерации материалов	3	69	<i>Кармазинский А.Н.</i> Процедура синтеза принципиальных схем логических элементов на дополняющих МДП-транзисторах	6	58
<i>Землянухин А.В.</i> Производственные отходы – источник вторичного сырья	3	70	МОНОКРИСТАЛЛЫ		
<i>Пархоменко Ю.В.</i> Совершенствование организации обеспечения отрасли сырьем и материалами.....	3	71	<i>Блецкан Н.И., Бузынин А.Н., Волков А.Ф., Дементьев Ю.С., [Малинин А.Ю.]</i> Пути повышения однородности промышленных монокристаллов кремния	8–9	6
<i>Бурмистров Ю.Н., Иванов В.И.</i> Унифицированные функциональные модули для бытовой приемно-усилительной и звукозаписывающей аппаратуры	4	5	<i>Антонов В.А., Селин В.В.</i> Особенности роста и свойств объемных монокристаллов фосфида индия	8–9	15

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ А^{III}В^V			<i>Иванов В.И., Терехин Н.Ф., Туев Г.В.</i>		
<i>Елисеев П.Г.</i> Новые гетеропереходы в оптоэлектронике	8-9	49	Прогнозирование потребности материалов в производстве интегральных микросхем	10	45
<i>Дрижук А.Г., Шагалов А.Д., Шагалов М.Д.</i> Структуры с анизотропным излучением на основе нитрида галлия	8-9	64	ТЕХНОЛОГИЯ		
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ			<i>Ерусалимчик И.Г., Миронов Г.А.</i> Гальванопокрытия в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем	1	4
<i>Ланцов А.Ф.</i> Создание новых материалов — один из главных факторов развития микроэлектроники	8-9	66	<i>Климашаускас К.Ю., Шеркувене В.-К.Ю., Янушонис С.С.</i> Самоформирование структур в технологии изготовления интегральных схем	1	10
<i>Минаев В.С.</i> Прогноз и поиск новых халькогенидных стеклообразных полупроводников	8-9	67	<i>Волк В.П., Неустроев Э.А., Фокина С.М., Яковенко В.Г.</i> Изготовление элементов ИС с микронными и субмикронными размерами	1	12
<i>Стучебников В.М., Папков В.С.</i> Электрофизические характеристики КНС-структур	8-9	71	<i>Янушонис С.С.</i> Применение метода самоформирования для получения планарных структур	1	16
<i>Амосов В.И., Давыдов А.А.</i> Перспективы использования монокристаллов селенида цинка	8-9	76	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ — ЭФФЕКТИВНЫЙ ПУТЬ ЭКОНОМИИ МАТЕРИАЛОВ		
ПОЛИМЕРНЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ			<i>Райнов Ю.А.</i> Современная технология и вопросы повышения эффективности использования материальных ресурсов	3	5
<i>Айзенберг Б.Д., Баратов А.Г.</i> Фото-термопластические носители информации	10	12	Экономия остродефицитных, драгоценных и дорогостоящих материалов		
<i>Айзенберг Б.Д., Бородкина М.С., Козлов П.В., Пухова Л.Т.</i> Способность сополимеров стирола с бутадиеном к образованию рельефа при одновременном методе записи информации	10	16	<i>Голубев А.П., Иванов В.И., Худяков К.И.</i> Пути экономии кобальтосодержащих сплавов и драгоценных металлов в конструкциях ИС	3	8
<i>Баратов А.Г., Луковкин А.В., Рожков О.В., Федоров И.Г.</i> Особенности воспроизведения фазово-оптической информации с фототермопластических носителей	10	18	<i>Бусол Ф.И., Болгов И.С., Снесаревский В.П., Хозиков В.С., Яковлев С.П.</i> Локальное золочение методом электрического взрыва фольги	3	13
<i>Мартышов К.И.</i> Туннельно-барьерный механизм электропроводности керметных материалов	10	25	<i>Мороков В.И., Туманов А.Н., Файфер С.И.</i> Экономия остродефицитных материалов при производстве электродов источников ВИС	3	14
<i>Алябьев И.В., Папков В.С., Суровиков М.В., Чумак Б.Д.</i> Современное состояние и перспективы использования КНС структур	10	28	<i>Коржавый А.П., Файфер С.И.</i> Новые методы получения полых цилиндрических катодов	3	15
<i>Белоусов В.И., Вигдорovich Е.Н., Саламатин Б.А., Федоров В.А.</i> Термодинамические методы в технологии полупроводниковых материалов	10	35	<i>Хоперия Т.Н.</i> Метод химической металлизации с использованием никель-фосфорного сплава в производстве изделий электронной техники	3	17
<i>Белоусова Л.Г., Вальская М.Ф., Веселова С.С.</i> Прогнозирование коррозионной стойкости материалов и изделий электронной техники	10	41	<i>Бенца Э.Ф., Бирюков М.И., Загоруй А.Д.</i> Применение безвольфрамовых твердых сплавов для изготовления инструмента	3	20

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Варганова К.Н., Евдокимова Н.В., Лебедева В.А.</i> Сокращение расхода серебра при нанесении гальванических покрытий на контакты электросоединителей 3		21	катка в изготовлении выводных элементов 3		39
<i>Мушкарев В.Г., Райнов Ю.А., Татеосов В.Г.; Южный О.В.</i> Радиоизотопные методы анализа и их роль в экономии золота 3		22	Рациональное использование материалов — резерв их экономии		
Новые экономичные технологические процессы			<i>Дьяков Ю.Н., Федоров В.А.</i> Резервы экономии монокристаллического кремния в производстве эпитаксиальных структур для БИС и СБИС 3		54
<i>Черный Б.И.</i> Применение "свободных" масок в технологии изготовления фотошаблонов 3		24	<i>Грибов Б.Г., Прилипко В.И., Родионов Р.А.</i> Снижение потребления дефицитного сырья в производстве фотошаблонных заготовок 3		58
<i>Ивановский Г.Ф.</i> Использование сухих процессов в микроэлектронике .. 3		26	<i>Болгов И.С., Бусол Ф.И., Хозинов В.С.</i> Многослойные ленты с полосчатым плакированием в производстве изделий электронной техники 3		61
<i>Гринченко В.Т., Ивановский Г.Ф.</i> Применение вакуумной плазменно-дуговой металлизации в производстве изделий электронной техники 3		27	<i>Жучков А.И., Кравченко О.И., Минаждинов М.С., Невский О.Б.</i> Снижение материалоемкости производства эпитаксиальных структур GaP 3		62
<i>Загон Г.А., Распоркин Б.Г., Шеленшевич В.А.</i> Применение пиронитрида бора в серийном производстве интегральных схем 3		28	<i>Измайлов М.Р.</i> Оснастка и инструмент из металлокерамических твердых сплавов 3		64
<i>Бенуа Э.Ф., Гончаренко В.П., Загоруй А.Д., Картавцев В.С., Маслов А.И., Петров Э.М.</i> Методы повышения стойкости и долговечности инструмента и технологической оснастки 3		28	<i>Лаврищев В.П.</i> Перспективы развития и основная проблема переноса изображений 5		10
Прогрессивные методы формообразования			<i>Гаряинов С.А.</i> Степень интеграции как универсальный параметр ИС 5		14
<i>Букин К.Д., Кишиневский Л.И., Предеин В.П., Фуксман В.М.</i> Снижение удельной металлоемкости и трудоемкости получения заготовок и полуфабрикатов 3		31	<i>Литвиненко С.А., Митрофанов В.В., Соколов В.И.</i> Пористый окисел в планарной технологии 5		18
<i>Кузнецов В.П., Пучков В.Г., Швагер Л.К.</i> Вакуум-пленочный метод получения отливок 3		35	<i>Гусев О.В., Чистяков Ю.Д., Яковлев Г.А.</i> Бесфлюсовая композиционная пайка кремния с металлами припоями на основе свинца 5		20
<i>Кудрявцев Л.В.</i> Изготовление деталей электровакуумных приборов сферодвижной штамповкой 3		37	<i>Игнашева О.Е., Наумова С.Ф., Паничев М.И.</i> Изготовление электродов жидкокристаллических индикаторов методом обратной фотолитографии 5		25
<i>Гикал В.Н., Костюк С.Н.</i> Применение метода порошковой металлургии при изготовлении инструментальной оснастки 3		37	<i>Родионова А.А., Яснов В.С.</i> Оптимизация химических и фотолитографических процессов обработки кремниевых пластин 5		25
<i>Зазулин А.В., Стрижаков Е.Л., Юневич В.Б.</i> Изготовление деталей ИЭТ методом порошковой металлургии 3		38	<i>Глазков И.М., Райхман Я.А.</i> Тенденции развития методов литографии в микроэлектронике 6		64
<i>Житник С.М., Украинаец В.В., Федотов В.И.</i> Поперечно-клиновое про-			<i>Макарчук В.А., Полянин К.П.</i> Ионная имплантация в технологии изготовления линейных микросхем 7		52
			<i>Горелик В.А., Протопопов О.Д.</i> Модель для коррекции химических профилей 7		55

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Васенков А.А., Соколов В.П.</i> Оценка информативности контрольных операций в производстве ИС.....	7	57	лучение кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми слоями методом изонной имплантации	8-9	44
<i>Васенков А.А., Соколов В.П.</i> Классификация технологических потерь при контроле функционирования ИС на пластинах	7	61	<i>Клюбина Э.Д., Михайлов Ю.А., Сорокина М.Т.</i> Структуры с диэлектрической изоляцией кремния электронной и дырочной проводимости	8-9	46
<i>Блецкан Н.И., Окунев Ю.А.</i> Монокристаллы фосфида галлия большого диаметра	8-9	18	ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ А^{III}В^V		
<i>Блецкан Н.И., Папков В.С., Суриков М.В.</i> Крупногабаритные монокристаллы сапфира для изделий микроэлектроники	8-9	19	<i>Родионов А.В., Слепнев Ю.В., Федоров В.А.</i> Субмикронные эпитаксиальные структуры арсенида галлия для СБИС	8-9	58
КРЕМНИЕВЫЕ ПЛАСТИНЫ И ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ			<i>Минаждинов М.С., Невский О.Б., Федоров В.А.</i> Высокоэффективные эпитаксиальные структуры фосфида галлия	8-9	60
<i>Малинин А.Ю., Тверсков В.А.</i> Проблемы развития кремниевой эпитаксии	8-9	23	МАТЕРИАЛЫ ОБЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ		
<i>Бурмистров А.Н., Волков А.Ф., Григорович С.Л., Малинин А.Ю., Сорокина М.Т.</i> Дефекты в кремнии после химико-механического полирования.....	8-9	25	<i>Грибов Б.Г., Козыркин Б.И., Федоров В.А.</i> Применение металлоорганических соединений в электронной технике	8-9	91
<i>Блецкан Н.И., Литвинов Ю.М., Малинин А.Ю., Петров С.В., Хашимов Ф.Р.</i> Пути подавления влияния ростовых микродефектов в диффузионно-эпитаксиальных структурах кремния.....	8-9	28	<i>Зиновьев К.В.</i> Растворные композиции для электронной техники	8-9	93
<i>Попов В.П., Прилипко В.И., Тверсков В.А.</i> Повышение однородности толщины эпитаксиальных слоев кремния, получаемых в высокопроизводительных промышленных установках.....	8-9	33	<i>Ефремов Е.А., Звероловлева Н.Д., Петров В.Б., Попенко В.Ф., Федоров В.А.</i> Дихлорсилан — перспективный исходный материал в эпитаксии кремния	8-9	96
<i>Волков А.Ф., Папков Н.С., Петров С.В.</i> Повышение устойчивости фотолитографического рельефа при эпитаксии кремния	8-9	34	<i>Астафурова Н.И., Кольцов Ю.И., Можухин Д.Д.</i> Фоторезисты и их применение в микроэлектронике	8-9	111
<i>Волков А.Ф., Крамер В.А., Куценко В.К., Новиков В.В., Петров С.В.</i> Формирование диффузионных слоев для кремниевых эпитаксиальных структур со скрытым слоем	8-9	38	<i>Грибов Б.Г., Можухин Д.Д., Селиванов Г.К., Федоров В.А.</i> Электронорезисты и их применение в микроэлектронике	8-9	113
<i>Петров С.В., Тверсков В.А., Усков А.Г., Федоров В.А.</i> Получение кремниевых эпитаксиальных структур со скрытыми слоями методом диффузии	8-9	43	ПОЛИМЕРНЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ		
<i>Белоусов В.С., Зотов В.В., Козлов Ю.Ф., Сидоров А.И.</i> По-			<i>Богомолов И.И., Гилевский В.И., Дымченко Ф.Е., Проколова Т.В.</i> Полимерные пленочные и конструкционные материалы	10	7
			<i>Николаев В.М., Труфанова К.А., Филоненко В.И., Шубин Н.Е.</i> Оптически прозрачные герметизирующие материалы	10	8
			<i>Пойманов А.М., Сергиенко Ю.П., Шубин Н.Е.</i> Герметизирующие материалы для изделий электронной техники	10	10

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Воробьев Г.А., Джатиева Р.Д.</i> Электро- и теплопроводящие клеи для микроэлектроники	10	23	сеня тонких пленок алюминия и его сплавов	5	52
ОБОРУДОВАНИЕ					
<i>Никитин А.В., Никитина М.А., Сурис Р.А.</i> Формирование изо- бражения оптической системой в проекционной фотолитографии	5	27	<i>Махрин П.В., Мелехин Ю.Я., Привалов Е.С.</i> Агрегат нанесения тонких пленок многокомпонентных сплавов магнетронным распыле- нием	5	54
<i>Кадожский И.А., Киселев Б.Г., Онегин Е.Е., Шадурский Г.П.</i> Комплект оборудования для ко- дирования и отображения гра- фической информации	5	32	<i>Лихтман А.Е., Сейдман Л.А.</i> Распы- лительные магнетронные источ- ники для действующего вакуумно- напылительного оборудования	5	55
<i>Вербицкий В.Ф., Киселев Б.Г., Парадинец В.В.</i> Графопостроитель ЭМ-7022	5	34	<i>Акимов В.Н., Рыдзевский А.П.</i> Устройство дозирования энергии при контактной микросварке	5	56
<i>Дьяченко А.А., Кадожский И.А., Колесник Э.М., Файзуллин Р.К.</i> Генератор изображений ЭМ-559	5	34	<i>Земькович В.А., Мазаник В.М., Твердов О.К., Шевцов В.В.</i> Обо- рудование для групповой сборки ИС на ленте	5	58
<i>Гревцев Н.В., Кривоспицкий А.Д., Сежин Ю.Ф.</i> Источники "мягкого" рентгеновского излучения в про- мышленном производстве СБИС	5	36	<i>Горожанцев В.И., Кулешов В.Т., Рыдзевский А.П., Шумьков С.И.</i> Ультразвуковой автомат ЭМ-4020 для монтажа интегральных схем	5	59
<i>Александров И.М., Гревцев Н.В., Кривоспицкий А.Д., Сежин Ю.Ф., Якименко М.Н.</i> Использование синхротронного излучения в рент- геновской литографии	5	41	<i>Гетман Н.А., Куришко В.А., Ляшок А.П.</i> Герметизация плоских корпусов БИС шовной контактной сваркой	5	61
<i>Завалишин А.А., Мороз В.А., Щербаклова З.П.</i> Комплекс универ- сального оборудования для хими- ческой обработки пластин "Лада-1 Электроника"	5	46	<i>Мазаев А.А., Назаров Г.В., Шанов А.М.</i> Полуавтомат герме- тизации корпусов микросхем	5	63
<i>Данильченко А.М., Панчук О.Г.</i> Установка двустороннего экспо- нирования печатных плат 09ФСК-9	5	48	<i>Ваганов А.О., Славинский З.М.</i> Применение микро-ЭВМ для управле- ния технологическими объектами	7	44
<i>Зарякин Н.М., Красанов В.Г., Ло- гунов В.И., Сатаров Г.Х.</i> Агрегат ионного и ионно-химического трав- ления "Трион" с высокочастотной магнетронной системой	5	49	<i>Райтман А.Я.</i> Разрешение и точ- ность оптико-механического обо- удования	7	47
<i>Валеев А.С., Дубовиков В.Б., Евдокимов В.Л., Хрусталева В.А., Щелупиник В.Т.</i> Установка УВП-2М для плазмохимического осажде- ния диэлектрических слоев	5	50	<i>Загурская Л.Г., Коваль В.Я., Сироткин А.П., Ярош Л.Ф.</i> При- менение микропроцессора в полу- автомате разделения полупровод- никовых пластин	7	49
<i>Горелова Л.А., Руднев В.В., Чернышев А.И.</i> Электронно-лучевой испаритель с механизмом ска- нирования	5	51	<i>Битко Л.Г., Лукашов А.И., Малышевский В.П., Ярош Л.Ф.</i> Системы управления сборочным оборудованием	7	50
<i>Беляков А.И., Привалов Е.С., Трунин А.А.</i> Установка для нане-			<i>Горькина И.И., Иванова Г.А., Кириллов Ю.В., Стадник А.М.</i> Автоматизированный комплекс "Оксин-3"	11-12	75
			<i>Александров А.Е., Алексеев М.Н., Мясников Б.И.</i> Установка 02ЖС40-1 для эпитаксиального наращивания арсенида индия	11-12	78
			<i>Александров А.Е., Алексеев М.Н., Ильичева А.А.</i> Блок газонапуска	11-12	78

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Васильев И.Е., Коровин Ю.А.</i> Установка приготовления паст	11-12	79	<i>Беленький В.З., Сейсян Р.П., Шубина Т.В.</i> БГИС-модули — новая элементная база широкополосных телевизионных приемников	4	17
<i>Филатов В.Н., Щербаков Л.В.</i> Установка нанесения паст	11-12	79	<i>Калошкин Э.П., Ключников В.П., Малашкеевич А.А.</i> Электронные приборы точного времени	4	23
ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ					
<i>Малинин А.В., Чернуха Б.Н., Шиллер В.А.</i> Оперативное запоминающее устройство КР188У2 на дополняющих МОП-транзисторах	1	32	<i>Соколов Ю.Б., Трещиков Н.А.</i> Высококачественная бытовая аппаратура магнитной записи	4	27
<i>Базина Н.В., Кирсанова Н.С., Самсонов Н.С.</i> Микросхемы серии К170 для устройства передачи данных в высокопроизводительных ЭВМ	1	33	<i>Росляков А.В.</i> Настольные микрокалькуляторы	4	32
<i>Кожемякин А.Н., Колосовский А.В., Синикаев В.В., Хоменко А.И.</i> Микроомощные КМДП интегральные схемы серии К564	1	35	<i>Парфенов В.И.</i> Электропроигрыватель с тангенциальным перемещением тонарма	4	34
<i>Алекса А.Г., Дульдир В.Н., Ибрагимов Н.С., Седов М.И., Смирнов А.А.</i> Акустический датчик для получения трехмерных изображений	1	38	<i>Бессуднов Р.П., Девятилов Д.Д., Пезов И.И., Смирнов Б.Я.</i> Унифицированный блок вращающихся головок видеоманитофона	4	36
<i>Горовой В.В., Духновский Л.Я., Прибыльский А.В.</i> Одновибратор с повторным запуском К133/155 АГЗ	1	41	<i>Дмитриев Н.Н., Слуцкий Б.Я., Смирнов Б.Я.</i> Электроприводы для видеоманитофонов	4	37
<i>Елизарян Г.А., Манвелян Ю.С., Мнацакяни Г.А., Саркисян А.С.</i> Магнитодиод КД304 — простейшая функциональная твердотельная схема	1	42	<i>Войцехович Б.В., Воронин В.Н., Дерр Г.А.</i> Портативный цветной телевизор "Электроника Ц-430"	4	39
<i>Бачурин В.В., Бычков С.С., Дьяконов В.П., Прушинский А.К.</i> Мощный кремниевый сверхвысокочастотный МДП-транзистор КР908	1	44	<i>Радюк О.М., Соловьев А.В., Шведов Г.Н., Яцына Л.А.</i> Стерефонические телефоны на основе бездиффузионных преобразователей	4	41
<i>Горовой В.В., Носов Ю.Р., Степанова В.Н., Хазавкин Ю.П.</i> Быстродействующая оптоэлектронная переключательная микросхема К249ЛПЗ	1	46	<i>Еремин К.К.</i> Применение ферритовых магнитов в электродвигателях постоянного тока	4	42
<i>Абрайтис В.—Б.Б., Гутаускас А.Р., Лякутис А.В.</i> Высокочастотные делители частоты для синтезаторов частот	1	47	<i>Кобец Е.Н., Литвинова И.В.</i> Использование магнитов из феррита в акустических системах	4	44
<i>Носов Ю.Р.</i> Высокочастотный р-п диод КД413	1	49	<i>Воронцов П.И., Лавидус Л.Е., Пекеров Л.А., Шувалов В.В.</i> Настольные электронные часы "Электроника З-1"	4	45
<i>Новикова Ю.Ф., Поспелова Е.Т., Романова И.Д., Тюменцев В.Д.</i> Сверхбыстродействующие импульсные диоды на основе контакта металл-арсенид галлия	1	50	<i>Белогорцев А.Ф., Гочилев Б.Р., Кормич О.Е.</i> Крупногабаритные электронные часы	4	46
			<i>Вишневецкий С.Е.</i> Цветной малогабаритный телевизор "Электроника Ц-401"	4	48
			<i>Чечель Н.И.</i> Полупроводниковая микросхема К558РР11	6	71
			<i>Даматов Я.М., Никитюк Н.М., Сапожникова Т.Ф., Шюсслер Р.</i> Микропроцессорный контроллер М-16	7	3
			<i>Бобков В.А., Гойденко П.П., Тихомиров С.Н., Черняковский Д.Н.,</i>		

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Шиллер В.А.</i> Микровычислитель с системой команд ряда мини-ЭВМ	7	8	семейства "Электроника С5"	7	38
<i>Воробьев Н.М., Казанцев П.Н., Корнев М.Д., Мамаев Ж.А., Сокол Ю.М.</i> Архитектурные особенности микро-ЭВМ "Электроника НЦ-05Т"	7	9	<i>Большагин И.Д., Шаров Н.Н.</i> Микропроцессор для вычислительного осциллографа	7	40
<i>Тихомиров С.Н., Черных А.Г., Шиллер В.А.</i> Многофункциональная микромошная КМОП БИС арифметического расширителя	7	13	<i>Аграновский С.Г., Васильев В.П., Федоров А.А., Яковлев В.Г.</i> Автоматизация поверочных работ	7	40
<i>Бруевич Д.А., Воробьев Р.М., Вушкарник В.В., Кокорин В.С., Оношко Ю.Т.</i> ОЗУ "Электроника 256К" – базовый блок мультипроцессорных комплексов и сетей ЭВМ	7	16	<i>Вальков В.М., Юликова Н.М.</i> Применение микро-ЭВМ в обучении иностранным языкам	7	42
<i>Гельман М.М.</i> Схемотехника микро-АЦП системного применения	7	18	ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА		
<i>Аксенов М.А., Кобылинский А.В., Мамджян Г.Г., Семенов А.Л.</i> Применение микропроцессорного комплекта БИС серии К580 в системах радиосвязи	7	24	<i>Евсюков Г.Ф., Куплинова Л.Н., Мельничев Ю.М., Ячный Ю.В.</i> Стенд контроля электрических параметров видеоголовок	4	55
<i>Локтев В.Л., Романов С.В., Цапленков Н.П.</i> Создание автоматизированных технологических комплексов высокопроизводительного оборудования в легкой промышленности	7	25	<i>Николаев В.Т., Полушкин Р.П., Сальков А.В.</i> Комплект измерительного оборудования для контроля аппаратуры магнитной записи	4	56
<i>Киселев Б.Г., Минин Б.М., Пардинец В.В.</i> Программные устройства контурного управления на базе микро-ЭВМ	7	27	<i>Чухлиб В.И., Янкелев Е.Л.</i> Окуляр-микрометр с цифровым отсчетом МОЭ-1-15	5	66
<i>Дубаров В.Н., Максименко В.А.</i> Вычислитель на микропроцессорных БИС	7	29	<i>Лаврович В.А., Лебедь Б.М.</i> Электронные трансформаторы тока для бесконтактных измерений в высоковольтных токопроводах	5	67
<i>Борун Ф.Л.</i> Программирование проектных расчетов с использованием ВУМС "Электроника ТЗ-16"	7	30	<i>Георгиев Н.В., Орлов Б.В.</i> Функциональный контроль полупроводниковых запоминающих устройств	6	3
<i>Друян Ю.А., Облапемко А.П.</i> Устройство связи фотонаборных установок с мини-ЭВМ	7	31	<i>Грачев О.Г., Данилин Н.Н., Духовской Л.В., Попель Л.М., Слуцкий Е.Л., Шаромет О.Н.</i> Система "Элекон СФ" для контроля электрических параметров БИС ЗУ и микропроцессоров	6	21
<i>Волков С.В., Малевич Г.И.</i> Контроллер речевого ввода для микро-ЭВМ	7	33	<i>Лабутин Н.И., Мусатова Е.В., Мьякин С.И.</i> Методы электронной микроскопии для исследования электрически активных дефектов в диодных и транзисторных структурах БИС	6	31
<i>Дударов В.Н., Кирилин В.Д., Максименко В.А.</i> Устройство сопряжения микро-ЭВМ с видеотерминалом	7	34	<i>Лабутин Н.И., Парамонова В.Н., Поляков В.Н.</i> Электрохимические методы контроля в технологии создания БИС	6	37
<i>Межов В.Е., Талов И.Л., Черняев Ю.Н.</i> Прикладное программное обеспечение схемотехнического проектирования системы 15УТ-4-017	7	35	<i>Гитцевич А.Б., Крылов И.К.</i> Автоматизация контроля параметров световых приборов	6	41
<i>Таранкова Н.А.</i> Библиотека стандартных подпрограмм микро-ЭВМ			<i>Лонский И.И.</i> Автоматизированный контроль качества полупроводниковых планарных структур	6	45

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Баран Е.Д., Мирошников Е.Н.</i> Многофункциональный логический зонд . . .	6	49	<i>Афанасьев А.М., Захаров Б.Г., Имамов Р.М., Ковальчук М.В.</i>		
<i>Гаврилин Н.И., Демидова Г.Н., Журавлев Э.Н.</i> Характернограф МДП-структур	6	51	<i>Лобанович Э.Ф.</i> Исследование тонких кристаллических слоев полупроводниковых материалов	11-12	47
ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ					
<i>Журавлев Г.И.</i> Перспективы развития основных методов контроля химического состава материалов микроэлектроники	11-12	3	<i>Еарышев В.Н., Батырев В.А., Кудояров М.В., Марин В.П., Меньшенин Ю.В.</i> Исследование структуры металлокерамического катода на основе $W-Y_2O_3-Al_2O_3$	11-12	55
<i>Белоусов В.И., Журавлев Г.И., Шипатов В.Т.</i> Ядерная гамма-резонансная спектроскопия в исследовании материалов электронной техники	11-12	9	<i>Пестов Б.Е.</i> Ультразвуковая исследовательская установка "Эхо-М"	11-12	59
<i>Журавлев Г.И., Карамов А.Г., Саламатин Б.А.</i> Применение радиоактивных изотопов в электронном материаловедении	11-12	12	КОНТРОЛЬ ПЛАСТИН И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ		
<i>Пережогин Г.А.</i> Нейтронно-активационный анализ материалов в планарной технологии	11-12	17	<i>Батавин В.В., Прилипко В.И.</i> Контроль качества пластин полупроводниковых материалов	11-12	61
<i>Прилипко В.И., Проккопьев Е.П.</i> Позитронная аннигиляция — новый метод неразрушающего контроля качества материалов	11-12	20	<i>Вишняков О.Ф., Егоров Н.Н., Сидоров А.И., Чумак В.Д.</i> Анализ качества эпитаксиальных структур по электрофизическим параметрам	11-12	66
<i>Белоусов В.И., Муравьев В.В., Новожилов А.Ф.</i> Масс-спектральное исследование технологических процессов микроэлектроники	11-12	22	<i>Белоусов В.С., Зотов Э.В., Козлов Ю.Ф., Сидоров А.И.</i> Измерение температурных полей с использованием имплантированных слоев	11-12	68
<i>Белоусов В.И., Гладской В.М.</i> Лазерно-плазменная масс-спектрометрия высокого разрешения	11-12	27	<i>Бредихин В.И., Гемкин В.Н., Салманов А.Р., Щелоков А.Н.</i> Неразрушающий контроль времени жизни неравновесных носителей заряда в структурах арсенида галлия	11-12	69
<i>Бескова Э.С., Кульбеда Т.А., Токарева Л.Б.</i> Определение микропримесей неметаллов в особо чистых соединениях бора, фосфора и мышьяка	11-12	30	ОБМЕН ОПЫТОМ		
<i>Афанасьев А.К., Волков А.С., Пелипас В.П.</i> Исследование анодных окислов на поверхности полупроводников $A^{III}B^V$ методом инфракрасной спектроскопии	11-12	32	<i>Анохин Б.Г., Бройтман А.П., Качурин Е.Е., Кукушкин А.М., Москаленко И.Г.</i> Высокопроизводительная установка "Время" для нанесения тонких пленок тугоплавких металлов	1	51
<i>Белый В.И., Захарчук Н.Ф., Смирнова Т.П., Юделевич И.Г.</i> Электрохимические методы анализа технологических сред и тонких слоев	11-12	35	<i>Задде В.В., Зиновьев К.В., Стребков Д.С., Сурьянинова Т.И.</i> Использование растворных композиций при низкотемпературной диффузии фосфора и бора в кремний	1	53
<i>Геркен В.А., Казуров В.К., Пахомов В.И., Сильницкая Г.Б.</i> Рентгеновский контроль монокристаллических элементов	11-12	41	<i>Буравцев А.Т., [Введенский Л.В.], Каплин Л.Н., Эйгель С.И.</i> Формирование фоторезистивного покрытия методом распыления	1	55
			<i>Шульгина Л.А.</i> Организация работы фирменного магазина-салона "Электроника"	4	59

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Медынский О.А.</i> Опыт организации производства малогабаритных телевизоров	4	62			
<i>Булаков С.С.</i> За высокую эффективность производства товаров культурно-бытового назначения	4	63			
<i>Большухин М.А.</i> В интересах покупателей	4	64			
<i>Макаревич М.Я.</i> Дорожить рабочей честью	4	65			
<i>Гуйга В.И.</i> Творческий труд коллектива	4	66			
<i>Богоявленский Е.С., Муляров В.Я.</i> Внимание выпуску товаров народного потребления	4	67			
<i>Адер А.И., Клименская Д.Н., Ленин И.П.</i> Пленки двуокиси олова — перспективный материал для изготовления резисторных чипов и схем	8—9	78			
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТОНКО- И ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИС					
<i>Красов В.Г., Марин К.Г., Усткова Л.С., Хромов А.Д.</i> Диэлектрические материалы для тонкопленочных пассивных элементов ГИС	8—9	79			
<i>Марин К.Г., Рогова И.В., Хромов А.Д.</i> Материалы для тонкопленочных резисторов	8—9	80			
<i>Воробьева Г.В., Кошелев И.Л., Пушкина Г.Н.</i> Влияние структуры керамики на воспроизводимость параметров толстопленочных резисторов	8—9	82			
<i>Красов В.Г., Могилева Л.Н., Пуронене З.М., Турчина Г.В.</i> Рутениевые пасты для создания прецизионных постоянных и переменных толстопленочных резисторов	8—9	84			
<i>Пуронене З.М., Пушкина Г.Н., Турчина Г.В., Чигонин Н.Н.</i> Диэлектрические пасты для межслойной изоляции и изготовления конденсаторов	8—9	86			
<i>Алиева Т.Г., Фомина Е.М., Чигонин Н.Н.</i> Проводниковые пасты на основе драгоценных металлов	8—9	88			
<i>Красов В.Г., Фомина Е.М., Чигонин Н.Н.</i> Проводниковые пасты на основе неблагородных металлов	8—9	89			
			МАТЕРИАЛЫ ОБЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ		
			<i>Грибов Б.Г., Папов В.А., Родионов Р.А., Федоров В.А.</i> Прецизионные пластины для фотошаблонов	8—9	100
			<i>Грибов Б.Г., Гриненко Е.Ю., Родионов Р.А., Соболев И.В., Федорова Д.Л.</i> Подготовка поверхности стеклянных пластин для маскирующих слоев	8—9	102
			<i>Алексеев В.Н., Грибов Б.Г., Родионов Р.А., Федорова Д.Л., Фирсов В.М.</i> Абразивные материалы для прецизионной обработки стеклянных пластин	8—9	105
			<i>Астафурова Н.И., Грибов Б.Г., Мазин А.М., Родионов Р.А., Шевякова Л.Н.</i> Оптимизация режимов механической обработки стеклянных заготовок для фотошаблонов	8—9	108
			<i>Анохин Б.Г., Бобрикова Л.Г., Качурин Е.Е., Кошечко А.В., Мяхиненков В.И., Старшинина Н.А.</i> Маскирующие слои для фотошаблонов на основе карбонильного молибдена	8—9	119
			<i>Бейден В.Е., Грибов Б.Г., Родионов Р.А., Тихонов В.Н.</i> Исследование свойств маскирующих слоев на основе хрома и его соединений	8—9	121
			<i>Казакевич О.В., Кравцов А.К., Кушарева Е.Г., Осипова Н.Г., Филиппов Э.П.</i> Фильтрующие материалы для микроочистки технологических сред ...	8—9	122
			<i>Баратов А.Г., Бекичева Л.И.</i> Металлополимерные носители информации для перфорации лазерным лучом.....	10	24
			<i>Болгов И.С., Бормотов Ю.Л., Бурков А.Т., Гришмановский Л.Е., Орлов А.Д., Хозиков В.С.</i> Применение биметаллов с полосчатыми покрытиями в производстве микропереключателей	10	47
			<i>Болгов И.С., Мутовин В.Д., Нефедов В.И., Трахониотовская О.В.</i> Получение прецизионной плюшевой ленты из вольфрама	10	49
			<i>Болгов И.С., Бусол Ф.И., Волков А.В., Мутовин В.Д.</i> Проволока из алюминиевых сплавов для внутренних соединений в изделиях микроэлектроники	10	51

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
<i>Волков А.Ф., Куценко В.К., Новиков В.В., Палков Н.С., Петров С.В. Суворов В.М.</i> Мягкие режимы термообработки — основа бездефектной технологии микросхем	10	53	Х пленум ЦК профсоюза рабочих радиоэлектронной промышленности	8-9	3 стр. обл.
<i>Дмитриева Г.А., Марин К.Г., Свердлов И.А., Чапов А.В.</i> Перспективные направления химической обработки полупроводников	10	57	<i>Пащенко Н.А.</i> Новости зарубежной электроники	10	64
<i>Александрин Г.Ф., Алябьев И.В., Макаров С.Ю.</i> Механическая обработка кристаллов сапфира	10	58	<i>Новикова Л.С.</i> Выставка-смотр "Научно-техническая информация в СССР"	11-12	90
<i>Пинчук В.Н., Рыбина Г.К., Стефанов Д.Т., Терехов Н.И.</i> Линия очистки сточных вод от мышьяка	10	61	НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ		
<i>Бурляченко В.Ф., Нелюбин А.Ф., Тишин Е.А.</i> Надежный метод контроля качества поверхности деталей полупроводниковых приборов	10	62	<i>Горбунова Г.Г.</i> Организация процесса подготовки формализованных текстов для АИПС в научно-технических редакциях	5	69
<i>Родионова А.А., Яснев В.С.</i> Материалы для химической и фотолитографической обработки кремниевых пластин	10	63	РЕКЛАМА		
ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И КАДРЫ			<i>Александров А.Е., Алексеев М.Н., Ильичева А.А.</i> Установка гомогенизации расплава	1	18
<i>Горбач С.С., Прокопьев А.А.</i> Задачи советов по экономическому образованию в деле совершенствования хозяйственного механизма	6	72	Шестиразрядный жидкокристаллический индикатор на "твист-эффекте" для настольных электронных часов ЖКЦ1-6/18	1	23
Лучшие технологи отрасли	11-12	81	Пластины кремния	3	8
Лучшие по профессии	11-12	88	Фотошаблонная заготовка	3	41
НОВОСТИ. СООБЩЕНИЯ			Монокристаллический теллурид кадмия	3	67
<i>Степанов Н.П.</i> Новости зарубежной электроники	1	57	Тонкие эпитаксиальные кремниевые структуры со скрытыми слоями	3	70
IX пленум ЦК профсоюза рабочих радиоэлектронной промышленности	5	Оборот титула	Полупроводниковое халькогенидное стекло	3	3 стр. обл.
<i>Гузенкова Н.Д.</i> Новости зарубежной электроники	6	73	Монокристаллический фосфид галлия	3	3 стр. обл.
<i>Мисюрев В.С.</i> Новости зарубежной электроники	7	65	Телефонный аппарат "Электроника элетап-Микро"	4	15
			Приставки для телеигр "Видеоспорт", "Экси-видео"	4	16
			Изделия с олимпийской символикой	4	30, 38, 50, 52
			Магнитофон-приставка высшего класса "Электроника ТА1-003"	4	54

	Вып.	Стр.		Вып.	Стр.
Фотовспышка "Данко-50"	4	58	Автоэпитаксиальные структуры арсенида индия — новый материал полупроводниковой электроники	11-12	72
Цветной видеомагнитофон "Электроника-508 видео"	4	3 стр. обл.	Пленочные постоянные магниты из сплава самарий-кобальт	11-12	72
<i>Барил М.А., Иванов В.И., Мялков А.Т.</i> Установка "Эпитрон-С1"	5	3 стр. обл.	Катоды для аргоновых и криптоновых лазеров	11-12	73
<i>Грозов В.С., Галеев А.П.</i> Электронно-оптический микроскоп	6	Оборот титула	Долговечные холодные катоды для атомарных лазеров на парах металлов	11-12	73
<i>Грозов В.С., Манякин Ф.И.</i> Телевизионный оптический микроскоп	6	Оборот титула	Пленочные холодные катоды для атомарных лазеров высокой мощности	11-12	73
Электрохимическая установка для контроля электрически дефектных элементов ИС	6	3 стр. обл.	Плюска из тугоплавких металлов	11-12	74
<i>Агеев В.В., Греков Е.Н., Погарин В.Г.</i> Генератор импульсов тока ГИТ-14	6	4 стр. обл.	Эрозионностойкие электродные материалы для газоразрядных приборов	11-12	74
<i>Гаврилин Н.И., Демидов Г.Н., Журавлев Э.Н.</i> Генератор одиночных импульсов линейно-изменяющегося напряжения	6	4 стр. обл.	Эпитаксиальные структуры арсенид-фосфида галлия	11-12	77
"Электроника БЗ-30"	7	4 стр. обл.	Масс-спектрометр "Эмал-2"	11-12	89
Промышленная установка "Икар"	8-9	4 стр. обл.	Монокристаллический кремний	11-12	104
Монокристаллы сапфира	8-9	4 стр. обл.	Монокристаллический арсенид галлия	11-12	104
Монокристаллический сульфид цинка. Пластины фосфида индия	10	6	Гетероэпитаксиальные структуры кремния на сапфире для КМОП ИС	11-12	104
<i>Борисовский Е.П., Чульева Е.Г., Яковлев Ю.М.</i> Одночастотные газовые лазеры ЛГ-77 и ЛГ-149-1	10	46	Двухслойные кремниевые эпитаксиальные структуры	11-12	104
<i>Орлов Ю.И.</i> Газоразрядные индикаторные крупноэлементные панели ИГПП-32/33 и ИГПП-16/32	10	68	Монокристаллический селенид кадмия	11-12	3 стр. обл.
<i>Лобан В.И.</i> Индикатор матричный газоразрядный ИМГ-1	10	3 стр. обл.	Монокристаллический фосфид индия	11-12	3 стр. обл.
Кремниевые гетероэпитаксиальные слои, выращенные на профилированной сапфировой подложке	11-12	71	Пластины фосфида галлия	11-12	3 стр. обл.
Кремниевые эпитаксиальные структуры со скрытыми слоями n^+ - и p^+ -типов	11-12	71	Эпитаксиальные кремниевые структуры со скрытым слоем	11-12	3 стр. обл.
Эпитаксиальные структуры фосфида индия с буферным слоем	11-12	71	Пластины арсенида галлия	11-12	3 стр. обл.
Новый материал для ионно-плазменного и электронно-лучевого распыления диэлектрических пленок	11-12	72	Эпитаксиальные структуры арсенида индия	11-12	3 стр. обл.

РЕКЛАМА ЭП РЕКЛАМА

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ

Используется для изготовления полупроводниковых монокристаллических пластин в производстве изделий электронной техники.

Диаметр слитка, мм до 150
 Ориентация (100), (111), (110)
 Удельное сопротивление, Ом·см ... 0,005—50
 Легирующая примесь P, B, Sb

Монокристаллические слитки не имеют дислокаций, спиральные и кольцевые неоднородности распределения кластеров (свирл-дефекты) отсутствуют.

Упаковка: тара, обеспечивающая сохранность.

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ АРСЕНИД ГАЛЛИЯ

Используется для изготовления полупроводниковых монокристаллических пластин в производстве изделий электронной техники.

Диаметр слитка, мм до 70
 Ориентация (111), (100)
 Концентрация носителей заряда, см⁻³ 2·10¹⁶—3·10¹⁸
 Подвижность электронов, см²/В·с 2200—4500
 Плотность дислокаций, см⁻² 5·10³—1·10⁵
 Удельное сопротивление полуизолирующего GaAs, Ом·см >10⁵
 Легирующая примесь Te, Cr

Полиэтиленовые пакеты с кристаллами упаковываются в полистироловые коробки.

ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ НА САФИРЕ ДЛЯ КМОП ИС

	Подложка	Гетероэпитаксиальный слой
Диаметр, мм	31; 60	—
Толщина, мкм		
для ϕ 31 мм	250	0,6; 0,8; 1,2
ϕ 60 мм	300	
Ориентация	(1012)	(100)
Направление базового среза	[2201]	[110]
Тип проводимости	—	n
Холловская подвижность носителей, см ² /В·с:		
для толщины 1,2 мкм	—	≥300
для толщины 0,8 и 0,6 мкм	—	≥200
Концентрация носителей заряда, см ⁻³	—	5·10 ¹⁴ —1,5·10 ¹⁵
Структура	монокристаллическая	монокристаллическая

Упаковка: полистироловые коробки.

ДВУХСЛОЙНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ

Используются для изготовления полупроводниковых приборов.

Диаметр, мм 60, 76
 Толщина, мкм

структуры	350—600
первого эпитаксиального слоя	5—80
второго эпитаксиального слоя	1—5

Тип проводимости подложки, первого и второго эпитаксиальных слоев n, p
 Удельное сопротивление, Ом·см

первого эпитаксиального слоя ...	0,1—20
второго эпитаксиального слоя	0,03—10

Плотность дефектов упаковки, см⁻² ... ≤1·10²
 Плотность дислокаций, см⁻² ≤1·10³

Упаковка: полистироловые коробки.



ELECTRONZAGRANPOSTAVKA

THE GENERAL SUPPLIER OF THE PRODUCTS OF THE ELECTRONIC INDUSTRY OF THE USSR

24/2, Ul. Usievicha, Moscow 125315, USSR

Cable: Ezop Telephone: 155-49-15 Telex: 7626

Techsnabexport

Moskva 6-200 ☎ 299 32-85 📠 7239



МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СЕЛЕНИД КАДМИЯ

Используется для изготовления твердотельных электронных приборов.

Диаметр слитка, мм	60
Удельное сопротивление, Ом·см	0,1—10; 10 ⁶ —10 ¹⁰
Подвижность электронов при 300К, см ² /В·с	400—700
Плотность дислокаций, см ⁻²	1·10 ⁴ —1·10 ⁵
Весовое содержание примесей, %	
Si	10 ⁻³ —10 ⁻⁴
Fe	10 ⁻⁴ —10 ⁻⁵
Al	10 ⁻⁴ —10 ⁻⁵
Mg	10 ⁻⁴ —10 ⁻⁵

Полиэтиленовые пакеты с кристаллами упаковываются в полистироловые коробки.

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ФОСФИД ИНДИЯ

Используется для изготовления полупроводниковых монокристаллических пластин в производстве изделий электронной техники.

Диаметр слитка, мм	до 50
Ориентация	(111)
Концентрация носителей заряда, см ⁻³	1·10 ¹⁶ —5·10 ¹⁸
Подвижность электронов, см ² /В·с	1100—4500
Плотность дислокаций, см ⁻²	5·10 ³ —1·10 ⁵
Удельное сопротивление полуизолирующего InP, Ом·см	>10 ⁵
Легирующая примесь	Sn, Te, Fe

Полиэтиленовые пакеты с монокристаллами упаковываются в полистироловые коробки с мягкими прокладками.

ПЛАСТИНЫ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Используются для изготовления эпитаксиальных структур и непосредственно изделий электронной техники.

Диаметр, мм	до 60 (±0,5)
Толщина, мкм	400±5
Тип проводимости	n, p
Ориентация	(111), (100)
Прогиб, мкм	20
Поверхность пластин	полированная

Упаковка: кассеты из полистирола.

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СО СКРЫТЫМ СЛОЕМ

Используются для изготовления полупроводниковых микросхем.

Диаметр, мм	60; 76
Толщина, мкм	
структуры	300—550
скрытого слоя	3—15
эпитаксиального слоя	25—20
Тип проводимости скрытого слоя	n
Поверхностное сопротивление скрытого слоя, Ом/квадрат	10—50
Удельное сопротивление эпитаксиального слоя, Ом·см	0,15—7
Плотность дислокаций в эпитаксиальном слое, см ⁻²	≤1·10 ³
Плотность дефектов упаковки в эпитаксиальном слое, см ⁻²	≤1·10 ²

Упаковка: полистироловые коробки.

ПЛАСТИНЫ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Используются для изготовления эпитаксиальных структур и непосредственно изделий электронной техники.

Диаметр, мм	до 60 (±0,5)
Толщина, мкм	400±15
Тип проводимости	n, p
Ориентация	(111), (100)
Прогиб, мкм	20
Поверхность пластин	полированная

Упаковка: кассеты из полистирола.

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ АРСЕНИДА ИНДИЯ

Используются для изготовления полупроводниковых приборов.

	Подложка	Эпитаксиальный слой
Площадь, см ²	5—10	5—10
Толщина, мкм	400—600	10—60
Тип проводимости	n	n
Ориентация	(100)	(100)
Концентрация носителей заряда, см ⁻³	(1,1—1,2)·10 ¹⁸	(1—10)·10 ¹⁵
Плотность дислокаций, см ⁻²	≤10 ³	≤10 ³

Упаковка: полистироловые коробки.

На первой странице обложки: масс-спектрометр "Эмал-2" (см. с. 89).

Ответственные за выпуск Т. Р. Крылова, Г. В. Потапова
Художник В. А. Чернецов Технический редактор Г. М. Корнеева
Цветное фото на 4с. обл. Б. В. Борисевича
Корректоры Л. П. Данченкова, Е. В. Емельяничкова



Подписано в печать 11.12.80 г.
Т-20477 Формат 60х90/8 Объем 13 п. л.
Уч.-изд. 16 Индекс 3833 28 статей, 33 реф.
Заказ 1168 Тираж 3900 Цена 5 руб. 80 коп.

1

9

8

1

Январь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Февраль

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	

Март

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Апрель

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Май

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Июнь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Июль

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Август

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Сентябрь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Октябрь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Ноябрь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Декабрь

ПН.	ВТ.	СР.	ЧТ.	ПТ.	СБ.	ВС.
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		



ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

