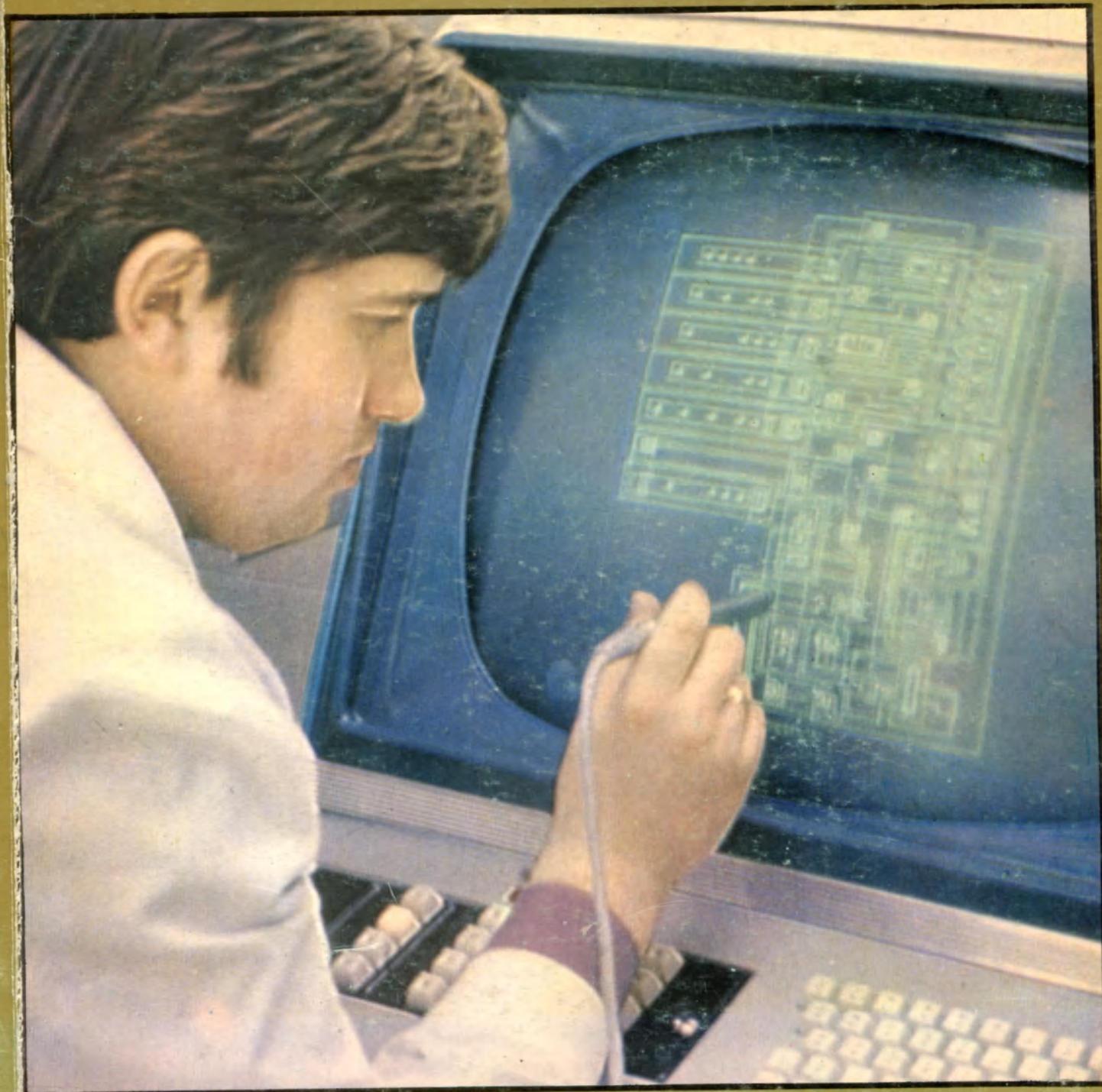




ЭЛЕКТРОННАЯ

4
1979

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



1979

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР • НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. А. Афанасьев,
А. А. Васенков,
Е. А. Гайлиш,
А. С. Гладков,
Г. Я. Гуськов,
Н. Д. Девятков,
С. В. Жигунов,
В. И. Иванов,
А. Ф. Казаков,
А. М. Калугин,
Н. А. Киреев,
А. А. Константинов,
Э. А. Лукин,
А. А. Маклаков,
А. Ю. Малинин,
Ю. Б. Митюшин,
В. С. Морозов,
В. М. Пролейко
(зам. главного
редактора),
В. Д. Степанов,
Ю. Б. Степанов,
А. А. Сорокин,
А. И. Савин,
В. Н. Сретенский,
П. М. Стуколов
(зам. главного
редактора),
Г. Г. Татаровская
(ответственный
секретарь),
Я. А. Федотов,
О. В. Филатов,
С. К. Цаллагов

От одиночного маломощного процессора, предназначенного для выполнения инженерных расчетов, до высокопроизводительного многопроцессорного центрального вычислительного комплекса многоуровневой интерактивной системы проектирования, использующей широкую номенклатуру технических средств и допускающей возможность диалогового режима работы проектировщика — такая эволюция в использовании ЭВМ при разработке изделий электронной техники (ИЭТ) за последние десять лет. Создание и внедрение в практику проектирования подобных систем позволило осуществить разработку принципиально новых ИЭТ: интегральных схем памяти с большой информационной емкостью, микропроцессоров, микро-ЭВМ и др.

Общепринятый термин "машинное проектирование", отражавший одностороннюю (пассивную) связь проектировщика и ЭВМ, устарел и трансформировался в такое емкое понятие как "автоматизация проектирования", которое более полно характеризует сложившуюся совокупность взаимоотношений человека, ЭВМ и программно-управляемых с их помощью технических средств.

В целях обмена накопленным опытом разработки автоматизированных систем проектирования, включая последние достижения в создании системного и прикладного программного обеспечения для высокопроизводительных ЭВМ, в настоящий тематический выпуск включены статьи ведущих специалистов отрасли, подготовленные по материалам научно-технических совещаний, семинаров и конференций, посвященных вопросам автоматизации проектирования ИЭТ.

В качестве информационных сообщений на страницах сборника помещены краткие описания прикладных программ для ЭВМ, содержащихся в отраслевом фонде алгоритмов и программ.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

1979' 4
ГОД ИЗДАНИЯ ДЕСЯТЫЙ • ВЫПУСК (76)



СОДЕРЖАНИЕ

- 3 *Баталов Б.В., Назарьян А.Р., Руденко А.А.* Направления и перспективы автоматизации проектирования изделий электронной техники

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

- 12 *Авдеев Е.В., Баталов Б.В., Назарьян А.Р., Руденко А.А.* Подсистема автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем
- 16 *Авдеев Е.В., Баталов Б.В., Назарьян А.Р., Руденко А.А.* Прикладное программное обеспечение задач автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем
- 23 *Руденко А.А., Чеботаев Е.В.* Расчет результирующего распределения легирующих примесей в двумерных структурах полупроводниковых микросхем
- 26 *Дьяконов В.М., Кремлев В.Я.* Моделирование элементов инжекционно-полевых логических микросхем
- 28 *Авдеев Е.В., Зверев С.А.* Математические модели интегральных диффузионных резисторов
- 33 *Авдеев Е.В., Казуров Б.И., Котко А.П., Мясин Г.М., Назарьян А.Р.* Статистический анализ

параметров нелинейной модели интегрального транзистора

- 39 *Ступаченко А.А.* Система автоматизированного проектирования радиодеталей
- 44 *Вахитов Н.Г., Ершов В.Я., Лукин Э.А.* Автоматизация проектирования приборов квантовой электроники

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

- 47 *Аврашков П.П., Беляков Ю.Н., Егоров Ю.Б., Курмаев Ф.А., Федынский А.В.* Система автоматизированного моделирования и расчета интегральных схем САМРИС-2
- 50 *Кольдяев В.И., Корнюхин В.Т., Корчагин И.Я., Люмаров П.П., Назаров В.Г.* Система автоматизированного проектирования ЗУ на МДП-транзисторах и линейных интегральных микросхем
- 55 *Макарчук В.В., Малышев И.В.* Программное обеспечение схемотехнического проектирования интегральных схем для радиоприемной аппаратуры

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ

- 57 *Оганесьянц Л. Г., Шепелев В. А.* Интерактивная система синтеза топологии БИС
- 65 *Шепелев В. А.* Метод формирования соединительных проводников в топологии БИС
- 69 *Широ Г. Э.* Применение метода топологической трассировки для проектирования соединений в микросхемах
- 74 *Оганесьянц Л. Г., Попова Т. М., Шепелев В. А.* Интерактивная система полного контроля топологии БИС
- 80 *Стемпковский А. Л.* Подготовка данных для изготовления фотошаблонов БИС в автоматизированной системе проектирования
- 83 *Курейчик В. М.* Автоматизация технического проектирования вычислительных структур

ОБМЕН ОПЫТОМ

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ИМС

- 89 *Коккина Г. Е., Чеботаев Е. В.* Программа расчета двумерных распределений легирующих примесей в элементах интегральных схем
- 90 *Руденко А. А.* Программа расчета входных вольт-амперных характеристик многоэмиттерных транзисторов ИС

- 91 *Руденко А. А.* Программа двумерного анализа стационарного состояния МДП-конденсатора
- 92 *Руденко А. А.* Программа расчета нестационарных распределений потенциала и носителей заряда в двумерной структуре МДП-конденсатора
- 93 *Авдеев Е. В., Миргородский Ю. Н., Потапова В. И., Руденко А. А.* Программа расчета динамики заряда в ячейке ПЗС с поверхностным каналом
- 94 *Авдеев Е. В.* Комплекс программ расчета параметров статических моделей интегральных диодов и транзисторов по вольт-амперным характеристикам

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИМС

- 95 *Горбунов Ю. З., Егоров Ю. Б., Федьинский А. В.* Программа детерминированной оптимизации логических биполярных ИС
- 95 *Аврашков П. П., Беляков Ю. Н., Егоров Ю. Б., Федьинский А. В.* Программа анализа ИС
- 96 *Ванагас А. А., Кацнельсон Л. З., Кельман Е. С., Кузьмин В. А.* Программа детерминированного анализа и оптимизации ИС в статическом режиме.
- 97 *Беляков Ю. Н., Курмаев Ф. А., Москаленко И. В.* Программа статистического анализа интегральных схем

АНАЛИЗ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ИМС

- 98 *Вашакидзе Ю. Н., Меняйленко В. В.* Комплекс программ расчета и оптимизации частотной характеристики двухпроводного участка связанных линий
- 99 *Вашакидзе Ю. Н., Меняйленко В. В.* Программа расчета матрицы передачи участка многопроводных связанных линий
- 99 *Вашакидзе Ю. Н., Потапова В. И.* Комплекс программ расчета перекрестных наводок в межсоединениях сверхбыстродействующих логических схем

НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Б. В. БАТАЛОВ, А. Р. НАЗАРЬЯН, А. А. РУДЕНКО

УДК 621.382.8:681.32

В последние годы работы по автоматизации проектирования изделий электронной техники (АП ИЭТ) приобрели такой размах, что уже стало возможным говорить об АП ИЭТ как о самостоятельном научно-техническом направлении отрасли, имеющем важное народно-хозяйственное значение.

Эффективность применения методов и средств АП можно показать на примере проектирования топологии и изготовления фотошаблонов для БИС, поскольку в этой области автоматизация проектирования получила наибольшее распространение. Внедрение систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило существенно уменьшить временной интервал между окончанием этапа разработки топологии БИС и получением комплекта рабочих фотошаблонов (РФШ). Связано это прежде всего с тем, что в настоящее время создано и широко используется высокопроизводительное оборудование для изготовления промежуточных фотооригиналов (ПФО), управляемое с помощью вычислительных машин (преимущественно мини-ЭВМ) и непосредственно включаемое в САПР. Другая причина сокращения временных затрат обусловлена возможностью исключения из полного цикла создания РФШ этапа получения фотооригиналов при изготовлении ПФО методом микрофотонабора. В этом случае существенно улучшаются точностные характеристики изготавливаемых РФШ и, как следствие, увеличивается выход годных БИС.

В недалеком будущем оборудование для изготовления РФШ, а в перспективе и оборудование для переноса изображения послойного топологического чертежа БИС на поверхность полупроводниковой пластины, покрытой фоторезистивным слоем, будет также включаться в состав САПР. Это позволит сократить полный цикл создания БИС до двух основных этапов: проектирования и изготовления.

Приведем для наглядности ряд конкретных цифр, характеризующих эффективность АП БИС на примере использования многоуровневой САПР, построенной по иерархическому принципу, при разработке биполярных БИС. На верхнем уровне двухуровневой САПР в качестве центрального вычислительного комплекса (ЦВК) используется высокопроизводительная ЭВМ БЭСМ-6 с хорошо развитым системным математическим обеспечением (СМО). Применение САПР позволяет повысить степень интеграции по сравнению с ручным проектированием в 60–70 раз. В текущей пятилетке с помощью этой системы предполагается проектировать БИС сложностью до 150–300 тыс элементов на кристалле.

Анализ полученных результатов показывает, что только за первый год десятой пятилетки число спроектированных с помощью САПР ИЭТ увеличилось в 2 раза, в 7 раз возросла максимальная степень интеграции и на 30% уменьшилось время цикла разработки изделий. При этом необходимо учесть, что разработка, например БИС, требует абсолютно безошибочного проектирования. Чтобы спроектировать БИС памяти емкостью 16 кбит, необходимо, помимо выполнения обязательных этапов логического моделирования и отработки принципиальной электрической схемы, скомпоновать в единый топологический чертеж 70–100 тыс. разногабаритных элементов. Конструкторская документация (КД) на такую схему содержит до 500 тыс. точек угловых координат фигур совмещенного топологического чертежа БИС в послойном описании. Высокая степень достоверности получаемой информации (съем цифровых массивов координат угловых точек геометрических фигур с топологического чертежа БИС и ввод их в ЭВМ) такого объема и дальнейшие многочисленные ее преобразования

(сортировка, выделение контуров и т. д.) на пути к изготовлению РФШ равносильны практическому осуществлению проектов сложнейших машин, аппаратов, комплексов и систем.

Поэтому вполне естественно, что реализация таких проектов сравнительно небольшими коллективами специалистов без применения необходимых средств вычислительной техники (ВТ) и широкой номенклатуры периферийного оборудования (ПО), а также развитого системного и прикладного программного математического обеспечения (ППО) становится невыполнимой задачей.

Таким образом, создание САПР на предприятиях отрасли является важнейшей задачей сегодняшнего дня, призванной обеспечить дальнейшее развитие разработок ИЭТ, в частности для обеспечения элементной базы средств ВТ четвертого поколения, радиоэлектронной аппаратуры, а также устройств бытового назначения.

Основные этапы автоматизации проектирования ИЭТ

Первый этап автоматизации проектирования — формализация содержательной постановки задач проектирования ИЭТ. Далее следуют этапы выбора (разработки) вычислительных методов, алгоритмов и программ для всех задач проектирования. Решение формализованных задач проектирования осуществляется с помощью средств ВТ и необходимого ПО.

Таким образом, создание САПР при условии выполнения этапа формализации содержательных задач проектирования ИЭТ сводится к выполнению следующих мероприятий:

сопряжения имеющихся в наличии технических средств (ТС) в единую систему на верхнем и нижнем иерархических уровнях САПР;

разработка (внедрение, доработка) СМО, обеспечивающего надежное функционирование ЭВМ и ПО в реальном масштабе времени, а также решение пакетов прикладных программ (ППП);

разработка ППО для всех содержательных задач АП ИЭТ.

Технические средства САПР, построенной по двухуровневому иерархическому принципу

Верхний уровень предназначен для решения задач АП, требующих высокой производительности

и большого объема оперативной памяти ЭВМ. При разработке БИС к таким задачам относятся:

проектирование элементов БИС (резисторов, диодов, транзисторов, других многоэлектродных полупроводниковых структур) с использованием многомерных физических моделей, базирующихся на основных уравнениях переноса носителей заряда в полупроводниках, расчета многомерного диффузионного профиля сложных многопримесных планарно-эпитаксиальных полупроводниковых структур БИС, статистического расчета и анализа параметров моделей элементов БИС;

логическое проектирование БИС и синтез контролирующих (диагностических) тестов для проектирования электрических схем БИС и последующего исследования изготовленных приборов (устройств);

анализ (расчет статических, импульсных, установившихся и частотных характеристик), оптимизация с использованием детерминированных методов поиска экстремума, статистический расчет, анализ и статистическая оптимизация БИС;

синтез и контроль топологии БИС.

Таким образом, ЦВК предназначен для решения основных трудоемких задач полного цикла проектирования БИС и поэтому особенно необходим при проектировании оригинальных схем.

Другие задачи АП ИЭТ будут рассмотрены ниже при описании ППО САПР ИЭТ.

При построении САПР в качестве ЦВК, как правило, используется ЭВМ БЭСМ-6 с быстродействием 1 млн. оп/с, емкостью оперативной памяти (в полном комплекте) 200 кбайт \times 4 и длиной машинного слова в 48 разрядов.

Для решения задач проектирования сверхбольших БИС (СБИС) со степенью интеграции 150–200 тыс. элементов на кристалле характеристики технических средств верхнего уровня САПР должны удовлетворять следующим требованиям:

быстродействие ЦВК 5–10 млн. оп/с;

емкость оперативной памяти ЭВМ в ЦВК 5–10 Мбайт;

длина машинного слова 64–80 разрядов;

развитая внешняя память на магнитных дисках (НМД);

емкость каждого пакета НМД не менее 100 Мбайт;

возможность комплексирования больших ЭВМ ЦВК в единую вычислительную систему.

Нижний уровень ТС САПР. Опыт эксплуатации САПР, имеющих в своем составе автоматизирован-

ные рабочие места (АРМ) проектировщиков типа 15УТ-4-017, представляющие собой интерактивные системы проектирования на мини-ЭВМ (элементов, электрических схем и топологии в случае проектирования БИС), показал их высокую эффективность. Так, например, процесс проектирования топологии БИС при использовании САПР, оснащенных современными техническими средствами, ускоряется в 4–5 раз.

Кроме системы 15УТ-4-017, при проектировании ИЭТ нашли широкое применение унифицированные по отрасли автоматизированные рабочие места (АРМ) проектировщиков. Однако сравнение возможностей этих двух различных систем указывает на явные преимущества системы 15УТ-4-017: по точностным характеристикам используемых технических средств (графопостроитель, кодировщик), по производительности технических средств (мини-ЭВМ, НМД, дисплей), по наличию возможности выхода на автоматизированную систему изготовления фотошаблонов (АСИФ).

Исходя из этого, на применение АРМ следует ориентироваться прежде всего разработчикам топологии печатных плат, СВЧ приборов и радиокомпонентов (радиоэлементов).

Интерактивные системы проектирования (ИСП) на нижнем уровне технических средств разрабатываются с использованием графических и алфавитно-цифровых дисплеев, кодировщиков, графопостроителей, накопителей на магнитных лентах и дисках, а также ЭВМ М-6000, М-7000, "Электроника-100И", "Электроника-К200", "Электроника-100-25".

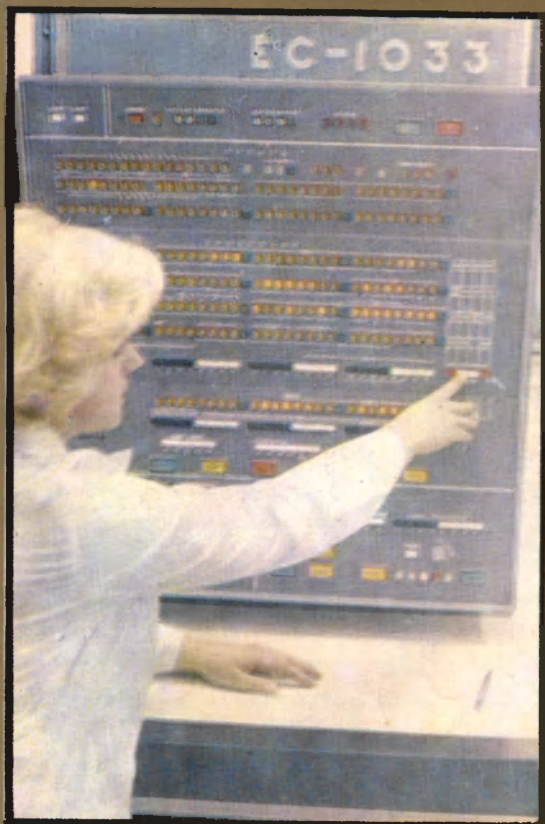
Характеристики технических средств ИСП, разработанных к настоящему времени, улучшаются такими темпами, что они стали оказывать существенное влияние на ускорение темпов развития соответствующего СМО. Наглядный пример тому – взаимосвязь между появлением в составе ИСП кодировщика топологии и повышением уровня языка описания информации о топологическом чертеже БИС.

Для примера рассмотрим интерактивную систему проектирования и контроля топологии и фотошаблонов БИС, построенную на основе мини-ЭВМ. Быстродействие мини-ЭВМ в различных вариантах систем лежит в пределах от 0,2 до 1 млн. оп/с, объем оперативной памяти в диапазоне 16–128 кбайт. Типичным представителем такой мини-ЭВМ является ЭВМ "Электроника 100-25". Мощности ЭВМ расходуются в основном на работу операционных

систем (ОС), трансляцию и решение ППП, а также на контроль, преобразование информации о топологическом чертеже БИС и регенерацию изображения на экранах дисплеев, если используются дисплеи, не имеющие возможности запоминания графической информации на экране ЭЛТ. Все типовые ИСП укомплектованы современными НМЛ и НМД. Внешняя память (ДЗУ) предназначена для долговременного хранения библиотек прикладных программ, программ ОС, а также цифровой информации о топологическом чертеже БИС. ДЗУ может служить также для ввода исходной информации и для выдачи преобразованной соответствующим образом информации по каналу связи в АСИФ. Исходная информация об элементах и фрагментах топологии БИС вводится в ЭВМ с помощью кодировщика (считывателя координат), являющегося преобразователем графической информации в цифровую. Одним из необходимых требований к внешним устройствам системы, обеспечивающим ввод, предварительную обработку и подготовку исходной информации, является сокращение времени выполнения этого этапа при одновременном повышении достоверности информации. Выполнение такого условия достигается благодаря переходу от электромеханических перфораторов к клавишно-магнито-ленточным и клавишно-дисковым устройствам, в которых данные вводятся через клавиатуру устройства непосредственно на накопители НМД, НМЛ, а затем поступают для дальнейшей обработки в процессор ЭВМ.

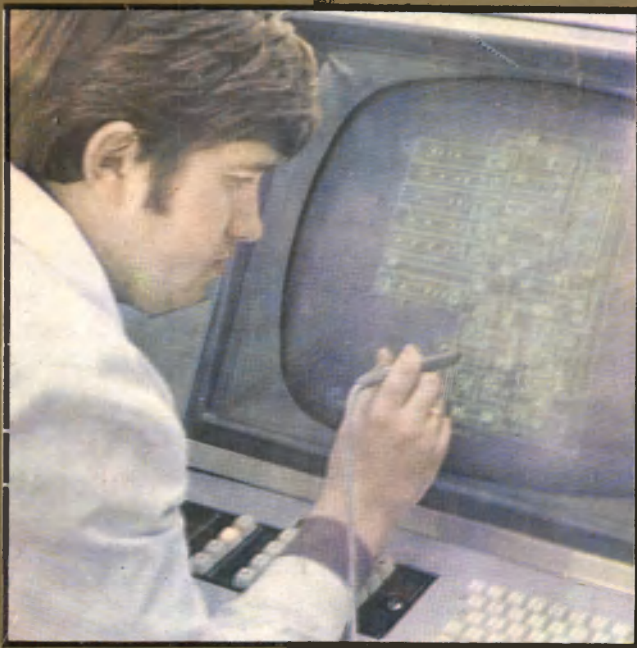
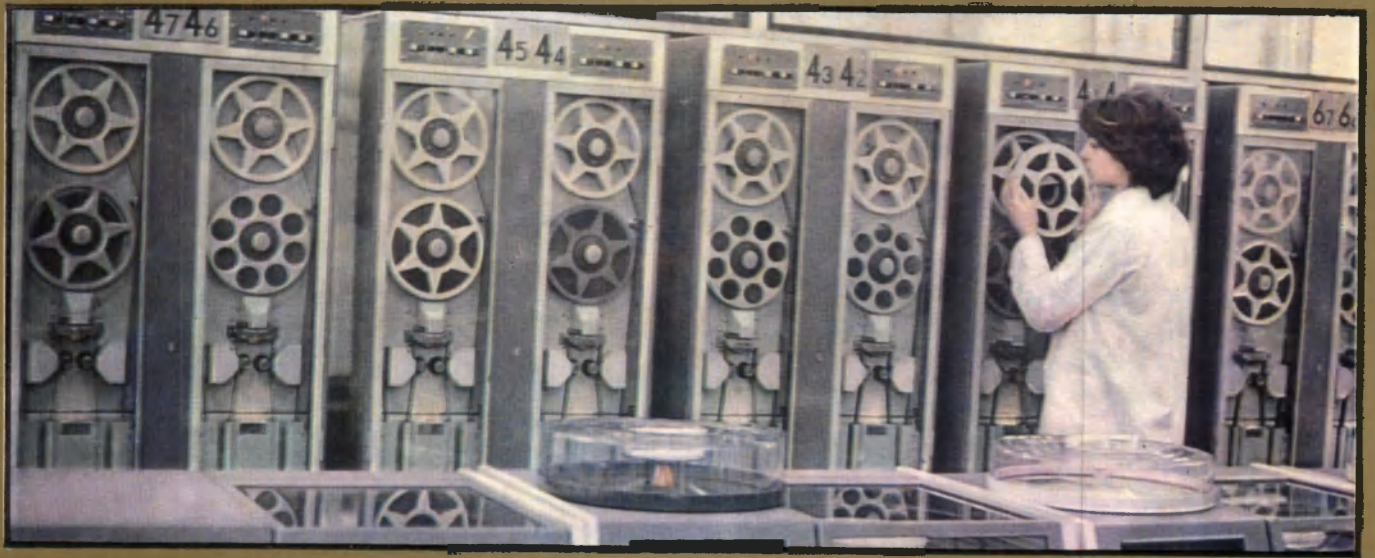
Рассматриваемая система может находиться только на нижнем уровне САПР БИС. На верхнем уровне будут решаться более трудоемкие задачи из общего цикла проектирования БИС, например обрабатываться топология элементов с учетом оптимального ее выбора относительно конструктивно-технологических ограничений. Такая информация поступает в мини-ЭВМ из верхнего уровня или по специальному каналу связи или через НМД и НМЛ.

Для отладки топологии в рассматриваемой системе предусмотрены АРМ проектировщиков, оснащенные графическими и алфавитно-цифровыми дисплеями, а также считывателями координат. Удобство работы оператора-проектировщика и производительность системы в целом определяются не столько характеристиками используемой мини-ЭВМ, сколько возможностями графического дисплея, являющегося устройством быстрого отображения определенной части топологии БИС или ее фрагментов на световом экране ЭЛТ. Помимо графических дисплеев с регенерацией изображения



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИС
ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ
СОВОКУПНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ,
ПОЗВОЛЯЮЩИХ
ОДНОВРЕМЕННО ПРОЕКТИРОВАТЬ
БОЛЬШОЕ ЧИСЛО СХЕМ





при проектировании топологии БИС в интерактивном режиме все чаще используют графические дисплеи с запоминающими ЭЛТ, не требующими регенерации изображения, в которых отсутствует мерцание при любой сложности изображения на экране. Представляет также интерес использование одновременно двух ЭЛТ: для отображения полного рисунка топологии БИС в малом масштабе и того фрагмента топологии, с которым работает оператор-проектировщик в данный момент времени. Работа с индивидуальным графическим стереодисплеем, на экраны которого выводятся формируемые с помощью ЭВМ пары стереопроекций, позволяет оператору исследовать объемное изображение объекта. Это свойство стереодисплея можно использовать для решения задач проектирования элементов БИС, радиокомпонентов, электровакуумных и СВЧ приборов и устройств на их основе.

Рассмотрим устройства вывода результатов (информации) из ИСП. Рулонный графопостроитель используется для быстрых, хотя и менее точных по сравнению с планшетным графопостроителем, прорисовок. Зачастую на нем сразу же прорисовывается вводимая с кодировщика информация для последующего визуального контроля. Планшетный графопостроитель в свою очередь применяется для документирования отлаженной информации о топологии БИС, а также для выполнения совмещенных прорисовок общего вида топологии с целью их окончательного контроля. В систему включается, как правило, один из упомянутых выше типов графопостроителей. Роль координатографов в системе проектирования топологии БИС к настоящему времени значительно уменьшилась: фотошаблоны изготавливаются с помощью генераторов изображений (ГИ), оперативный контроль топологии выполняется с использованием дисплея, а результаты работы системы могут документироваться на установках микрофильмирования, значительно сокращающих расходы бумаги, а также время вывода из системы графической и символической информации. Для микрофильмирования, как правило, используется метод воспроизведения информации на экране ЭЛТ с последующим отъемом на фотопленку. Разработан и реализован также электронный метод записи данных на выходе ЭВМ, что позволяет осуществлять вывод информации непосредственно на микрофильм без применения ЭЛТ. Существуют также и устройства ввода графической информации с микрофильма в ЭВМ, работающие по принципу сканирования.

Для последующего использования результатов проектирования топологии информация преобразовывается к виду, воспринимаемому ГИ для изготовления ПФО с помощью МФНУ или электронно-лучевой установки (ЭЛУ).

Анализ характеристик технических средств и их возможностей для построения ИСП нижнего уровня САПР показал, что важной и актуальной задачей в АП ИЭТ является дальнейшая разработка АРМ (интерактивных систем) для проектирования элементов и принципиальных электрических схем БИС. Для реализации рабочих мест такого типа необходимо создание специального СМО для мини-ЭВМ, организация каналов связи мини-ЭВМ с периферийными устройствами и с ЭВМ ЦВК, в памяти которой хранятся библиотеки прикладных программ для решения задач проектирования элементов и электрических схем БИС.

Системное математическое обеспечение задач АП ИЭТ

В состав системного математического обеспечения обычно включаются:

- специализированные операционные системы для проектирования ИЭТ с применением ЭВМ;
- программное обеспечение хранения информации (контроль, редактирование, ввод—вывод) и информационно-поисковых систем;
- специализированные языки проектирования ИЭТ с использованием ЭВМ; программные средства для оптимизации ППО;
- программное обеспечение диалогового режима общения разработчика и ЭВМ, а также АРМ;
- программное обеспечение машинного обмена, телеобработки, контроля и передачи данных;
- программное обеспечение связи ЭВМ с оператором и распределения ресурсов, супервизоры и средства отладки;
- генераторы технической и отчетной документации;
- программное обеспечение связи с периферийными устройствами;
- контроль технических средств и тесты программного обеспечения.

В области модернизации СМО АП ИЭТ возникает необходимость в децентрализации работ. Необходимо создать ассоциации пользователей такими ИСП, как система 15УТ-4-017 с центрами, расположенными на соответствующих головных (по направлениям АП ИЭТ) предприятиях. Следует также предо-

ставить возможность квалифицированным пользователям подключать к системе дополнительные ТС (программно-управляемого технологического оборудования), а также ППО. Представляется целесообразным обязать разработчиков ТС для САПР самим разрабатывать СМО и оснащать им ТС, что дает возможность сопрягать новые ТС с уже имеющимися ИСП ИЭТ.

Организация диалогового режима проектирования. Диалоговый подход и реализацию интерактивного проектирования ИЭТ можно осуществить, например, с помощью редактора текстов в системе "Дубна" (для ЭВМ БЭСМ-6) и нестандартного диалогового сервиса, что позволит вести обмен с задачей операторами любого алгоритмического языка или командами ассемблера, или составляющими их частями, а также управляющими картами мониторинной системы или их частями с использованием стандартных трансляторов. Для организации диалоговой системы с произвольным интерактивно создаваемым пакетом задачи необходимо осуществить заикливание процесса трансляции задачи с помощью чтения специально организованного текста с внешних носителей. На этой основе можно создать библиотеки диалоговых пакетов программ, вызываемые по запросу с терминала через стандартный паспорт и представляющие проектировщику все возможности библиотеки прикладных программ немедленно, в произвольном порядке, не требуя ни перезапуска задачи, ни предварительной подготовки информации на магнитных носителях.

Общематематическое программное обеспечение (ОПО). К ОПО относятся программы, оформленные в виде стандартных и хранящиеся на НМД, НМЛ и на НМБ. Программы ОПО составляют так называемые общематематические библиотеки программ и предназначены для решения задач линейной алгебры, обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными, интегральных уравнений, вычисления значений специальных функций и др.

Прикладное математическое обеспечение задач АП ИЭТ

Проектирование топологии БИС и фотошаблонов. Основная доля работ по разработке прикладного математического обеспечения задач АП ИЭТ приходится на разработку программ по проектированию топологии БИС.

В задаче АП топологии БИС можно выделить два направления: синтез топологии с помощью ЭВМ; редактирование и контроль топологии в интерактивном режиме.

Первая задача предполагает решение принципиально сложного вопроса, связанного с построением общей математической модели топологии БИС, поэтому она до сих пор еще не решена полностью. В этом плане особенно перспективен разрабатываемый эскизный подход к решению задачи синтеза топологии, если к его реализации привлечь ИСП.

Редактирование и контроль топологии может осуществляться с помощью ИСП нижнего уровня САПР, описание и последовательность функционирования которой были рассмотрены выше. Из общих задач по АП топологии БИС, подлежащих решению, можно выделить следующие:

– Создание единого языка описания информации о топологическом чертеже БИС. Введение такого языка описания графических данных, помимо решения основных задач упрощения кодирования, уменьшения избыточности в представлении информации, удобства преобразования информации и осуществления ее контроля, позволяет унифицировать формы представления конструкторской документации (КД) на ИЭТ, разрабатывать программно-управляемое оборудование, входящее в состав ТС САПР, одновременно с его СМО и ППО и таким образом сделать их независимыми от разработки СМО и ППО остальных направлений САПР; сблизить задачи синтеза топологии и проектирования фотошаблонов.

– Разработка экономичных алгоритмов преобразования топологической информации к виду, воспринимаемому ГИ. Подобные алгоритмы должны допускать возможность обработки информации о геометрических фигурах произвольного вида на чертеже топологии БИС. В то же время следует переходить к их унификации, например, углы наклона линий должны быть зафиксированы (заданы) и т.д.

– Выработка рекомендаций по созданию транслятора и компоновщика с языка описания топологии, что особенно важно для этапа редактирования текста описания топологии БИС.

– Программное решение задачи выявления соответствия между топологической и принципиальной схемами БИС. Этот этап является основным в контроле топологии. Разработанные программы, устанавливающие соответствие между топологической и принципиальной схемами БИС, пригодны

только для определенного, весьма ограниченного класса схем и требуют выполнения слишком большой дополнительной работы при кодировании топологии, что в свою очередь связано с появлением новых ошибок в тексте описания топологии БИС.

— Доработка системы 15УТ-4-017 для перевода ее из режима редактирующей ИСП в режим проектирующей ИСП. В редактирующей ИСП размещение элементов БИС на кристалле и проведение внутрисхемных межсоединений осуществляются вручную, исключая случаи повторяющихся фрагментов. В проектирующей же ИСП основная доля работ по размещению элементов БИС и проведению внутрисхемных межсоединений выполняется с помощью ЭВМ с отображением результатов проектирования на экране ЭЛТ графического дисплея.

— Унификация КД на БИС.

Схемотехническое проектирование В настоящее время на предприятиях отрасли вопросы схемотехнического проектирования решаются комплексно. Созданы и продолжают развиваться системы схемотехнического проектирования, включаемые в состав САПР БИС и оснащенные специальными языками описания электрических схем, трансляторами, а также библиотеками прикладных программ по всем видам схемотехнического проектирования. В ближайшее время специалистам данного направления АП ИЭТ предстоит решить ряд актуальных задач.

Необходимо создать единый универсальный язык описания электрической схемы и транслятор к нему для всех видов расчетов (статического и динамического режимов работы БИС, частотных характеристик, статистического анализа, детерминированной и статистической оптимизации и т.д.).

Настала необходимость в разработке программ для расчета линейных схем высокой степени интеграции.

Требуется комплексное решение задач организации АРМ (участков) АП элементов и электрических схем БИС.

Логическое проектирование и синтез контролируемых тестов. Автоматизация этапа логического проектирования стала объектом пристального внимания разработчиков САПР ИЭТ. Разработчики СБИС пользуются опытом разработчиков узлов ЭВМ и соответствующим программным обеспечением. Однако интегральное исполнение СБИС (калькуляторы, микропроцессоры) имеет свою специфику, что особенно проявляется на этапе контроля электрической схемы на функционирование.

ППО этапа разработки логической схемы СБИС дает возможность сформировать полное описание логического устройства и проверить правильность его функционирования, сформировать на основе логического описания описание принципиальной электрической схемы для проектирования топологии, проанализировать полноту контроля на тестах, выдать комплект КД.

В состав систем логического моделирования (СЛМ) входят язык представления исходной информации, язык режимов моделирования и соответствующие ППП СЛМ с широким набором средств, обеспечивающих поиск ошибок в логическом описании СБИС. Для этих целей используются средства синтаксического и семантического контроля, вывода временных диаграмм в процессе моделирования, перехода по условию к различным тестовым последовательностям, выявления генерируемых элементов.

Системы построения контролируемых тестов (СПКТ) ориентированы на генерацию функциональных (в предположении одиночных) неисправностей типа "пост.0" или "пост.1" на входах и выходах логических элементов. Построение тестов возможно для схем, представляемых в виде тактируемых моделей. Синхронные и асинхронные схемы могут быть описаны тактируемыми моделями. Выходной информацией СПКТ является тестовый массив и результаты анализа полноты контроля, выдаваемые в виде таблиц неисправностей и графиков проверяемости неисправностей на тесте. СПКТ, как правило, имеют средства, обеспечивающие интерактивный режим работы между разработчиком и ЭВМ.

Представляется перспективным создание специализированного АРМ для решения задач логического проектирования БИС и СБИС и синтеза контролируемых тестов, подобных АРМ проектирования элементов и электрических схем БИС.

Проектирование радиокомпонентов. Возросший уровень требований, предъявляемых к радиокомпонентам РЭА, выдвинул в свою очередь в число первоочередных задач оптимальный выбор рецептур разрабатываемых и используемых материалов, режимов проведения технологических процессов, повышения обоснованности решений, принимаемых на основании результатов испытаний изделий. Сложность физических процессов и отсутствие достаточно полных представлений о механизмах формирования свойств материалов, используемых для изготовления радиокомпонентов, требуют экспериментальных методов разработки материалов и

технологических процессов, таких, как методы математической теории эксперимента, реализуемые с помощью ЭВМ.

Проектирование радиокомпонентов как завершенных приборов связано с необходимостью разработки программ расчета электростатических полей в конденсаторных структурах с учетом многообразных нерегулярных областей, металлических включений и др.

По данному направлению АП ИЭТ представляется целесообразным оснастить предприятия, занимающиеся разработкой радиокомпонентов, ЭВМ типа ЕС 1033, так как решение задач АП радиокомпонентов требует привлечения немалых вычислительных мощностей; воспользоваться накопленным опытом в АП радиокомпонентов в области применения методов математической теории планирования эксперимента и распространить его на такую еще малоисследованную область, как АП надежности микронизированных устройств на основе ИЭТ; перейти от разработки отдельных программ, решающих задачи АП, к разработке САПР радиокомпонентов.

Проектирование электровакуумных и микронизированных СВЧ-устройств. В области АП электровакуумных, электронно-лучевых и СВЧ приборов основные усилия направлены на создание ППО. Это связано с необходимостью решения разнообразных сложных краевых задач электродинамики, электронной оптики, взаимодействия электронных потоков с СВЧ полями. Решение подобных задач возможно на ЭВМ с производительностью не хуже, чем у БЭСМ-6. Наибольшие успехи достигнуты в области автоматизации схемотехнического проектирования гибридных ИС СВЧ, изготовления фотошаблонов для микрополосковых устройств и др.

Основные задачи сводятся к разработке АРМ проектирования и созданию соответствующих СМО

и ППО; разработке САПР электровакуумных и микронизированных СВЧ устройств, работающих в интерактивном режиме.

Таким образом, основные задачи, которые предстоит решить в области создания САПР требуемой номенклатуры изделий электронной техники, сводятся к следующему.

В отрасли должен получить самое широкое распространение модернизированный вариант комплекса 15УТ-4-017, предназначенный не только для решения задач редактирования и контроля топологии, но и задач синтеза топологии, расчета элементов и принципиальных электрических схем, логического моделирования и синтеза контролируемых тестов, для организации нижнего уровня ТС в больших многоуровневых САПР и организации связи САПР с программно-управляемым технологическим оборудованием при изготовлении ПФО и РФШ.

Следует продолжить оснащение ЦВК основных центров машинного проектирования отрасли высокопроизводительными многопроцессорными ЕС ЭВМ для выполнения сложнейших расчетов, связанных с количественными оценками физических явлений в полупроводниках и других перспективных для электронной техники материалах, с целью последующего их использования при проектировании ИЭТ; для организации АРМ, с помощью которых решаются отдельные задачи проектирования ИЭТ, в единую высокопроизводительную САПР.

Целесообразно к работе координирующего центра по развитию программных и технических средств эксплуатируемых и разрабатываемых САПР ИЭТ и в дальнейшем привлекать широкий круг специалистов предприятий отрасли, занимающихся вопросами автоматизации проектирования.

Статья поступила 26 сентября 1978 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е. В. Авдеев, Б. В. Баталов,
А. Р. Назарьян, А. А. Руденко

ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Приведено описание высокопроизводительной унифицированной подсистемы проектирования элементов интегральных микросхем, функционирующей в составе системы автоматизированного проектирования БИС.

УДК 621.3.049.77.001.2

По характеру внешних и внутренних связей, техническому составу и системному математическому обеспечению подсистема проектирования элементов ИМС является унифицированной и обеспечивает:

- разработку, программную реализацию, отладку, доводку, модернизацию, опытную и производственную эксплуатацию прикладного математического обеспечения;

- накопление и статистическую обработку данных по технологии формирования структуры, топологии

- элементов и характеристикам тестовых образцов;
- подготовку статистических данных по параметрам моделей элементов;
- подготовку, формирование и системное сопровождение текущих, опытных и производственных задач;
- редактирование, документирование и диалоговое сопровождение на всех этапах подготовки и обработки данных, опытных и производственных задач, результатов;
- формирование, комплектование, распространение и документальное сопровождение библиотек прикладных и системных программ;
- подготовку, испытание и совершенствование системного математического обеспечения;
- проведение операций по подготовке, планированию, координации, экспертированию и внедрению научно-исследовательских и опытно-конструктор-

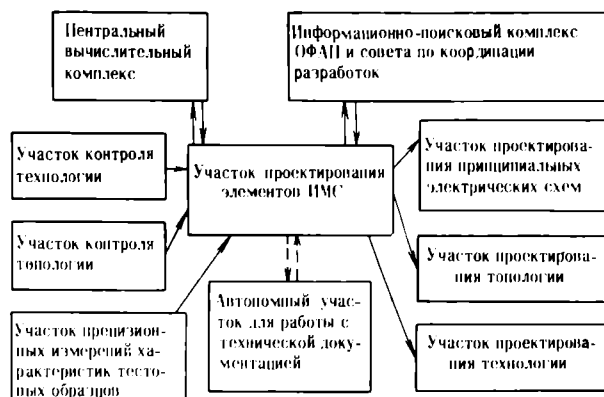


Рис. 1. Схема внешних связей подсистемы проектирования элементов ИМС

ских работ по автоматизации проектирования элементов интегральных микросхем.

Внешние связи подсистемы проектирования элементов (ППЭ) интегральных схем отображены на рис. 1.

Центральный вычислительный комплекс (ЦВК), состоящий из одной или нескольких скомплексированных ЭВМ высокой производительности, получает с ППЭ пакеты программ на языке загрузки собственной операционной системы (ОС), под управлением собственной приоритетной системы пропускает их через процессор и передает результаты на буфер обменов участка. Для диалоговых задач устанавливается высший приоритет входа в процессор, если из подсистемы в данный момент времени поступает подтверждение о возможности сеанса связи. В этом случае ОС центрального вычислительного комплекса обеспечивает интерактивное взаимодействие своего процессора с подсистемой.

Информационно-поисковый комплекс отраслевого фонда алгоритмов и программ (ОФАП) и совета по координации разработок получает заказы на поиск текстовой информации по каталогам, спискам, библиотекам, системам, а также по программам и описаниям, техническим заданиям и разработкам; передает запрашиваемую информацию на буфер обменов подсистемы; принимает в накопители текстовую информацию с буфера обменов подсистемы для организации информационных и программных фондов, распространения, экспертизы и внедрения разработок.

С участка контроля технологии передаются в подсистему проектирования элементов статистические данные по параметрам технологических процессов и результатам контрольных замеров тестовых образцов.

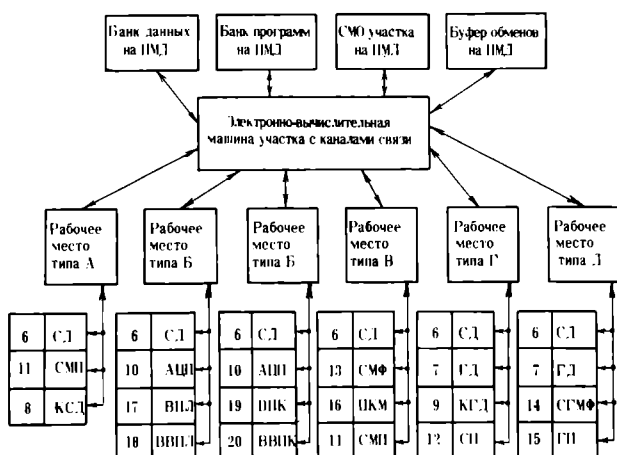


Рис. 2. Структурная схема подсистемы проектирования элементов ИМС

С участка контроля топологии на ППЭ поступают статистические данные по результатам контроля топологических параметров на фотошаблонах и тестовых кристаллах.

Участок прецизионных измерений предназначен для передачи на ППЭ статистических данных по измеренным статическим, переходным и установившимся электрическим характеристикам тестовых образцов.

На участок проектирования принципиальных электрических схем поступают с ППЭ статистические данные о параметрах математических моделей элементов ИМС, включая их зависимости от параметров технологических и топологических моделей.

С ППЭ участок проектирования топологии получает статистические рекомендации по корректировке топологических параметров элементов, а участок проектирования технологии – рекомендации по корректировке параметров технологических процессов с учетом реально существующих разбросов.

Автономный комплекс для работы с технической документацией, рабочие места которого по числу штатных сотрудников и нештатных (обучающихся и стажирующихся) входят в комплект ППЭ, предоставляет в распоряжение сотрудников механизированные и автоматизированные средства работы с картотеками, каталогами, технической литературой, техническими материалами, включая читальные аппараты и проекторы микрофильмов, микрофишей и слайдов и организует прием, хранение, использование и уничтожение технической документации с соблюдением необходимых режимов специального доступа.

Структурная схема подсистемы автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем показана на рис. 2. Быстродействие ЭВМ с 32 каналами связи составляет около $20 \cdot 10^4$ оп/с, а емкость ОЗУ 256 кбайт. ППЭ оборудован шестью рабочими местами пяти типов:

– тип А служит для системного обеспечения функционирования подсистемы и укомплектован символьным дисплеем (СД), устройством символьной печати (СМП) и устройством копирования с экрана символьного дисплея (КСД);

– тип Б предназначен для подготовки, формирования и сопровождения разрабатываемых и производственных задач и укомплектован СД, алфавитно-цифровым печатающим устройством (АЦП) и устройствами ввода и вывода данных на перфоленты (ВПЛ, ВВПЛ) и перфокарты (ВПК, ВВПК); такое

рабочее место одновременно может выполнять функции рабочего места А;

— тип В служит тем же целям, что и тип Б, но позволяет вводить большие объемы данных и документировать больший объем результатов; укомплектован СД, СМП, цифровым кассетным магнитофоном для ввода-вывода данных (ЦКМ) и устройством символьного микрофильмирования (СМФ);

— тип Г предназначен для подготовки, запуска и сопровождения разрабатываемых, испытываемых и производственных задач с использованием диалого-графического обмена и интерактивной графики и снабжен кроме СД графическим дисплеем (ГД), устройством копирования с экрана графического дисплея (КГД) и быстродействующим строкопечатающим устройством (СП);

— тип Д позволяет документировать большие объемы графической информации всех типов задач, преимущественно производственного характера, для чего в комплект вводятся кроме СД и ГД устройство символьного и графического микрофильмирования (СГМФ) и планшетный или рулонно-планшетный графопостроитель (ГП).

В минимальном комплекте участок может функционировать с одним-двумя рабочими местами типа Б.

Системное математическое обеспечение (СМО) участка автоматизированного проектирования предназначено для:

- реализации и сопровождения обменов информацией по всем внешним и внутренним каналам связи;
- интерактивного редактирования текстовой информации с любого из шести рабочих мест;
- управления работой терминальных устройств;
- обработки текстов на языках программирования различного уровня;
- сопровождения потока задач с использованием собственного процессора, канала связи с ЦВК и буфера обменов;
- обеспечения диалоговых режимов общения проектировщика с ЭВМ на всех этапах работы, включая пошаговую трансляцию через собственный процессор и процессор ЦВК при любой заданной структуре и организации банков данных и буфера обменов;
- ведения статистики отказов и каталогов загрузки по всем устройствам участка и внешним каналам связи.

Системное математическое обеспечение содержит диспетчер, ряд необходимых мониторинговых систем,

редакторов, производственных общих и специализированных диалоговых систем и постоянно находится в стадии развития, расширения, модификации при строгом соблюдении преемственности последовательных версий, обеспечивая безусловную защиту банков программ, данных и СМО с соблюдением необходимых режимов специального доступа:

- диспетчер обеспечивает функционирование внешних и внутренних каналов связи;
- доступ в банки данных, программ и ОС осуществляется только с рабочих мест участка;
- внешние каналы связи функционируют исключительно через буфер обменов;
- банк программ организован по библиотечному принципу;
- банк данных имеет файловую структуру с динамическим и статическим распределением памяти;
- структура банка СМО — статическая;
- надежность СМО имеет решающее значение и должна быть безусловной даже в ущерб стоимости и производительности участка и многократно превышать степень надежности функционирования внешних и внутренних устройств, каналов связи с ЭВМ;
- все требования, особенности и изменения ОС ЦВК своевременно учитываются в СМО участка.

Прикладной программный комплекс, создаваемый, развиваемый и эксплуатируемый в производственном режиме участка проектирования элементов ИМС, должен обеспечивать решение следующих задач:

- расчет (моделирование) физических структур элементов с учетом всех особенностей технологического процесса изготовления ИМС и последовательности выполнения его этапов;
- синтез математических моделей и идентификацию их параметров для физических структур элементов;
- физическое моделирование удельных электрических характеристик элементов в двумерном приближении по поперечному сечению для статического, переходного и установившегося (включая малосигнальное приближение) режимов;
- физическое моделирование электрических характеристик элементов с планарной, двумерной структурой по упрощенным физико-топологическим приближениям в статическом и динамическом режиме;
- физическое моделирование канальных элементов с одномерным переносом заряда и двумерным в поперечном сечении распределением заряда и электрического поля;

— синтез математических моделей элементов ИМС с идентификацией параметров по измеренным или рассчитанным характеристикам для статического, переходного и установившегося (включая малосигнальный) режимов;

— статистический расчет, анализ и оптимизацию параметров моделей элементов схем;

— синтез аппроксимирующих зависимостей для всех перечисленных выше этапов;

— программное сопровождение данных по изменениям характеристик элементов ИМС на тестовых образцах.

С помощью прикладного программного обеспечения должен решаться комплекс задач проектирования элементов биполярных, МДП и ППЗ ИМС:

— диффузионный резистор; одно- и многопроводные металлические межсоединения, контактные площадки, неоднородности межсоединений, емкостные и индуктивные металлизированные элементы; емкость на основе объемного заряда $p-n$ перехода или МДП структуры; диод; транзистор; многоэмиттерный и многоколлекторный транзистор; планарный диод Шоттки; полевой транзистор с барьером Шоттки в качестве затвора; транзистор с барьером Шоттки, шунтирующим коллекторный $p-n$ переход; латеральный транзистор; транзистор с инжекционным питанием; инжекционно-полевой транзистор; вертикальные транзисторные структуры;

— МДП элементы ИМС с металлическим и поликремниевым затворами, в состав которых, кроме планарных, входят V -МДП, D -МДП и $D-V$ -МДП транзисторы;

— ППЗ элементы ИМС с поликремниевыми затворами, поверхностным и объемным каналами, двух- и многотактные;

— элементы ИМС, изготавливаемые по КСДИ-технологии (кремний с полной диэлектрической изоляцией), планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией окислом, диэлектриком, $p-n$ переходом, технологии со щелевой изоляцией с применением диффузии или ионного легирования;

— перспективные элементы ИМС, принципы работы которых основаны на новых физических явлениях, создаваемые по новой технологии или с использованием иных материалов.

Программы двумерного (по сечению и в плане) физического моделирования характеристик функциональных элементов ИМС должны допускать анализ прямоугольных областей и произвольное расположение омических контактов.

Участок проектирования элементов ИМС пред-

назначен для работы подразделения численностью до 30 штатных и нештатных работников и позволяет:

— разрабатывать новое прикладное математическое обеспечение объемом до 1000 условных операторов в месяц;

— модифицировать прикладное математическое обеспечение объемом до 2000 условных операторов в месяц;

— проводить опытную эксплуатацию и включение в систему прикладного математического обеспечения программ объемом до 3000 условных операторов в месяц;

— модифицировать системное математическое обеспечение объемом до 10000 команд в месяц;


— проводить производственное проектирование элементов ИМС объемом до 500 вариантов в месяц;

— передавать в ОФАП и внедрять на других предприятиях системное и прикладное математическое обеспечение объемом до 2000 условных операторов в месяц;

— готовить техническую документацию по программам до 20 единиц в год и по проектам ИМС до 100 единиц в год;

— обеспечивать практическое обучение студентов, практикантов и повышение квалификации специалистов-проектировщиков ИМС в количестве не менее 10 человек в год.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

·ЭП·

РЕКЛАМА

НОВАЯ КНИГА

**СОВРЕМЕННЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ
РЕШЕНИЯ ОБЫКНОВЕННЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Пер. с англ. Под ред. Дж. Холла, Дж. Уатта.
М., "Мир", 1979, 14 л., 14000 экз.

Монография содержит обстоятельное изложение теоретических и практических методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Представлен полный набор лучших из существующих алгоритмов решения, а также обзор последних достижений теории как для начальных, так и для краевых задач. Рассматриваются уравнения с запаздывающим аргументом, интегро-дифференциальные уравнения Вольтерры, задача Коши для жестких систем уравнений.

Е. В. Авдеев, Б. В. Баталов,
А. Р. Назарьян, А. А. Руденко

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

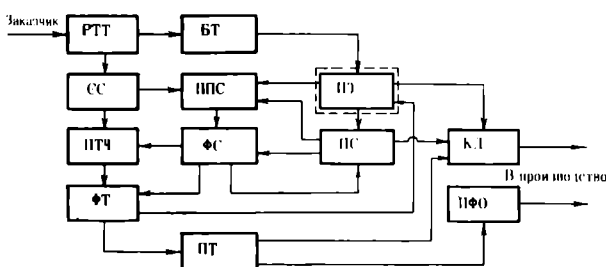
Приведена классификация основных содержательных задач, решаемых подсистемой автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем. Обсуждаются характеристики и возможности комплекса программ на ЭВМ БЭСМ-6, решающего поставленные задачи.

УДК 621.382.82.001

Этапы проектирования интегральных микросхем

Процесс проектирования интегральных микросхем (ИМС) от постановки задачи до получения конструкторской документации и промежуточных фотооригиналов для изготовления фотошаблонов может быть укрупненно представлен в виде совокупности ряда обязательных этапов (см. рисунок):

- разработка технических требований (РТТ);
- логический или функциональный синтез электрической схемы (СС);
- выбор базовой технологии изготовления ИМС (БТ);



Блок-схема взаимодействия основных этапов проектирования интегральных микросхем

- подготовка эскизного варианта принципиальной электрической схемы (ППС);
- подготовка эскизного варианта совмещенного топологического чертежа ИМС (ПТЧ);
- фрагментация принципиальной электрической схемы и совмещенного топологического чертежа (ФС, ФТ);
- проектирование и оптимизация элементов ИМС (ПЭ);
- проектирование и оптимизация принципиальной электрической схемы по фрагментам и в целом (ПС);
- проектирование и отладка фрагментов и совмещенного топологического чертежа ИМС (ПТ);
- выпуск конструкторской документации и подготовка на машинных носителях информации для изготовления промежуточных фотооригиналов (КД, ПФО).

Этапы разработки, изготовления и контроля тестовых ячеек и образцов элементов и схем для выполнения задач оптимизации и статистической обработки рассматриваться не будут, так как они значительно усложнят приведенную блок-схему.

Проблемы снижения трудоемкости, повышения помехозащищенности и ускорения выполнения каждого этапа решаются с применением большой номенклатуры технических средств, включая вычислительную технику [1]. Это связано прежде всего с тем, что некоторые этапы пока не поддаются автоматизации и принято ограничиться лишь их механизацией, тогда как ряд уже автоматизированных этапов проектирования ИМС в ближайшем будущем может быть переведен на автоматическое функционирование.

Обсуждаемые задачи автоматизации одного из этапов проектирования ИМС включают расчет, оптимизацию и статистическую обработку характеристик и параметров моделей элементов интегральных микросхем (блок ПЭ).

Основные направления в проектировании элементов интегральных микросхем

Процесс проектирования элементов интегральных микросхем можно представить следующими четырьмя основными направлениями:

- проектирование (расчет и оптимизация) физической структуры элемента;
- проектирование электрических характеристик элемента;
- проектирование модели элемента;
- проектирование топологии элемента.

По каждому из перечисленных направлений условимся выделять прямые и обратные задания на проектирование.

Прямое задание на проектирование по первому направлению содержит описание последовательности этапов технологического процесса изготовления ИМС с указанием значений параметров на отдельных термических операциях (времен, температур, поверхностных концентраций и др.), а также значения электрофизических констант используемых материалов (например, кремния, арсенида галлия), реагентов и геометрических размеров областей элементов ИМС на фотошаблонах с учетом их изменения при проведении операций фотолитографии, травления, диффузии и др.

Затем формулируется краевая задача для уравнения диффузии с соответствующими граничными и начальными условиями, которая решается, как правило, с помощью конечно-разностных методов [2].

В результате получают распределения легирующих примесей (одномерные или двумерные) в отдельных слоях полупроводниковых структур элементов ИМС, представленные в графическом или табличном виде, или численные значения параметров аппроксимирующих зависимостей.

Результаты расчета могут быть представлены как суммарные (без учета типа проводимости, арифметическая сумма) и результирующие (с учетом типа проводимости, алгебраическая сумма) распределения легирующих примесей в одномерных многослойных участках [3] или в двумерных поперечных сечениях элементов ИМС, которые в свою очередь используются в качестве исходных данных для программ расчета электрических характеристик и параметров моделей элементов ИМС.

Решение граничной задачи расчета результирующего распределения легирующих примесей с пространственно-временными координатами в роли независимых переменных, записанной в аналитической или алгоритмической форме, представляет собой физическую модель структуры элемента ИМС в том случае, если все входные параметры имеют локальный физический смысл и характеризуют исходный материал, технологическую операцию или топологический чертеж ИМС. Алгоритмическую или аналитическую формы представления результирующего распределения легирующих примесей, входные параметры которых интегрально описывают физическую сущность процессов, назовем математической моделью структуры элемента.

Следует отметить важное практическое значение так называемых физико-математических мо-

делей, в которых лишь некоторые степени свободы соответствуют параметрам, имеющим локальный физический смысл. Связано это прежде всего с тем, что физические модели являются весьма трудоемкими; математические модели, напротив, требуют небольших затрат машинного времени. Физико-математические модели характеризуются, с одной стороны, относительно малой трудоемкостью при их использовании в процессе проектирования ИМС и, с другой, — сохраняют возможность варьирования физических параметров, что делает их незаменимыми при решении задач оптимизации и статистического анализа элементов ИМС.

Обратное задание на проектирование по первому направлению содержит экспериментальные данные поэтапного контроля интегральных и локальных параметров создаваемой структуры элемента ИМС (например, удельные сопротивления диффузионных слоев, глубины залегания p - n переходов).

Результатом моделирования для обратного задания по первому направлению является модель (физическая, математическая или физико-математическая) структуры элемента ИМС [4], которая может быть представлена аппроксимирующими зависимостями распределений легирующих примесей (поэтапными или результирующей) либо в табличной форме.

Прямое задание на проектирование по второму направлению содержит физическую, математическую или физико-математическую модели структуры элемента, электрофизические постоянные исходного материала и легирующих примесей, геометрические размеры областей структуры и электрический режим работы элемента в составе ИМС по каждому контакту [5–9].

На основе известных представлений о характере физических процессов токопереноса в полупроводниках и полупроводниковых приборах строится распределенная многомерная модель элемента ИМС, описываемая нелинейной системой уравнений в частных производных второго порядка с соответствующими граничными и начальными условиями.

В общем случае данная система уравнений включает в себя уравнение Пуассона для электростатического потенциала, два уравнения непрерывности для подвижных носителей заряда (электронов и дырок) и называется фундаментальной системой уравнений для полупроводника (ФСУ).

Результатом моделирования являются следующие характеристики: статические (зависимости между токами и постоянными напряжениями смещения на контактах); переходные (зависимости меж-

ду токами и заданными непериодическими импульсами напряжения смещения на контактах); установившиеся (временные или спектральные представления токов при периодических синусоидальных или импульсных напряжениях смещения на контактах).

Несмотря на то, что конечная цель выполнения прямого задания на проектирование по второму этапу состоит в установлении взаимосвязи между токами, протекающими через контакты элемента, и приложенными к этим контактам напряжениями смещения, первичными характеристиками, которые получаются в результате решения соответствующей граничной задачи для ФСУ, являются распределения электростатического потенциала, электронов и дырок. В случае необходимости вычисляются распределения электрического поля и плотностей токов электронов и дырок. Возможность получения такой информации позволяет оптимальным образом проектировать элемент ИМС с учетом особенностей реальных физических процессов, протекающих внутри прибора. В связи с этим прямые задания на проектирование по первому и второму направлениям можно отнести к задачам физического моделирования элементов ИМС.

Для решения прямой задачи по второму направлению могут быть использованы и другие физические, физико-математические и математические модели, связывающие между собой токи и напряжения с помощью коэффициентов, отражающих физические свойства структуры элемента ИМС.

Обратное задание по второму направлению может быть сформулировано как отдельное направление, главной задачей которого является синтез математической модели элемента ИМС с последующей идентификацией ее параметров. Математическая модель элемента связывает между собой физические переменные — напряжения, токи и время, а входящие в нее постоянные не имеют явно выраженной связи с параметрами технологического процесса, электрофизическими характеристиками используемых материалов и линейными топологическими размерами элемента.

Исходными данными для прямой задачи третьего направления проектирования служат семейства вольт-амперных, переходных и установившихся электрических характеристик элемента ИМС, а результатом моделирования — математические модели, интегрально отражающие параметры технологического процесса изготовления ИМС, характеристики используемых материалов и топологию элемента.

Обратной задачей третьего направления явля-

ется синтез вольт-амперных, переходных и установившихся электрических характеристик элемента ИМС при заданных математической модели элемента и значениях постоянных.

Прямая задача четвертого направления решается с использованием совокупности физических, физико-математических и математических моделей технологических процессов производства фотомасок, Исходными данными в этом случае служат координаты угловых точек топологических областей элементов (по технологическим слоям) на этапе проектирования топологии ИМС, а результатом моделирования являются реальные значения линейных геометрических размеров окон в маскирующих слоях на кристалле до проведения диффузионных операций или же размеры металлизированных областей после напыления и последующего травления.

Обратная задача по четвертому направлению не представляет практического интереса.

По всем упомянутым направлениям, кроме второго, существует особый класс математических моделей, параметры которых описывают статистические свойства изучаемых процессов, отражая тем самым реально существующие характеристики технологических процессов, оборудования и материалов. За исходные данные для обратного задания на проектирование элементов ИМС в этом случае берутся статистические законы распределения, гистограммы, корреляционные матрицы, а результат моделирования представляется в виде сгенерированных статистических таблиц выборок заданной размерности и порядка.

Для прямого задания на проектирование исходными данными служат статистические выборки, а результатом моделирования — параметры статистических законов распределения, корреляционные матрицы, регрессионные зависимости.

Библиотека программ автоматизированного проектирования элементов ИМС

Комплекс прикладных программ проектирования элементов ИМС на ЭВМ БЭСМ-6 разрабатывался в рамках принятой выше идеологии.

Решены задачи по следующим направлениям:

- физическое и математическое моделирование технологических процессов изготовления диффузионных структур;
- физическое моделирование электрических процессов в полупроводниковых приборах;
- тополого-физическое моделирование электри-

ческих процессов в полупроводниковых приборах;

- тополого-технологическое математическое моделирование электрических процессов в полупроводниковых приборах;

- математическое моделирование электрических процессов в полупроводниковых приборах;

- моделирование линейных пассивных приборов и межсоединений;

- создание специального общематематического обеспечения.

Библиотека программ автоматизированного проектирования элементов ИМС включает в себя следующие программы (программы, описание которых приведено в работе [10], здесь не рассматриваются).

PRØMEK – программа расчета результирующего распределения легирующих примесей в характерных многослойных участках полупроводниковых структур ИМС: объем 400 условных операторов, 7 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 112 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 2 мин.

Программа **PRØMEK** предназначена для расчета результирующего распределения легирующих примесей в произвольном вертикальном сечении диффузионной структуры ИМС (одномерная модель), сформированной в результате проведения многоэтапного термического процесса.

В качестве отдельных термических этапов рассматриваются следующие технологические операции: диффузия примесей из внешних источников постоянной концентрации; перераспределение примесей в процессе окисления или отжига и эпитаксии; легирование растущей эпитаксиальной пленки примесью из внешнего источника.

Программа позволяет также учитывать потери части примеси на отдельных этапах в результате окисления и испарения атомов примеси с поверхности.

MEPDIK – программа расчета результирующего распределения примесей в двумерной диффузионной структуре ИМС: объем 400 условных операторов, 4 подпрограммы; зарезервированный объем оперативной памяти 185 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 6 мин.

Программа **MEPDIK** предназначена для расчета двумерного результирующего распределения легирующих примесей в полупроводниковых структурах ИМС, сформированных в результате проведения многоэтапного термического процесса. Рассматриваются следующие технологические операции: диффузия примеси из внешнего источника постоян-

ной концентрации через щель (первая стадия); перераспределение примесей при всех последующих термических процессах и эпитаксиальном наращивании.

Возможен также случай произвольного начального распределения примесей, задаваемого пользователем программы.

SIDIPK – программа синтеза диффузионного профиля транзисторной структуры: объем 445 условных операторов, 12 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 36 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 13 мин.

Программа **SIDIPK** предназначена для расчета параметров аппроксимаций результирующего распределения легирующих примесей в транзисторной структуре по заданным значениям удельных поверхностных сопротивлений диффузионных слоев $\vec{\rho}_s$ и глубин залегания p - n переходов \vec{x}_s . Задача синтеза диффузионного профиля по заданным значениям $\vec{\rho}_s$ и \vec{x}_s сформулирована в виде последовательности задач нелинейного программирования, состоящих в определении координат минимумов функций, описывающих отклонения расчетных значений $\vec{\rho}_s$ и \vec{x}_s от заданных значений \vec{x}_s^0 и $\vec{\rho}_s^0$ в пространстве независимых переменных – параметров аппроксимаций легирующих примесей. Задача синтеза решается при дополнительных ограничениях на значения независимых переменных. Ограничения разделяются на две группы. К первой группе относятся ограничения общего технологического содержания. Ограничения второй группы конкретизируют заданную диффузионную структуру.

RDSBDK – программа расчета параметров модели Эберса-Молла и статических характеристик транзистора в двумерном приближении: объем 850 условных операторов, 16 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 149 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 240 мин.

Программа **RDSBDK** предназначена для расчета электрических характеристик и параметров транзисторной структуры в двумерном приближении. В качестве математической модели используется ФСУ для полупроводника (уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок). Уравнения аппроксимируются на пятиточечном шаблоне. Полученные разностные уравнения решаются методом последовательной верхней релаксации.

Электрические характеристики и параметры транзистора рассчитываются по найденным в результате решения ФСУ распределениям электро-

статического потенциала, дырок и электронов.

DIØD1K – программа двумерного моделирования нестационарных характеристик диодной структуры: объем 400 условных операторов, 7 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 126 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 35 мин (в интервале $0 < t \leq 100$ нс).

Программа DIØD1K предназначена для расчета переходных характеристик полупроводникового диода в режимах среднего и большого уровня сигнала. Основой программы является алгоритм численного решения нестационарной краевой задачи для ФСУ, использующий сочетание асимптотического и численного методов. На контактах диодной структуры предполагаются выполненными условия электронейтральности и бесконечной скорости рекомбинации и, кроме того, предполагаются известными зависимости значений потенциалов от времени. На остальной части внешней границы диодной структуры предполагаются справедливыми отражающие граничные условия. Результатом расчета по данной программе являются эпюры токов на контактах.

TRAN1K – программа двумерного расчета переходных характеристик полупроводниковых структур биполярных ИМС: объем 900 условных операторов, 20 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 185 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 16,5 мин (точка на ВАХ).

Программа TRAN1K предназначена для расчета переходных и статических (методом установления) характеристик диодов, транзисторов с изоляцией обратномещенным *p-n* переходом, окислом или с комбинированной изоляцией, многоэмиттерных и многоколлекторных транзисторов, транзисторных структур ИМС с инжекционным питанием, обращенных транзисторных структур и др.

При расчете характеристик предусмотрена возможность управления прибором от генераторов напряжений или токов по любому из пяти омических контактов.

В качестве математической модели исследуемого полупроводникового прибора используется ФСУ с соответствующими граничными и начальными условиями.

Программа TRAN1K применима для анализа полупроводниковых структур ИМС в режимах среднего и высокого уровня инжекции.

Для решения ФСУ используется метод, рассмотренный в работах [11] и [12]. На первом этапе формулируется краевая задача, решение которой позволяет определить первый член асимптотического разложения [12] искомых функций в ряд по сте-

пеням малого параметра ϵ (отношение дебаевского радиуса экранирования к характерному линейному размеру). На втором этапе сформулированная задача решается численно. Дифференциальные уравнения при этом аппроксимируются с помощью чисто неявной разностной схемы, имеющей первый порядок по времени и второй – по пространственным координатам. Аппроксимация граничных условий имеет в общем случае первый порядок. Для решения полученных в результате аппроксимации нелинейных алгебраических уравнений используется итерационный алгоритм, основанный на верхней релаксации [11].

GREDIK – программа расчета диффузионных резисторов сложной геометрии с неоднородной проводимостью методом прогноза с коррекцией: объем 253 условных оператора, 11 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 165 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 5 мин.

Программа GREDIK предназначена для расчета сопротивлений между двумя контактными площадками элементов ИМС (диффузионных резисторов) сложной геометрии с неоднородной проводимостью в двумерном (в плоскости кристалла) приближении.

Исходной информацией для программы GREDIK служат топология элемента, описываемая обобщенной геометрической моделью резистора [13], и величины удельных поверхностных сопротивлений различных подобластей структуры.

В процессе работы программы GREDIK рассчитывается распределение потенциала в рассматриваемой области методом прогноза с коррекцией [14] и вычисляется сопротивление между контактными площадками.

GNØNPK, GNØNJK – программы расчета распределения потенциала в транзисторе с учетом влияния *p-n* перехода: объем 317 условных операторов, 18 подпрограмм и 464 условных оператора, 16 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 165 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 4,5 и 6,5 мин соответственно.

Программа GNØNPK предназначена для расчета распределения потенциала в различных областях транзисторных структур с учетом влияния *p-n* перехода в виде экспоненциальной зависимости плотности втекающего (или вытекающего) тока от разности потенциалов на *p-n* переходе (нелинейная задача) [15].

В процессе работы программы GNØNPK рассчитываются значения потенциала в узлах разностной сетки, покрывающей рассматриваемую область, эквипотенциалей с заданным шагом, а так-

же омическое сопротивление анализируемой области.

Программа GNONJK предназначена для решения нелинейной задачи распределения потенциала в транзисторе с учетом влияния p - n перехода методом релаксационного прогноза с коррекцией [13].

МЭТ66К – программа расчета входных вольт-амперных характеристик многоэмиттерного транзистора: объем 400 операторов, 7 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 185 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 1,5 мин.

Программа МЭТ66К предназначена для расчета двумерных распределений потенциалов и токов в структуре многоэмиттерного транзистора (нелинейная задача) с числом эмиттеров до 66. Отличие программы МЭТ66К от программ GNONPK и GNONJK заключается в следующем:

- используется специальный вид топологии многоэмиттерного транзистора [16];

- предусмотрена работа в режимах расчета распределения потенциалов и ВАХ по каждому из эмиттеров, расчета стабилизирующих (выравнивающих) резисторов в цепях инжектирующих эмиттеров для выравнивания амплитуд эмиттерных токов, значений токов, протекающих через инжектирующие эмиттеры МЭТ при заданных значениях резисторов, включенных в цепь каждого из эмиттеров;

- используется комбинированный численный метод решения уравнений для потенциала: на первом этапе задача решается методом установления, на втором – решение задачи осуществляется специальным итерационным методом до достижения заданной точности.

ТРАЕМК – программа статистического расчета параметров нелинейной модели интегрального транзистора: объем 800 условных операторов, 9 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 185 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 30 мин на сто реализаций.

Программа ТРАЕМК предназначена для моделирования параметров структуры и геометрии (входные параметры для расчета транзистора) по заданным законам распределения в пределах изменения границ технологических допусков; расчета выходных параметров интегрального транзистора по моделируемым входным параметрам с использованием приемлемой (по точности и затратам машинного времени) модели транзистора [3]; вычисления статистических характеристик параметров интегрального транзистора и корреляционных

связей между параметрами интегрального транзистора.

СТАТИК – программа расчета статических параметров нелинейной топологически-инвариантной модели биполярного транзистора в нормальном активном режиме: объем 400 условных операторов, 12 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 64 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 6 мин.

Программа СТАТИК предназначена для расчета параметров модели Голубева-Кремлева [17] интегрального транзистора по измеренным характеристикам. За исходные данные расчета параметров модели транзистора по программе СТАТИК берутся результаты измерений ВАХ и топологические размеры областей. Синтезированная модель транзистора является моделью с постоянными коэффициентами. Для описания характеристик p - n переходов используются удельные параметры.

ДБАСПК – диалоговая библиотека автоматизированной системы проектирования элементов (компонентов) ИМС: объем программ ДБАСПК – 1195 операторов, объем библиотеки пакетов – 102 оператора.

При создании ДБАСПК разработаны программные средства, обеспечивающие интерактивный обмен через алфавитно-цифровой дисплей на этапе решения задачи, а также язык сопровождения диалога, позволяющий учесть качественные отличия диалогового режима от автоматического; предложен способ организации диалогового формирования и редактирования пакетов задач и текстов подпрограмм с поэтапной обработкой их мониторной системой "Дубна" и трансляторами, что дает возможность создавать библиотеки принципиально новых объектов – диалоговых пакетов; разработан способ заикливания диалоговой системы и отдельных диалоговых пакетов для многовариантных расчетов с интерактивным формированием и редактированием пакетов и текстов подпрограмм; при этом в качестве оперативного архива применяются магнитные барабаны, долговременный архив создается, используется и уничтожается с помощью локального банка данных [18] или мониторной системы.

Диалоговая библиотека (ДБ) состоит из библиотеки диалоговых прикладных программ и библиотеки пакетов задач, и имеет системный вызов "ДБАСПК". Обе библиотеки размещены на системном магнитном диске 2048.

ФДАВК – комплекс программ расчета доверительных границ при дисперсионном анализе: объ-

ем 200 условных операторов, 9 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 50 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 1,5 мин.

Комплекс программ Φ DDAVK предназначен для приближенного расчета критических значений или доверительных границ распределений χ^2 - квадрат, Фишера [19] и однородности [20, 21].

STANAK — программа статистического анализа параметров математических моделей элементов ИМС: объем 1300 условных операторов, 17 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 165 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 2 мин.

Программа STANAK предназначена для расчета числовых статистических характеристик и законов распределений параметров математических моделей элементов ИМС.

GENAPK — диалоговая программа работы с временным и постоянным архивом числовых таблиц функциональных зависимостей: объем 300 условных операторов, 10 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 100 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 1 мин.

Программа GENAPK разработана как управляющая диалоговая программа для программного комплекса задач обобщенной функциональной аппроксимации. Диалоговый пакет того же наименования обеспечивает решение задач аналитической аппроксимации функциональных зависимостей, заданных в табличном виде, а именно интерактивное задание и выбор функционального базиса в линейном скалярном и векторном пространстве; на множествах нелинейных скалярных или векторных функций.

MULT4K — программа расчета передаточных характеристик многопроводных участков межсоединений: объем 175 условных операторов, 7 подпрограмм; зарезервированный объем оперативной памяти 117 кбайт; коммерческое время счета одного варианта 0,5 мин.

Программа MULT4K предназначена для расчета передаточных характеристик многопроводных участков межсоединений многокристалльных БИС (МБИС) и ИМС с учетом потерь в проводниках и диэлектрике подложки при произвольном расположении на полюсах участков комплексных нагрузок и источников монохроматических сигналов.

Дальнейшее развитие представленного программного обеспечения задач проектирования элементов ИМС предполагает:

возможность проектирования элементов, использующих новые физические принципы работы и

изготовленных с помощью новых технологических процессов;

переход к функционально-интегрированным элементам ИМС и их моделям;

введение интерактивных режимов работы с прикладными программами на всех направлениях проектирования элементов ИМС, что в свою очередь позволит снизить требования относительно квалификации пользователей программ в области программирования и избавит их от необходимости детального ознакомления с правилами работы с программами;

переход от детерминированных моделей элементов ИМС к статистическим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назарьян А.Р., Баталов Б.В., Авдеев Е.В., Руденко А.А. Участок автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем. — См. настоящий выпуск.
2. Чеботаяев Е.В., Руденко А.А., Кокина Г.Е. Численный анализ диффузионных процессов с учетом динамики роста эпитаксиальной пленки. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
3. Назарьян А.Р., Руденко А.А., Авдеев Е.В., Чеботаяев Е.В. Расчет статических параметров математической модели транзистора для автоматизированных программ анализа биполярных интегральных схем. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 4.
4. Авдеев Е.В., Чеботаяев Е.В., Дьяконов В.М. Синтез диффузионной структуры интегрального транзистора. — В кн. Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
5. Миргородский Ю.Н., Руденко А.А., Шипилин А.В. Расчет нестационарных характеристик биполярного транзистора по двумерной физико-топологической модели. — В кн.: Современные методы разработки РЭА. Материалы семинара. М., МДНТП, 1977.
6. Руденко А.А. Программа двумерного расчета статических и импульсных характеристик полупроводниковых структур биполярных интегральных схем — TRANIK. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.
7. Авдеев Е.В., Миргородский Ю.Н., Потапова В.И., Руденко А.А. Моделирование на ЭВМ характеристики ячейки трехтактного ПЭС с поверхностным переносом заряда. — В кн. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Вып. 3. М., "Сов. радио", 1978.
8. Казеннов Г.Г., Майоров С.А., Руденко А.А. Метод расчета входных вольт-амперных характеристик многоэмиттерных транзисторов. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.
9. Майоров С.А., Михайлов Г.Б., Руденко А.А. Расчет стационарных распределений потенциала и носителей заряда в МДП — конденсаторе. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.
10. Казеннов Г.Г., Авдеев Е.В. Библиотека программ автоматизированного проектирования элементов ИПС. — В кн.: Машинные методы проектирования электронных схем. Материалы семинара. МДНТП, 1975.
11. Миргородский Ю.Н., Руденко А.А., Шипилин А.В. Численный метод совместного решения фундаментальной системы уравнений в двумерной биполярной полупроводниковой структуре. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 5.
12. Миргородский Ю.Н., Руденко А.А., Шипилин А.В. Метод численного расчета нестационарных характеристик двумерных биполярных полупроводниковых структур. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1977, вып. 3.

13. Авдеев Е.В., Зверев С.А., Яламов М.Ф. Расчет диффузионных резисторов с неоднородной проводимостью. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. Радио", 1976.
14. Авдеев Е.В., Зверев С.А. Влияние отсеснения тока в эмиттере на резистивные параметры транзисторных структур ИС. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.
15. Авдеев Е.В., Баталов Б.В., Зверев С.А. Влияние р-я перехода на распределение потенциала в транзисторных структурах ИПС. — "Электронная пром-сть", 1975, вып. 8.
16. Казеннов Г.Г., Майоров С.А., Руденко А.А. Метод расчета входных вольт-амперных характеристик многоэмиттерного транзистора. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.
17. Голубев А.П., Кремлев В.Я. Нелинейные модели планарного транзистора, учитывающие двумерный характер растекания тока в базовой области. — "Известия вузов СССР. Радиоэлектроника", 1971, т. XIV, № 2.
18. Илюшин А.И., Щенков И.Б. УПД-6. Использование средств управления данными в ФОРТРАЧе. М., ИПМ АН СССР, 1976.
19. Крамер Г. Математические методы статистики. М., ИЛ, 1975.
20. Баталов Б.В., Казеннов Г.Г., Котко А.П., Курмаев Ф.А., Руденко А.А. Оценка однородности параметров транзисторов интегральных полупроводниковых схем. — "Электронная пром-сть", 1971, вып. 1.
21. Котко А.П., Смирнов В.А., Баталов Б.В. Определение объема выборок при статистическом анализе производства ИС. — "Электронная техника. Сер. 6. Микроэлектроника", 1970, вып. 4.

Статья поступила 10 июля 1978 г.

А. А. Руденко, Е. В. Чеботаев

РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ДВУМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ

Описаны методика и алгоритм расчета на ЭВМ результирующего распределения легирующих примесей, формирующих тип проводимости в отдельных областях структур полупроводниковых интегральных микросхем.

УДК 621.382.002:539.219.3

Для успешного решения задачи оптимального проектирования элементов и электрических схем требуется знать, как распределяются легирующие примеси в объеме полупроводникового кристалла

(кремния, германия, арсенида галлия и др.). Рассчитать трехмерное распределение легирующих примесей в сложных многопримесных структурах полупроводниковых ИМС не представляется возможным ввиду ограниченного быстродействия и ресурсов оперативной памяти современных ЭВМ. Однако с точки зрения разработчиков достаточно ограничиться исследованием распределений примесей в наиболее сложных фрагментах ИМС, в которых взаимное расположение отдельных диффузионных областей и их параметры (глубины залегания, удельные поверхностные сопротивления и др.) оказывают определяющее влияние на функциональные характеристики и надежность ИМС. Дальнейшее упрощение исходной задачи состоит в переходе к анализу двумерного распределения примесей, которое, в свою очередь, оправдано тем, что в любом фрагменте ИМС можно выбрать ряд характерных вертикальных сечений, распределение примесей в которых позволяет количественно оценить реальное взаимное расположение отдельных диффузионных областей на совмещенном топологическом чертеже микросхемы, а также их интегральные параметры.

Предлагается методика расчета двумерного распределения легирующих примесей в сложных структурах полупроводниковых ИМС, формируемых в результате выполнения многоэтапного технологического процесса, включающего эпитаксиальное наращивание.

При расчете распределения легирующих примесей в некотором вертикальном сечении выбранного фрагмента микросхемы, осуществляемого программой МЕРДИК [1], учитываются следующие особенности планарно-эпитаксиальной технологии формирования типовой диффузионной структуры ИМС:

- многоэтапность диффузионных процессов;
 - формирование локальных диффузионных слоев, распределение примесей в которых неоднородно по обеим пространственным координатам;
 - влияние динамики роста эпитаксиального слоя и процессов термического окисления.
- Рассматриваются следующие высокотемпературные технологические операции:
- диффузия примеси из внешнего источника постоянной концентрации через щель (первая стадия);
 - перераспределение примеси при последующих термических процессах;
 - перераспределение примеси при эпитаксиальном наращивании. При формировании диффузионной структуры микросхемы в качестве примесей, определяющих тип проводимости, допускается ис-

пользование бора, фосфора, мышьяка, сурьмы. Многоэтапный процесс изменения распределения каждой примеси может включать любой набор перечисленных выше технологических операций. Возможен также случай произвольного начального распределения примеси.

В таком случае картина распределения каждой примеси по окончании высокотемпературных процессов изготовления ИМС является результатом численного решения некоторой последовательности краевых задач для уравнения диффузии с соответствующими краевыми и начальными условиями. В основу алгоритма решения краевых задач положен конечно-разностный метод. Результирующее распределение концентрации примесей, формирующих тип проводимости отдельных областей элемента микросхемы, вычисляется как алгебраическая сумма распределений концентраций отдельных примесей. Распределение каждой примеси рассчитывается не по всей площади вертикального сечения выбранного фрагмента ИМС, а в некоторых его прямоугольных подобластях, прилегающих к поверхности полупроводниковой структуры. По условиям формирования каждый диффузионный слой имеет вертикальную (в глубь кристалла) ось симметрии, поэтому одна из границ анализируемой подобласти выбирается на оси симметрии. При этом начало отсчета координат располагается на поверхности кристалла.

Размеры подобласти задаются из условия, что на ее границах результирующее значение концентрации примесей равно нулю. Поскольку действительное положение границы $N_{\Sigma}(x, y) = 0$ неизвестно, то границы подобласти устанавливаются, исходя из усредненных значений диффузионных длин данной примеси для всех термических операций. Для расчета распределения каждой примеси, внедряемой в полупроводниковую структуру или уже находящуюся внутри нее, применяется одна и та же математическая модель последовательных диффузионных процессов, обусловленных проведением указанных выше технологических операций. Точнее, эволюция распределения атомов каждой легирующей примеси описывается частью общей математической модели, соответствующей конкретному набору этих операций. При вычислении распределения каждой отдельно взятой примеси анализируемая математическая модель представляет собой совокупность последовательно решаемых краевых задач для двумерного уравнения диффузии в изотропной среде.

Рассмотрим постановку краевой задачи общего вида для уравнения диффузии. В вертикальном се-

чении фрагмента ИМС выделим прямоугольную область, примыкающую к поверхности кристалла и ограничивающую зону возможного распространения примеси. В качестве одной из боковых сторон прямоугольника выберем ось симметрии. Введем систему координат xoy , в которой ось ox направлена вдоль оси симметрии, а ось oy совмещена с нижней стороной прямоугольника. Уравнение поверхности в выбранной системе координат будет иметь вид $x_{\text{пов}} = L_x$, $0 < y < Ly$, где L_x , L_y — размеры рассматриваемой области вдоль направлений осей координат x и y , соответственно. Если данный термический процесс является эпитаксиальным наращиванием, то положение поверхности полупроводниковой структуры в момент времени t :

$$x_{\text{пов}}(t) = L_x + vt, \quad v \geq 0,$$

где v — средняя скорость роста эпитаксиального слоя. Для всех термических процессов, отличных от эпитаксии, значение v полагается формально равным нулю.

Формальная запись краевой задачи, соответствующей отдельной термической операции для одной примеси, в пределах рассматриваемой модели диффузионных процессов выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = D_i \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \right), \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T_i, \\ 0 \leq x \leq x_{\text{пов}} \\ 0 \leq y \leq L_y \end{array} \quad (1)$$

$$x_{\text{пов}} = L_{x,i} + v_i t;$$

$$N_i(0, x, y) = N_{i-1}(T_{i-1}, x, y); \quad (2)$$

$$\left[\alpha_i D_i \frac{\partial N_i}{\partial x} - \beta_i w_i N_i \right]_{x=x_{\text{пов}}(t)} = \gamma_i N_i^0; \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial N_i}{\partial y} \right]_{y=0} = 0; \quad (4)$$

$$N_i(t, x, L_y) = 0; \quad (5)$$

$$N_i(t, 0, y) = 0, \quad (6)$$

где i — порядковый номер текущей термической операции; T_i , T_{i-1} — время проведения текущей и предыдущей термических операций; $N_i(T_i, x, y)$;

$N_{i-1}(T_{i-1}, x, y)$ – распределение примеси по окончании текущей и предыдущей термической операции; D_i – коэффициент диффузии, температурная зависимость которого в данном случае аппроксимируется выражением $D_i = D_i^0 \exp(-\frac{\Delta \epsilon_i}{kT})$ [2]; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – функции, зависящие только от значения координаты y , вид которых определяется типом краевых условий на поверхности полупроводниковой структуры. Пояснения относительно других параметров сформулированной краевой задачи, а также вида функций $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ будут даны ниже.

Соотношение (2) задает начальное условие для уравнения диффузии (1), причем его правая часть представляет собой решение аналогичной краевой задачи для предыдущей термической операции или тождественно равно нулю (термическая операция загонки примеси), или задана функцией, полученной вне рассматриваемой математической модели. Краевое условие (3) записано для поверхности полупроводниковой структуры ($x = x_{\text{пов}}(t), 0 \leq y \leq L_y$) и является условием на подвижной границе. Здесь функции $\alpha_i(y), \beta_i(y), \gamma_i(y)$ определяют конкретный тип краевого условия, и их вид зависит от характера физических процессов, протекающих на поверхности полупроводниковой структуры. Изменяя вид этих функций, можно моделировать условия на поверхности для различных типов термических операций. Общие свойства функций $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ записываются следующим образом: $\alpha_i(y), \beta_i(y), \gamma_i(y)$ – кусочно-постоянные функции, принимающие значения 0 или 1; $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0, \gamma_i \geq 0; \alpha_i + \beta_i \neq 0$. Дальнейшее уточнение вида этих функций связано непосредственно с конкретной термической операцией. Так например, задание функций $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ в виде

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq y \leq a, \\ 1, & a < y \leq L_y, \end{cases} \beta_i = 1;$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & 0 \leq y \leq a, \\ 0, & a < y \leq L_y \end{cases}$$

позволяет моделировать условия на поверхности полупроводниковой структуры при диффузии из внешнего источника постоянной концентрации через щель в маскирующем окисном слое шириной $2a$, причем с внутренней стороны поверхности (вне

щели) условие (3) имеет вид

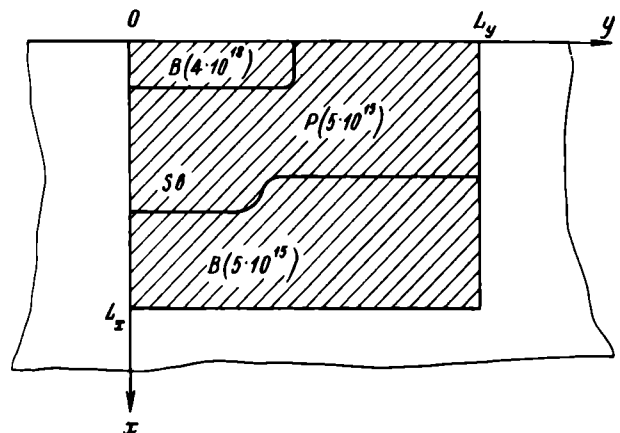
$$[D_i \frac{\partial N_i}{\partial x} - w_i N_i]_{x=L_x} = 0 \quad a < y \leq L_y$$

и характеризует отражение примеси от маскирующего слоя окисла на поверхности полупроводниковой структуры с коэффициентом поглощения w_i . Коэффициент w_i – формальный параметр, учитывающий потерю активной части примеси в исследуемой области полупроводниковой структуры за счет ухода в окисел, испарения и др. Соотношение (4) учитывает симметрию задачи относительно оси ox . Соотношения (5) и (6), в свою очередь, определяют краевые условия на периферии области распространения примеси в соответствии с указанными выше причинами выбора размеров L_x, L_y . В целях сокращения затрат на вычисления выгодно выбирать возможно меньшие значения L_x и L_y , для которых условия (5) и (6) не нарушаются.

Полная математическая модель диффузионной структуры фрагмента элемента ИМС представляет собой совокупность краевых задач, каждая из которых составляется из различных сочетаний уравнения (1) и соотношений (2)–(6) с определенным видом функций $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ и конкретными значениями физико-топологических параметров.

Основу вычислительного алгоритма решения краевой задачи общего вида для уравнения диффузии составляют методы решения задачи (1)–(6):

- конечно-разностная аппроксимация исходных уравнений методом расщепления [3] на динамической пространственно-временной сетке [4];
- система алгебраических уравнений относи-



Фрагмент поперечного сечения диффузионной структуры ИМС

тельно дискретных значений искомой функции $N(x_k, y_k)$ (k – номер узла) решается методом прогонки [5].

Введение динамической пространственной сетки, методика построения которой описана в [4], позволяет изучать диффузионные процессы при локальной эпитаксии – перспективном технологическом направлении изготовления ИМС.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности предложенного алгоритма и программы МЕРДИК, приведем результаты расчета двумерного диффузионного профиля условной транзисторной структуры, содержащей три вида легирующих примесей и сформированной с помощью следующих пяти термических процессов:

- первая стадия диффузии сурьмы ($N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$) для создания скрытого слоя;
- вторая стадия диффузии сурьмы для создания скрытого слоя;
- эпитаксиальное наращивание слоя n -типа проводимости ($d = 12 \text{ мкм}$, $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, примесь-фосфор);
- первая стадия диффузии бора ($N_s = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) для создания базы;
- вторая стадия диффузии бора для создания базы.

Анализируемая структура схематически представлена на рисунке. Расчет распределения примесей производился в пределах заштрихованной области. Шаги сетки вдоль координат x и y выбирались равными $h_x = h_y = 0,5 \text{ мкм}$. Исследуемая область покрывалась пространственной сеткой с числом узлов $MX \times MY = 58 \times 37$. Для расчета описанного варианта требуется 5,5 мин времени процессора БЭСМ-6, 34 тракта и 32 листа ОЗУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Е.В., Баталов Б.В., Назарьян А.Р., Руденко А.А. Прикладное программное обеспечение задач автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем. – См. настоящий выпуск.
2. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. Под ред. Р. Бургера и Р. Донована. Пер. с англ. М., "Мир", 1969.
3. Яненко Н.Н. Об одном разностном методе счета многомерного уравнения теплопроводности. – "ДАН СССР", 1959, т. 125, № 6.
4. Чеботаев Е.В., Руденко А.А., Кокина Г.Е. Численный анализ диффузионных процессов с учетом динамики роста эпитаксиальной пленки. – В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
5. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М., "Наука", 1976.

В.М. Дьяконов, В.Я. Кремлев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНЖЕКЦИОННО-ПОЛЕВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ МИКРОСХЕМ

Рассматривается основной подход к моделированию различных характеристик элементов инжекционно-полевых логических схем (ИПЛ) с учетом конкретных конструктивных решений, особенностей физической структуры и режимов работы.

УДК 621.382.3.001.63

Появление функционально-интегрированных элементов на основе полевого транзистора, совмещенного с биполярным [1, 2], и разработка на их основе БИС выдвигает повышенные требования к моделям полевых транзисторов.

В ряде случаев оказывается, что классические модели и теории [3, 4, 5] не могут дать удовлетворительного описания механизма работы функционально-интегрированных элементов и тем более провести их количественный, а в ряде случаев и качественный анализ.

Инжекционно-полевой элемент представляет собой комплементарную пару биполярного нагрузочного транзистора и полевого переключательного транзистора с управляющим p - n переходом, причем полевой транзистор конструктивно совмещен затворной и истоковой областями соответственно с коллекторной и базовой областями нагрузочного транзистора.

Полевой транзистор, например, может быть получен путем использования боковой диффузии под маскирующим слоем SiO_2 (транзистор с вертикальным каналом).

При подаче на инжектор (эмиттер p - n - p транзистора) положительного смещения инжектируются дырки в базовую область p - n - p транзистора цепи питания. Дырки диффундируют в сторону затвора, являющегося одновременно коллектором p - n - p транзистора, и собираются p - n переходом затвор-исток. При оборванном затворе, что соответствует подключению затвора к стоку аналогичного закрытого прибора, дырки накапливаются в затворной области и смешают p - n переход затвор-исток в отпирающем направлении, на затворе устанавливается

Статья поступила 26 сентября 1978 г.

напряжение "1". Одновременно *p-n* переход затвор-исток начинает инжектировать неосновные носители заряда в истоковую область и в канал. С одной стороны, ток через *p-n* переход затвор-исток является паразитным и его увеличение сопровождается уменьшением коэффициента усиления (нагрузочной способности). Кроме того, сильная инжекция приводит к накоплению избыточного заряда неосновных носителей в истоковой области и в канале. С другой стороны, инжектированные затвором неосновные носители заряда моделируют проводимость канала и способствуют увеличению рабочего тока за счет уменьшения сопротивления между истоком и стоком. Очевидно, подавления паразитного тока можно достичь конструктивным путем, т.е. нанесением эпитаксиальной пленки на низкоомную подложку. В такой конструкции встроенное поле *n⁺-n* перехода подавляет инжекцию с донной части *p-n* перехода. Но это достигается значительным усложнением технологии. При этом выбор режимов и параметров структуры и конструктивных элементов может быть произведен только на основании количественного рассмотрения вышеуказанных эффектов, что требует численного моделирования по крайней мере в одномерном приближении.

Программа анализа управляющего *p-n* перехода затвор-исток в одномерном приближении базируется на решении системы уравнений переноса в полупроводниках:

$$\nabla (D_n \nabla n - \mu_n n \nabla \phi) = R;$$

$$\nabla (D_p \nabla p + \mu_p p \nabla \phi) = R;$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + N_R).$$

Система уравнений рассчитывается методом последовательных приближений. После предварительной линеаризации уравнений применяется метод конечных разностей с использованием прогонки. Для расчета управляющего *p-n* перехода в диапазоне смещений 0–1 В требуется 10 мин времени центрального процессора БЭСМ-6. Использование одномерного приближения вполне правомерно для анализа зависимости тока инжекции и емкости управляющего *p-n* перехода затвор-исток от напряжения "1", уровня легирования в эпитаксиальной пленке, расстояния от металлургической границы *p-n* перехода до подложки. Кроме того, использование одномерной программы дает существенный выигрыш машинного времени по сравнению с использованием описанного ниже двумерного анализа.

В режиме оборванного затвора канал открыт и через него протекает ток нагрузки. Создаваемое при этом в канале падение напряжения определяет величину напряжения "0", а также приводит к неравномерному смещению *p-n* перехода и, следовательно, к модуляции области пространственного заряда (ОПЗ). Причем область канала, прилегающая к стоку, оказывается подзакрытой, ширина ОПЗ в этой части канала больше, чем в части канала, прилегающей к истоку. При некоторой величине тока может наступить режим отсечки канала.

При подключении затвора к стоку аналогичного открытого прибора дырки, собранные *p-n* переходом затвор-исток, "стекают" на "землю" через канал открытого прибора, слой объемного заряда перекрывает область канала и прибор находится в закрытом состоянии.

Очевидно, что моделирование данных эффектов при переменной ширине канала и неравномерном распределении примеси может быть осуществлено только на основе решения системы уравнений переноса в двумерном приближении для обоих типов носителей заряда, так как в канале происходит дрейф основных носителей заряда, а также дрейф и диффузия неосновных носителей, инжектированных *p-n* переходом. Использование классического приближения плавной аппроксимации [3] в данном случае неприемлемо. Из вышесказанного следует, что проблемы моделирования полевого транзистора, входящего в состав ИПЛ, в корне отличаются от проблем моделирования полевых транзисторов в их традиционном применении.

Программа анализа ИПЛ – элемента в двумерном приближении основана на численном решении приведенной выше системы уравнений переноса в полупроводниках. При этом использовался метод конечных разностей. После предварительной линеаризации для получения конечно-разностных уравнений использовались монотонные разностные схемы, определенные на пятиточечном шаблоне. Конечно-разностные уравнения решались методом последовательной верхней релаксации. Матрицы коэффициентов этих уравнений являются неразложимыми и обладают диагональным преобладанием, что обеспечивает сходимость метода. При выводе граничных условий предполагалось, что контакты являются омическими, вдоль слоя окисла нормальные компоненты плотностей токов ($-j_p$) и j_n равны результирующей скорости поверхностной рекомбинации, а нормальная компонента электрической индукции равна плотности поверхностного заряда. Остальные границы структуры являлись отражаю-

циями. При решении системы уравнений учитывалась зависимость подвижности носителей заряда от уровня легирования и от напряженности электрического поля. Входными данными для программы являются параметры диффузионного профиля, топология, параметры закона генерации — рекомбинации и режимы работы. Программа составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Для решения системы уравнений при низком уровне инжекции требуется 2,5 мин времени центрального процессора.

Рассмотрим некоторые особенности функционирования ИПЛ-элемента, полученные в результате проведенных расчетов.

При наличии на затворе напряжения "0" канал перекрыт ОПЗ. Но максимальное обеднение ОПЗ электронами наблюдается не в минимальном сечении канала, а в сечении, находящемся ближе к истоковой области. Это объясняется тем, что формирование ОПЗ происходит не только под влиянием $p-n$ перехода затвор-канал, но и под влиянием перехода n^+ сток — n^- канал, что вызывает перераспределение электронов. При некотором напряжении на стоке в цепи между стоком и истоком закрытой структуры вследствие уменьшения потенциального барьера между стоком и истоком может протекать довольно значительный ток. Таким образом, напряжение "1" зависит и от сопротивления утечки между стоком и истоком закрытой структуры и в значительной мере определяется степенью обеднения электронами ОПЗ канала.

При увеличении тока нагрузки, протекающего через канал открытой структуры, канал перекрывается слоем объемного заряда. Это перекрытие происходит в области канала, примыкающей к стоку. Но при дальнейшем увеличении тока нагрузки, а следовательно, и напряжения на стоке, ОПЗ в отличие от классического анализа [3] не распространяется в сторону истоковой области, а уменьшается в размерах и сдвигается в сторону стоковой области. Степень обеднения электронами ОПЗ при этом увеличивается. В том случае, когда n^+ часть стоковой области не примыкает к области канала, область пространственного заряда находится целиком в стоковой области, прилегающей к каналу.

Программа анализа ИПЛ-элемента в двумерном приближении позволяет не только выявить особенности функционирования полевой структуры в составе ИПЛ и более полно проанализировать физические процессы, протекающие в этих структурах, но и дает возможность оценить и рассчитать влия-

ние физико-топологических и конструктивных параметров на электрические характеристики инжекционно-полевых логических схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлев В.Я., Ержанов Р.Ж., Марков А.П. Инжекционный логический элемент. Авт. свид. № 597094. — "БИ", 1978, № 9.
2. Nishizawa J., Wilamoski B.M. Integrated logic-static induction transistor logic. — "ISSCC Digest of Technical Papers", 1977, Feb.
3. Shockley W. A unipolar field-effect transistor. — "Proc. IEEE", 1952, vol. 40, N 11.
4. Hauser J.R. Characteristics of junction field-effect devices with small channel length-to-width ratios. — "Solid-State Electron", 1967; vol. 10, N 6.
5. Grosvalet J., Motsch C., Tribes R. Physical phenomenon responsible for saturation current in field-effect devices. — "Solid-State Electron", 1963, vol. 6, N 1.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

Е. В. Авдеев, С. А. Зверев

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ

Рассматриваемая методика расчета интегральных диффузионных резисторов, приведенные математические модели и номограммы не только облегчают, ускоряют и удешевляют инженерный расчет топологических вариантов, но и дают возможность реализовать ряд задач оптимизации схемотехнического проектирования.

удк 621.316.8.049.77

Резисторы микросхем по способам конструктивной реализации можно подразделить на дискретные и интегрированные. Дискретные резисторы формируются в приповерхностном слое полупроводникового кристалла в виде кармана, изолированного от подложки $p-n$ переходом, с двумя или более контактными площадками, служащими для соединения резисторов с другими элементами схемы при помощи слоев металлизации.

Интегрированные резисторы являются составной частью некоторого функционального элемента, технологически выполненного в одной изолированной области так, что отдельные резистивные части такого элемента перестают быть различимыми и их функциональные связи определяются взаимным расположением p - n переходов и омических контактов.

Настоящая статья посвящена проектированию резисторов первого и частично второго типов с учетом сложных топологических неоднородностей при различной проводимости изолирующего кармана. Так как в обоих случаях используются резистивные свойства тонких диффузионных слоев, сформированных в процессе базовой или эмиттерной диффузии (глубина диффузии примеси мала по сравнению с топологическими размерами в плоскости кристалла), локальные резистивные свойства таких слоев в статическом режиме можно характеризовать удельным поверхностным сопротивлением ρ_s .

Сложность инженерного проектирования интегральных резисторов определяется не только многообразием топологических решений, диктуемых законами размещения элементов на кристалле, но и трудоемкостью расчета их номиналов. Попытка свести задачу расчета сопротивления диффузионных резисторов к одномерной задаче введением эффективной длины резистора даже при постоянной ширине и наличии изгиба и реальных контактных площадок существенно снижает точность результата. Моделирование условий растекания тока (двумерная задача) посредством электрофизических аналоговых моделей также не обеспечивает необходимой быстроты, гибкости и требуемой точности. Решение двумерной задачи по методике REZDIK [1, 2] позволяет во всех случаях получить результат с гарантированной точностью, однако при этом требуется достаточно мощная ЭВМ, что снижает эффективность использования данной методики. В связи с этим для наиболее типичных вариантов резисторов была принята попытка получить эмпирические формулы и номограммы, позволяющие значительно снизить трудоемкость расчетов и отказаться от применения ЭВМ.

Топология типичных резисторов, как правило, удовлетворяет следующим условиям: конфигурация изолирующего кармана представляет собой

многоугольник, число контактных площадок равно двум, контактные площадки имеют прямоугольную форму, все отрезки границ параллельны осям некоторой прямоугольной системы координат. Резисторы такой конфигурации поддаются декомпозиции, т.е. их можно представить в виде последовательности отдельных типовых участков, приконтная область, однородный участок, изгиб, скачок ширины. Причем допускается наличие подобластей с различными удельными поверхностными сопротивлениями в том случае, если скачок интегрального параметра физической структуры ρ_s позволяет осуществить декомпозицию сложной конфигурации на типовые участки в соответствии с принципами, изложенными ниже. Сопротивления типовых участков резисторов можно рассчитать по методике REZDIK.

Декомпозиция топологии резистора на участки типовых конфигураций дает возможность не только исследовать зависимости, рассчитать таблицы, построить номограммы, но и получить эмпирические формулы для расчета резистора. На основе таких формул строят математическую модель резистора с параметрами, представляющими собой геометрические размеры топологии резистора и интегральный параметр физической структуры ρ_s .

Построенная таким образом математическая модель резистора экономична в смысле трудоемкости использования и может применяться проектировщиком независимо от номограммы. С помощью такой модели можно определить топологические параметры резистора по заданному номиналу; оптимизировать габариты резистора, его конфигурация по критерию однородности тока и размещения, а также функциональные детерминированные и статистические параметры микросхемы по геометрическим или технологическим (ρ_s) параметрам входящих в нее резисторов; минимизировать площадь габаритного многоугольника для увеличения информационной емкости микросхемы и эффективная длина резистора.

Для увеличения быстроты счета и возможности использования простейших калькуляторов математические модели должны состоять только из элементарных функций, связанных арифметическими действиями, содержать небольшое число вычислительных операций при невысокой разрядности числовых констант, обладать высокой точ-

ностью, широким диапазоном изменения технологических и топологических параметров.

Типовые конфигурации и принципы декомпозиции. Приведенные ниже формулы и номограммы предназначаются для расчета сопротивлений диффузионных резисторов, топологию которых можно представить в виде последовательной цепочки типовых конструктивных элементов (рис. 1). Композиция элементов резистора сложной конфигурации допускается только по сечениям, показанным на рисунке штриховыми линиями, причем размеры сечений объединяемых элементов должны быть равны. От элемента к элементу удельное поверхностное сопротивление ρ_s может меняться скачком, оставаясь неизменным внутри элемента.

Декомпозиция сложной топологической конфигурации на типовые элементы состоит в определении совокупности нормальных к осевой линии сечений. При проведении сечений ширины L существенным является сохранение топологической и электрофизической однородности на расстоянии $L/2$ в обе стороны от сечения, что обеспечивает необходимую точность математических моделей и

номограмм (это условие не требуется лишь для участка однородности (рис. 1, *a*)).

Таким образом, типовые конфигурации (см. рис. 1, *b, в, г*) могут стыковаться друг с другом непосредственно или при помощи промежуточной конфигурации (рис. 1, *a*). Контакты резистора могут быть выполнены в виде конфигурации, показанной на рис. 1, *б*, или в виде прямоугольника, примыкающего к одному из стыковочных сечений любой конфигурации, если стыкуемая сторона контактного прямоугольника не меньше размера сечения.

Для описания типовых конфигураций вводится следующая система параметров:

$$\alpha_1 = a/L; \beta_1 = b/L; \delta_1 = d/L;$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \frac{l}{L},$$

где a, b, d, l, L — топологические размеры соответствующих типовых конфигураций резистора (см. рис. 1).

Эмпирические формулы и номограммы. Заштрихованная на рис. 1, *б* область металлизированной поверхности контакта находится на равных расстояниях от внешних границ изолирующего кармана. Штриховая линия показывает сечение, по которому данный элемент объединяется с другими при композиции сложной структуры. Существенным является соблюдение показанного на рисунке расстояния $L/2$ от собственно приконтактной области до области топологической однородности, по границе которой осуществляется композиция элементов.

Проведение расчетов на ЭВМ по методике REZDIK и изучение зависимостей сопротивления данного элемента от параметров $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$ позволили сделать вывод об отсутствии (с относительной точностью не хуже 0,5%) влияния параметров α_1 и β_1 на величину сопротивления в следующих пределах:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 > 1,5 \text{ при } \delta_1 > 0,5; \\ \alpha_1 > 1,0 \text{ при } 0,1 \leq \delta_1 \leq 0,5; \\ \beta_1 > 1,5 \text{ при } \delta_1 \geq 0,5; \\ \beta_1 > 1,0 \text{ при } \delta_1 < 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и наличии существенной зависимости величины сопротивления от параметра δ_1 .

В соответствии с рекомендациями разработ-

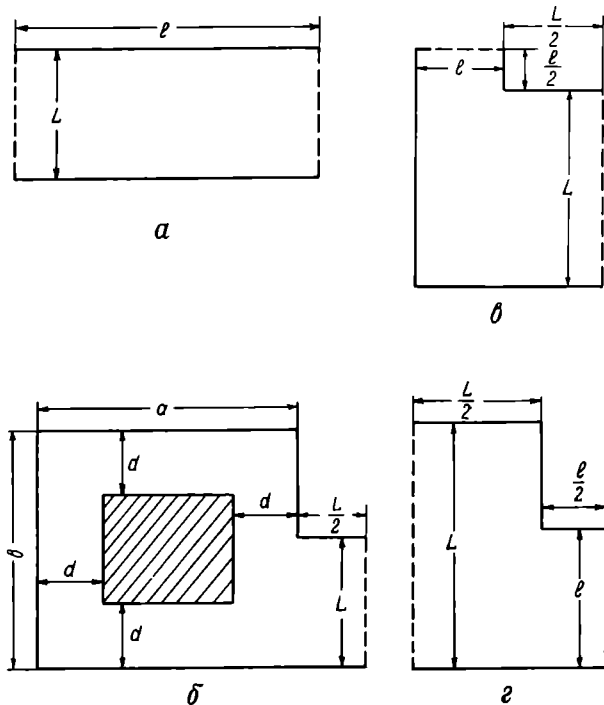


Рис. 1. Типовые конструктивные элементы диффузионных резисторов: *a* — участок однородности; *б* — приконтактная область; *в* — изгиб на $\pi/2$; *г* — скачок ширины

чиков топологий рассматривалась область изменения параметра δ_1

$$0,1 \leq \delta_1 \leq 1. \quad (2)$$

На основе исследований зависимости величины сопротивления элемента от параметра δ_1 с использованием функциональной аппроксимации получена эмпирическая формула для расчета нормированного сопротивления $r = R/\rho_s$, обеспечивающая точность не хуже 0,5% в пределах ограничений (1), (2):

$$r = 0,503 + 0,924 \delta_1 + 0,21 \delta_1^2 - 0,3 \delta_1^3, \quad (3)$$

где R – сопротивление элемента.

Номограмма зависимости r от δ_1 в виде совмещенных линейной и нелинейной шкал, построенная в соответствии с формулой (3), приведена на рис. 2, а.

Для металлизированных контактов малых размеров ограничения (1) должны быть ослаблены до $\alpha_1 > 1$; $\beta_1 > 1$. В этом случае с относительной точностью не хуже 2% можно не учитывать зависимость от α_1 :

$$r = 0,54 - 0,01 A_1 - 0,03 A_1^2 + 0,6 \delta_1 - 0,06 A_1 \delta_1 + 0,42 A_1^2 \delta_1 + 1,87 \delta_1^2 - 2,21 A_1 \delta_1^2 + 0,35 A_1^2 \delta_1^2, \quad (4)$$

где $A_1 = \sqrt{\min(\beta_1; 2,5) - 0,99}$.

Типовая конфигурация, изображенная на рис. 1, в, представляет собой изгиб на 90° и описывается одним параметром α_2 . Объединение элемента с другими при композиции проводится по штриховым линиям. Область изменения параметра α_2 :

$$1 \leq \alpha_2 \leq 10, \quad (5)$$

что соответствует современным требованиям проектирования топологии. Значение параметра меньше единицы можно не рассматривать, учитывая симметричность конструкции

Обработка результатов расчета сопротивления элемента данной конфигурации для различных значений параметра α_2 по программе функциональной аппроксимации позволила получить формулу для расчета нормированного сопротивления, обеспечивающую точность расчета не хуже 0,5% в диапазоне (5) изменения параметра α_2 .

печивающую точность расчета не хуже 0,5% в диапазоне (5) изменения параметра α_2 .

$$r = \{ [(-2,0/A_2 + 4,83)/A_2 - 3,15]/A_2 - 0,0546\} / A_2 + 0,258 A_2 + 1,662, \quad (6)$$

где $A_2 = \sqrt{\alpha_2}$.

Номограмма зависимости r от α_2 , соответствующая формуле (6), приведена на рис. 2, б.

Конфигурация типового элемента "скачок ширины", изображенная на рис. 1, г, описывается также одним параметром, изменяющимся в пределах

$$1 < \alpha_3 \leq 10. \quad (7)$$

Исследование зависимости r от α_3 привело к формуле для нормированного сопротивления:

$$r = \{ [(2,73/A_3 - 7,9)/A_3 + 10,3]/A_3 - 7,78\} / A_3 + 0,072 A_3 + 3,575, \quad (8)$$

где $A_3 = \sqrt{\alpha_3}$.

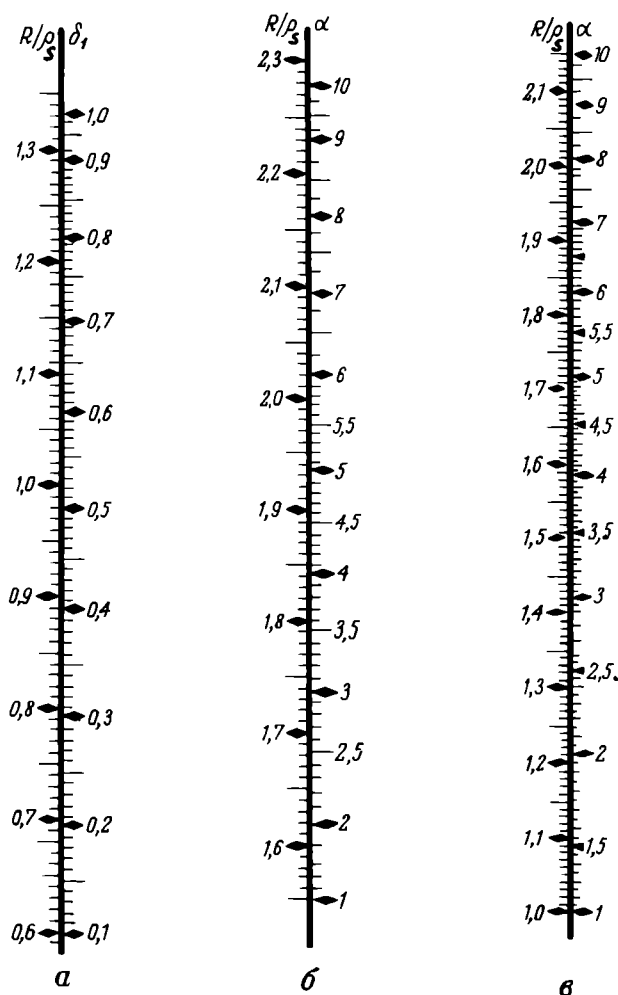


Рис. 2. Номограммы для расчета нормированных сопротивлений типовых элементов

Данная формула и построенная в соответствии с ней номограмма (рис. 2, в) позволяют производить расчеты с точностью не хуже 0,5% при соблюдении ограничений (7).

Участок топологической однородности изображен на рис. 1, а. Нормированное сопротивление такого участка точно рассчитывается по формуле

$$r = \alpha_4 \quad (9)$$

при любых положительных значениях параметра α_4 . Использование при композиции небольших отрицательных значений α_4 ($-0,5 < \alpha_4 < 0$) допустимо, однако при этом нужно помнить об увеличении ошибки расчета, связанной с погрешностью учета растекания тока в плоскости элемента.

Синтез резистора и математической модели. Процесс синтеза резистора по типовым конфигурациям достаточно прост и сводится к последовательному соединению сопротивлений отдельных элементов:

$$R = \sum_{i=1}^I r_i \rho_s(i), \quad (10)$$

где I — число элементов декомпозиции данного резистора; r_i — определяются по соответствию

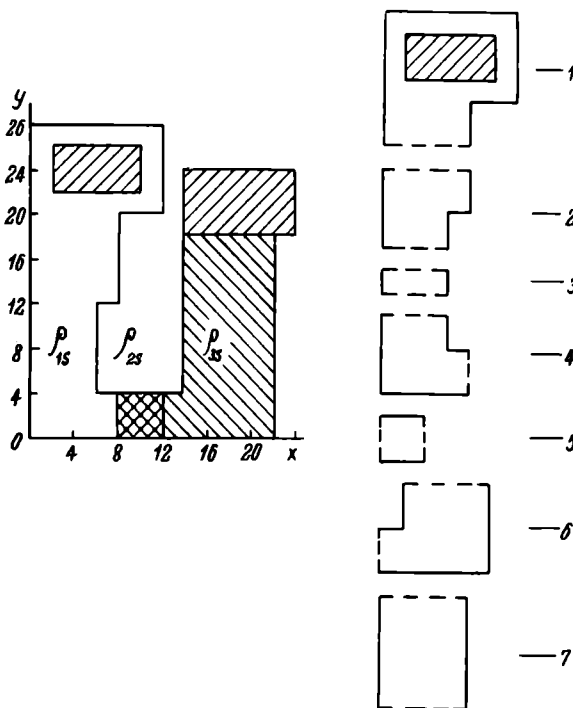


Рис. 3. Пример декомпозиции резистора сложной геометрии с неоднородной проводимостью

ующим каждому элементу номограммам или рассчитываются по формулам (3), (4), (6), (8), (9); $\rho_s(i)$ — удельное поверхностное сопротивление соответствующего элемента.

Если в выражение (10) подставим в явном виде выражение для всех r_i , то получим математическую модель резистора, которую можно использовать в задачах оптимизации.

В качестве примера рассмотрим конфигурацию резистора и его декомпозицию на типовые элементы, приведенные на рис. 3.

Математическая модель такого резистора имеет вид (индекс в скобках указывает порядковый номер типового элемента декомпозиции):

$$R = \rho_{s(1)} \{ 0,503 + 0,924 \delta_{1(1)} + 0,21 \delta_{1(1)}^2 - 0,3 \delta_{1(1)}^3 \} + \rho_{s(2)} \{ ((2,73/A_{3(2)} - 7,9)/A_{3(2)} + 10,3)/A_{3(2)} - 7,78/A_{3(2)} + 0,072 A_{3(2)} + 3,575 \} + \rho_{s(3)} \alpha_{4(3)} + \rho_{s(4)} \{ ((-2,0/A_{2(4)} + 4,83)/A_{2(4)} - 3,15)/A_{2(4)} - 0,0546/A_{2(4)} + 0,258 A_{2(4)} + 1,662 \} + \rho_{s(5)} \alpha_{4(5)} + \rho_{s(6)} \{ ((-2,0/A_{2(6)} + 4,83)/A_{2(6)} - 3,15)/A_{2(6)} - 0,0546/A_{2(6)} + 0,258 A_{2(6)} + 1,662 \} + \rho_{s(7)} \alpha_{4(7)},$$

где для данного резистора геометрические параметры принимают следующие значения (см. рис. 3) :

$$\alpha_{1(1)} = 1; \beta_{1(1)} = 1,5; \delta_{1(1)} = 0,25;$$

$$A_{3(2)} = \sqrt{\alpha_{3(2)}} = \sqrt{4/3} \approx 1,155; \alpha_{4(3)} = 0,333;$$

$$A_{2(4)} = \sqrt{\alpha_{2(4)}} = \sqrt{1,5} \approx 1,22; \alpha_{4(5)} = 1;$$

$$A_{2(6)} = \sqrt{\alpha_{2(6)}} = \sqrt{2} \approx 1,414; \alpha_{4(7)} = 1,25.$$

Удельные поверхностные сопротивления отдельных элементов соответственно равны

$$\rho_{s(1)} = \rho_{s(2)} = \rho_{s(3)} = \rho_{s(4)} = \rho_{1s} = 50 \text{ Ом/квadrat};$$

$$\rho_{s(5)} = \rho_{2s} = 1000 \text{ Ом/квadrat};$$

$$\rho_{s(6)} = \rho_{s(7)} = \rho_{3s} = 200 \text{ Ом/квadrat}.$$

При указанных значениях параметров сопротивление резистора равно 1759 Ом, в чем легко убедиться с помощью приведенных номограмм и математических моделей. Расчет этого же резистора целиком по методике REZDIK даст 1758 Ом при занятости процессора ЭВМ БЭСМ-6 в течение 17 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев С.А., Чутуев Д.О. Машинный расчет резистивных цепей сложной конфигурации для полупроводниковых ИС. — "Электронная пром-сть", 1974, вып. 12.
2. Авдеев Е.В., Зверев С.А., Яламов М.Ф. Расчет диффузионных резисторов с неоднородной проводимостью. — В кн.: "Микроэлектроника". Вып. 9. М. "Сов. радио", 1975.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

Е. В. Авдеев, Б. И. Казуров, А. П. Котко,
Г. М. Мячин, А. Р. Назарьян

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТРАНЗИСТОРА

Предлагаемая методика статистического анализа параметров математической модели элементов предназначена для проведения статистической оптимизации интегральных микросхем с учетом группового характера их производства.

УДК 621.382.3.049.77.001.63

Технологический разброс параметров физической структуры и геометрических размеров интегрального транзистора приводит к необходимости учета случайного характера значений параметров его эквивалентных схем.

При проведении статистического анализа следует учитывать ряд факторов, влияющих на разброс параметров интегрального транзистора.

Разбросы геометрических параметров обусловлены неточностью воспроизведения конфигураций элементов при изготовлении фотошаблона и воспроиз-

изведения процессов фотолитографии, которые обусловлены следующими факторами:

- качеством подготовки пластины или фотошаблона к нанесению фоторезиста и способом его нанесения;
- адгезией фоторезистивной маски к поверхности;
- типом фоторезиста и процессом его сушки;
- геометрическими размерами окон;
- режимами и временем обработки фоторезистивной пленки (экспонирования, проявления, дублирования, травления);
- неоднородностью фоторезистивной пленки;
- качеством проведения контрольных операций;
- кривизной пластины и фоторезистивной пленки;
- погрешностями фокусировки.

Кроме указанных причин, геометрические параметры зависят от точности совмещения при экспонировании.

Разбросы параметров физической структуры обусловлены следующими факторами:

- неоднородностью исходного материала;
- дефектами материала и неравномерным характером их распределения;
- неточностью механической обработки пластин;
- несовершенством кристаллической структуры эпитаксиальной пленки и подложки;
- разбросом толщины и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки от пластины к пластине и внутри пластины;
- нарушением однородности поверхности;
- загрязнением поверхности;
- возмущением поверхностной проводимости за счет поверхностных зарядов;
- неоднородностью размещения рекомбинационных центров рассеяния ловушек;
- неравномерностью толщины окисла на поверхности элемента;
- дефектностью фоторезистивной пленки ("проколы");
- локальным отсутствием сцепления фоторезиста с окислом.

На геометрические размеры и параметры физической структуры влияют разброс концентраций примесей и температуры диффузии, приводящие к разбросу коэффициентов диффузии как от пластины к пластине, так и внутри пластины. Следует учитывать также неточность определения времени диффузии, ошибки измерительного оборудования и ряд других ошибок, в том числе и методических.

Эти и другие как детерминированные, так и недетерминированные факторы влияют на разброс па-

раметров моделей элементов и приводят к тому, что расчет моделей элементов с использованием фиксированных значений входных параметров не учитывает их реальный разброс и является неточным.

Поэтому ставится задача, включающая следующие этапы:

– математическое моделирование входных параметров для расчета элементов с учетом недетерминированных факторов;

– многократный расчет выходных параметров элементов, являющихся исходными при моделировании и расчете схем;

– статистический анализ параметров моделей элементов с целью получения исходных данных для статистического анализа и статистической оптимизации ИМС.

Математическое моделирование входных параметров элементов

Исходной информацией при математическом моделировании входных параметров элементов (параметры структуры и геометрические размеры) является ранее созданная статистическая модель, методика построения которой приведена в работах [1, 2]. Модель непрерывно уточняется на основе статистической обработки данных о технологических процессах на всех этапах изготовления. Эта модель, заданная функциями распределений входных параметров и характеристик корреляционной связи между ними, является базисом для последующего математического генерирования входных параметров на этапе проектирования ИМС. На начальном шаге математического моделирования входных данных па-

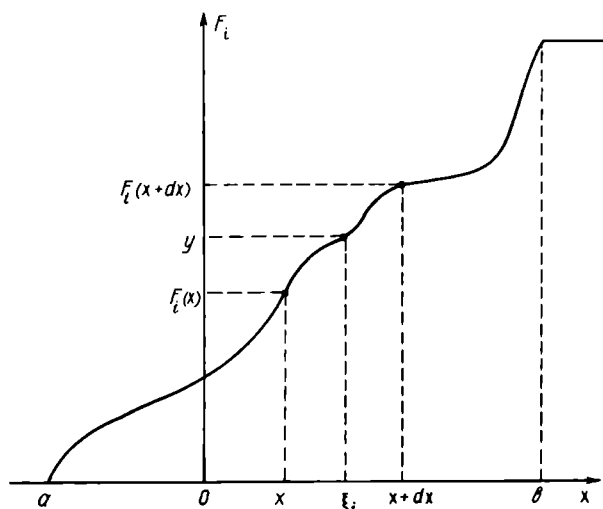


Рис. 1. Пример моделирования случайной величины методом обратных функций

раметры структуры и геометрические размеры могут считаться независимыми случайными величинами, распределенными в общем случае по своему произвольному закону. Однако при моделировании следует учитывать некоторые условия реализации структуры и топологии транзистора, что не исключает возможности получения зависимых случайных величин. Такие зависимости проверяются в процессе статистического анализа.

Опишем моделирование независимых произвольно распределенных случайных величин. Если известна функция распределения i -го входного параметра $F_i(x)$, $a < x < b$, то моделирование можно выполнить методом обратных функций [3] (рис. 1)

$$\xi_i = F_i^{-1}(\nu),$$

где ξ_i — моделируемое значение случайной величины;

ν — псевдослучайная величина, равномерно распределенная в интервале от 0 до 1.

Возможные пути получения ν изложены в работе [3]. Некоторые из них реализованы в стандартных программах — генераторах псевдослучайных чисел общематематических библиотек операционных систем ЭВМ.

При табличном задании $F_i(x)$ значение ξ_i можно получить непосредственно из $F_i(x)$ обратной интерполяцией.

Если входные параметры распределены по нормальному закону, то моделируемое значение случайной величины x_{ri} находится из соотношений

$$x_{ri} = \bar{x}_i + \sigma_i r_i;$$

$$\sigma_i = (x_{i \max} - x_{i \min}) / d;$$

$$x_{i \max} = \bar{x}_i + \delta_i \bar{x}_i; \quad x_{i \min} = \bar{x}_i - \delta_i \bar{x}_i,$$

где \bar{x}_i — заданное исходное значение i -го параметра;

r_i — генерируемое отклонение i -го параметра (последовательность псевдослучайных чисел, распределенных по нормальному закону);

d — отклонения, соответствующие заданному двустороннему уровню значимости $2Q$ (для $2Q = 2\%$ $d = 4,6$ [4]);

δ_i — технологический допуск (в относительных единицах).

Если распределения входных параметров x_i не-

известны, а сами x_i арифметически связаны с некоторыми значениями y_j , распределения которых заданы в виде гистограмм, то для моделирования x_i используются распределения, полученные методом свертки гистограмм y_j [1].

Моделирование зависимых случайных величин производится по специальной методике с использованием моделирования нормально распределенных случайных величин [5].

Методика статистического анализа параметров математических моделей элементов ИМС на этапе проектирования

При проектировании ИМС с целью повышения процента выхода годных изделий стремятся к оптимизации параметров с помощью статистического моделирования.

Для статистического моделирования исходными данными служат распределения параметров математических моделей элементов (ПММЭ) с учетом их корреляционных зависимостей [6]. Обычно используется нормальный закон распределения случайных величин. Однако известно [5], что при одних и тех же средних значениях, средних квадратичных отклонениях и корреляционных матрицах, но различных законах распределения ПММЭ результаты могут быть существенно различными. Поэтому необходимо учитывать реальные законы распределений исходных величин.

Поскольку набор законов распределения достаточно широк и их полный учет вызвал бы значительные затруднения в разработке специального математического обеспечения, в работе [5] принято реальные законы распределений $F(x)$ аппроксимировать одним из следующих трех:

Нормальный закон

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right),$$

где $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-t^2/2} dt$; m – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины x .

Логарифмически-нормальный закон

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right),$$

где m – математическое ожидание; σ – среднее

квадратичное отклонение натурального логарифма величины x .

Закон Вейбулла

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(x/x_0\right)^\alpha\right),$$

где x_0 – параметр масштаба; α – параметр формы.

Принятый в работе [5] метод статистического моделирования произвольных законов распределения тесно связан со статистическим анализом исходной информации, состоящим из следующих этапов:

- 1 – оценка математических ожиданий ПММЭ ИМС;
- 2 – оценка средних квадратичных отклонений ПММЭ ИМС;
- 3 – расчет гистограмм;
- 4 – идентификация законов распределения и их параметров;
- 5 – расчет выборочной корреляционной матрицы;
- 6 – преобразование значений ПММЭ ИМС в нормально распределенные с параметрами (0, 1);
- 7 – расчет выборочной корреляционной матрицы преобразованных значений.

Первый, второй и пятый этапы необходимы при аппроксимации всех законов распределения случайных величин нормальными. Третий и четвертый – при статистическом моделировании с учетом реальных законов распределения ПММЭ. Шестой и седьмой – характерны для метода, принятого в работе [5].

Помимо указанных задач, при статистическом анализе рассчитываются числовые характеристики случайных величин: математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса, корреляции и др. [7]. При проектировании ИМС необходимо кроме общепринятых учитывать числовые характеристики, связанные с групповой технологией производства схем. Такой характеристикой является относительная статистическая однородность, которая в работах [8, 9] названа просто однородностью.

С учетом групповой технологии оценки производятся следующим образом:

Средние значения математического ожидания (M_x):

$$\text{в } i\text{-й партии } M_x(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x(i, j);$$

$$\text{общее среднее значение } M_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_x(i).$$

Здесь n – объем выборки схем в партиях; $x(i, j)$ –

значение исследуемого параметра в j -й схеме i -й партии; N – объем выборки партий.

В соответствии с рекомендациями [8] объемы выборок схем во всех партиях приняты одинаковыми.

Дисперсия (σ_x^2):

дисперсия значений x в i -й партии

$$\sigma_x^2(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x(i, j) - M_x(i))^2;$$

дисперсия между средними значениями партий

$$\sigma_{x0}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_x(i) - M_x)^2;$$

средняя дисперсия между значениями внутри партии

$$\sigma_{x1}^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sigma_x^2(i) \right);$$

полная дисперсия значений параметра x

$$\sigma_x^2 = \sigma_{x0}^2 + \sigma_{x1}^2.$$

Относительная статистическая однородность ρ_x партии по значениям параметра x .

$$\rho_x = \frac{\sigma_{x0}^2}{\sigma_x^2} = \frac{\sigma_{x0}^2}{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{x1}^2} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{x1}^2}{\sigma_{x0}^2}}.$$

Значение ρ_x лежит в пределах от нуля до единицы и характеризует долю разброса между средними значениями в партии, вносимую в общий разброс значений параметра x .

Если ρ_x близко к единице и разбросы параметров слишком велики, то при производстве ИМС для уменьшения разброса x необходимо принять меры для стабилизации работы оборудования и других условий производства, общих для всей партии.

Если ρ_x близко к нулю, то основным является разброс значений x внутри партии, и для уменьшения общего разброса необходимо принять меры для повышения идентичности условий производства микросхем в партии.

Расчет гистограмм распределений параметров сводится к разбиению на подынтервалы интервала значений параметра x и подсчету числа попаданий в подынтервалы. Число подынтервалов и их границы могут быть как фиксированными, так и нефик-

сированными. Фиксированные границы и число подынтервалов целесообразно применять при статистическом контроле производства ИМС. При статистическом анализе на этапе проектирования с исследовательскими целями более целесообразно подсчитывать число подынтервалов и их границы в зависимости от объема выборки и выборочных значений исследуемого параметра.

В рассматриваемом случае на этапе проектирования используется вторая методика. Опыт показал, что наиболее целесообразна логарифмическая зависимость числа подынтервалов от объема выборки. Кроме того, число подынтервалов разбиения k не должно быть менее 4 и более 20 и в зависимости от объема выборки N подсчитывается по формуле

$$k = \min [20, 2 \ln(N + 5)].$$

Число границ разбиения равно $k + 1$.

Далее определяются минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения выборки и вычисляются левая граница G_1 первого (левого) подынтервала и правая граница G_{k+1} последнего (правого) подынтервала по формулам:

$$G_1 = x_{\min} - \sigma_x / 4;$$

$$G_{k+1} = x_{\max} + \sigma_x / 4.$$

Если все значения выборки положительны, а вычисленное значение G_1 отрицательно, то принимается $G_1 = 0$.

Расчет остальных границ сводится к делению отрезка (G_1, G_{k+1}) на k равных частей. В последующем расчет гистограмм заключается в определении выборочных вероятностей - p_i попаданий в заданный подынтервал, равных отношению числа попаданий в заданный подынтервал к объему выборки. При этом попадание на границу рассматривается как половина попадания в левый и половина попадания в правый от границы подынтервал.

Идентификация законов распределения проводится в два этапа:

– определение параметров законов распределения методом минимизации значения χ^2 в критерии согласия Пирсона [7];

– проверка согласия по критерию Пирсона и принятие или отклонение в соответствии с ним рассматриваемого закона распределения.

Законы распределения рассматриваются в по-

рядке убывания по следующей иерархии: нормальный, логарифмически нормальный, Вейбулла.

Если принят один из законов, то последующие не рассматриваются. Если не принят ни один из трех законов, то в качестве закона распределения принимается гистограмма.

Проверка согласия производится с доверительной вероятностью 0,9 при объеме выборки менее 30 и 0,95 при объеме выборки более 30.

Далее оцениваются матрицы нормализованных коэффициентов корреляции, т.е. коэффициентов корреляции случайных величин после их преобразования в нормально распределенные [3].

Преобразование случайной величины x , имеющей функцию распределения $F(x)$, в нормально распределенную случайную величину y с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1 производится отыскиванием y при заданном x из уравнения

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-t^2/2} dt. \quad (1)$$

Метод решения этого уравнения иллюстрируется на рис. 2.

Расчет матрицы нормализованных коэффициентов корреляции сводится к преобразованию выборки значений x к выборке нормально распределенных значений y путем решения уравнения (1) и к расчету выборочных значений коэффициентов корреляции между случайными величинами y по общепринятой методике [7].

Данная методика реализована в виде программы для ЭВМ БЭСМ-6, написанной на языке ФОРТРАН-ДУБНА. Программа должна использоваться при следующих ограничениях: объем выборки — не бо-

лее 100; число исследуемых параметров — не более 45; объем памяти — максимальный, отведенный для программиста в мониторингной системе "Дубна".

Во избежание аварийных ситуаций производится предварительная нормировка исходной выборки для каждого из параметров по формуле

$$x'(i) = x(i) \cdot 10^{-\Pi},$$

где $x(i)$ — выборочные значения после нормировки;

$x(i)$ — исходные выборочные значения;

Π — целая часть десятичного логарифма максимума абсолютного значения параметра x в исходной выборке.

Далее осуществляется статистическая обработка согласно описанной методике.

Если дисперсия параметра равна нулю, то его коэффициенты корреляции с другими параметрами не рассчитываются и условно принимаются равными -2.

Результаты выдаются на АЦПУ в виде графиков и таблиц. В аварийных ситуациях (объем выборки менее четырех, дисперсия равна нулю и т.д.) на АЦПУ выдаются соответствующие диагностические распечатки.

Моделирование выходных параметров

Выходные параметры элементов моделируются путем их многократного расчета с применением приемлемой математической модели по входным параметрам x_{r_i} , полученным на первом этапе моделирования. В соответствии с заданным числом реализации происходит накопление моделируемых значений входных и выходных параметров и последующий статистический анализ.

Изложенный метод моделирования реализован для транзистора в специальной программе расчета и статистического анализа параметров транзистора (программа TRAEMK). При расчете в соответствии с требованиями адекватности модели реальным физическим процессам и минимуме машинного времени выбрана модифицированная модель Эберса-Молла трехпереходного интегрального транзистора [10]. Входными параметрами модели являются: параметры физической структуры (концентрации и эффективные длины диффузии примесей, времена жизни и скорости поверхностной рекомбинации носителей в соответствующих областях транзистора); толщина эпитаксиальной пленки и подложки, смещение границы скрытого слоя в эпитаксиальную пленку; геометрические параметры, соответствующие заданному типу топологии.

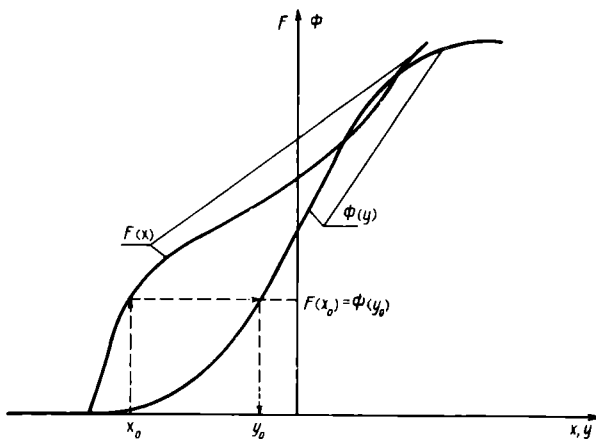


Рис. 2. Пример преобразования случайной величины x с функцией распределения $F(x)$ к нормально распределенной случайной величине y (параметры распределения 0, 1)

Общее число входных и выходных параметров $N_{\text{вх}} = 40$, $N_{\text{вых}} = 86$.

Выходными параметрами являются: металлургические границы p - n переходов и их расширение под слой окисла; пробивные напряжения эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов; характеристики ОПЗ переходов (ширина, интегральная и удельная емкость); удельное и интегральное сопротивление активной и пассивных областей базы и коллектора; удельные (на единицу площади и длины параметра) и интегральные коэффициенты транзисторных матриц А и Т; коэффициенты усиления по току двухпереходного n - p - n и паразитного p - n - p транзисторов при прямом и инверсном включении в схеме с общим эмиттером; граничная частота усиления по току для схемы с общим эмиттером.

Осуществляется накопление выборок моделируемых параметров при заданном количестве реализаций и их сортировка для последующего статистического анализа. Число анализируемых параметров $N_{\text{ст}} \leq 45$. Выбор моделируемых входных и анализируемых параметров (входных и выходных) производится из общей совокупности входных и выход-

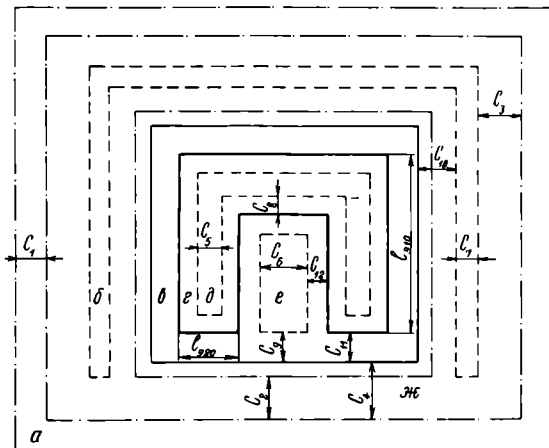


Рис. 3. Топологический рисунок интегрального транзистора: а — область разделительной диффузии; б — коллекторный контакт; в — область базы; г — эмиттерная область; д — эмиттерный контакт; е — базовый контакт; ж — граница области скрытого n^+ -слоя С1 — ширина области разделительной диффузии; С2 — расстояние от границы разделительной диффузии до скрытого слоя; С3 — расстояние от границы разделительной диффузии до коллекторного контакта; С4 — расстояние от границы разделительной диффузии до базовой области; С5 — ширина контактного окна к эмиттеру; С6 — ширина контактного окна к базовой области; С7 — ширина контактного окна к коллекторной области; С8 — расстояние от границы эмиттерной области до эмиттерного контакта; С9 — расстояние от границы базовой области до базового контакта; С10 — расстояние от коллекторного контакта до границы базовой области; С11 — расстояние между эмиттерной и базовой областями; С12 — расстояние между базовым контактом и эмиттером; l_{310} , l_{320} — длина и ширина эмиттерной области

ных параметров в любом предварительно заданном сочетании. Статистический анализ параметров осуществляется по изложенной выше методике.

Рассмотрим пример статистического анализа параметров нелинейной модели интегрального транзистора. Моделируемыми входными параметрами являются геометрические размеры транзистора для выбранного типа топологии (рис. 3).

Геометрические размеры транзистора моделировались по усеченному нормальному закону в пределах их разброса $\pm 20\%$. Остальные входные параметры (электрофизические параметры и параметры структуры) имели фиксированное значение. Число реализаций $N_R = 100$; коммерческое время счета на ЭВМ БЭСМ-6 — 46 мин.

Расчет показал, что при варьировании геометрических размеров транзистора изменяются следующие параметры: площади переходов (торцевые и боковые) $S_{ЭТ}$, $S_{КТ}$, $S_{ИТ}$, $S_{ЭБ}$, $S_{КБ}$, $S_{ИБ}$, емкости переходов $C_{Э}$, $C_{К}$, $C_{П}$ (интегральные значения); омическое сопротивление базы $r'_Б$; коллектора $r'_К$; интегральные значения коэффициентов А и Т матриц: a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , a_{33} , r_{22} , r_{33} ; коэффициенты усиления по току двухпереходного n - p - n транзистора при прямом и инверсном включении в схеме с общим эмиттером β_N , β_I ; пробивное напряжение перехода коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$; граничная частота усиления f_T при заданном токе эмиттера.

Остальные входные параметры выбранной модели при варьировании геометрических параметров при всех реализациях не изменялись (имели фиксированные значения).

Статистический анализ проводился для 34 параметров (12 входных и 22 выходных). Были построены гистограммы и корреляционная матрица 34×34 . Из гистограмм видно, что при изменении величины топологических параметров на $\pm 20\%$ по нормальному закону все перечисленные выходные параметры изменяются по нормальному закону; диапазон изменения выходных параметров составляет ($1 \div 30\%$):

$$\bar{f}_T = 3,02 \cdot 10^8 \text{ Гц}, \sigma_{f_T} = 9,6 \cdot 10^5 \text{ Гц}, \bar{U}_{КЭ} = 5,53 \text{ В}, \\ \sigma_{U_{КЭ}} = 0,3 \text{ В}, \bar{R}_s = 88 \text{ Ом}, \sigma_{R_s} = 10 \text{ Ом}.$$

Из корреляционной матрицы видно:

— топологические параметры, моделируемые как независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону, имеют слабую корреляционную связь $r_{ij} \in (0,001 \pm 0,2)$. Наличие некоторой

связи между отдельными геометрическими параметрами объясняется наложением условий физической реализации заданной топологии транзистора;

– коэффициенты корреляции остальных выходных параметров изменяются в достаточно широком диапазоне от 0,001 до 0,997;

– максимальные коэффициенты корреляции наблюдаются у параметров, имеющих прямые функциональные связи, например, для $S_{КТ}$ и C_K коэффициент корреляции $r = 0,998$;

– наиболее ковариантными к топологии являются следующие параметры:

$S_{ЭТ}$	cov	$l_{Э20}$,	$r = 0,692$;
$S_{КТ}$	cov	$l_{Э10}$,	$r = 0,7$;
$S_{ИТ}$	cov	C_4 ,	$r = 0,884$;
$S_{Эб}$	cov	$l_{Э10}$,	$r = 0,70$;
$S_{Эб}$	cov	$l_{Э20}$,	$r = 0,65$;
$S_{Иб}$	cov	C_4 ,	$r = 0,869$;
r'_{δ}	cov	C_{12} ,	$r = 0,78$;
r'_{δ}	cov	$l_{Э10}$,	$r = 0,5$;
$r'_{К}$	cov	$l_{Э10}$,	$r = 0,78$;
$a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$,			
β_N	cov	$l_{Э10}, l_{Э20}$,	$r \approx 0,7$;
r_{22}	cov	$l_{Э20}$,	$r = -0,432$;
r_{33}	cov	$l_{Э20}$,	$r = -0,752$;
$U_{кЭ}$	cov	$l_{Э20}$,	$r = -0,71$;
f_z	cov	C_7	$r = 0,79$

Наибольшее ковариационное действие имеют параметры $l_{Э10}, l_{Э20}, C_4, C_7, C_{12}$.

Возможность быстрого определения ковариационных связей между параметрами транзистора и получение их количественной оценки является одним из неоспоримых достоинств приводимого выше статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казуров Б.И. Построение композиционных гистограмм распределения при статистическом анализе конструктивно-технологических параметров ИЭТ. – "Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника", 1978, вып. 4.
2. Казуров Б.И., Курмаев Ф.А., Огурцов О.Ф. Статистическое моделирование технологических процессов. – "Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование", 1978, вып. 5.
3. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М., "Наука", 1973.
4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М., "Наука", 1971.

5. Баталов Б.В., Беляков Ю.Н., Котко А.П., Курмаев Ф.А. Моделирование зависимых случайных величин с реально существующим законом совместного распределения в задачах статистического анализа интегральных схем. Материалы семинара. Современные методы разработки РЭА. М., МДНП, 1977.

6. Баталов Б.В., Казеннов Г.Г., Котко А.П., Руденко А.А. Программа статистического анализа электронных схем. – "Научные труды по проблемам микроэлектроники. Серия физико-математическая", 1972, вып.9

7. Крамер Г. Математические методы статистики. М., ИЛ., 1947.

8. Котко А.П., Смирнов В.А., Баталов Б.В. Определение выборок при статистическом анализе производства ИПС. – "Электронная-техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1970, вып. 6.

9. Баталов Б.В., Казеннов Г.Г., Котко А.П., Курмаев Ф.А., Руденко А.А. Оценка однородности параметров транзисторов интегральных полупроводниковых схем. – "Электронная пром-сть", 1971, № 1.

10. Назарьян А.Р., Руденко А.А., Авдеев Е.В., Чеботаев Е.В. Расчет статических параметров математической модели транзистора для автоматизированных программ анализа биполярных интегральных схем. – "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 4 (76).

Статья поступила 26 сентября 1978 г.

А.А.Ступаченко

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОДЕТАЛЕЙ

Автоматизация проектирования в радиодетальном производстве охватывает классы конструкторских, технологических, материаловедческих задач, а также задачи проектирования норм на параметры новых изделий, способствует повышению степени оптимальности (обоснованности) и преемственности технических решений в условиях больших суммарных объемов производства.

УДК 621.396.6.001.2:658.012.011.56

Радиодетали занимают заметное место в структуре производства изделий электронной техники промышленно развитых стран. Суммарное мировое производство радиодеталей (РД) превы-

шает 50 млрд. штук в год, а в стоимостном выражении на их долю приходится от 12 до 20% суммарного объема производства изделий электронной техники [1,2,3].

Очевидное влияние РД на технические и экономические параметры РЭА, а также чрезвычайно большие объемы их производства диктуют настоятельную необходимость реализации в новых разработках все более эффективных проектных решений. В качестве обобщенного критерия эффективности для оптимизации проектных решений в радиодеталестроении целесообразно использовать минимум материалоемкой и трудоемкой избыточности при ограничениях, обусловленных назначением и спецификой применения изделия. В подавляющем большинстве случаев целесообразно стремиться к снижению избыточности, измеряемой десятками и сотнями долями грамма материала в конструкции. В связи с этим важнейшее значение приобретают методы повышения точности оценки (прогнозирования) прочностных свойств материалов и параметров полей разрушающих нагрузок, а также поиска глобального экстремума в задачах оптимизации. Оправданными оказываются резкое возрастание сложности моделей объектов и методов формирования проектных решений, а также существенное повышение трудоемкости процесса проектирования.

Анализ НИОКР радиодеталестроения показывает, что структура проектных решений зависит от конкретного типа конденсатора или резистора, а также характера причин, обусловивших данную разработку. Если принять за 100% все проектные решения, то по составу и структуре их можно разделить на следующие классы:

- конструкторские решения (10–20) %;
- технологические решения (20–50) %;
- материаловедческие решения (15–35) %;
- проектирование норм на параметры изделия (15–20) %;
- прочие технические решения (5–10) %.

Доля любого класса проектных решений в конкретной разработке РД может соответствовать верхнему, нижнему или промежуточному значению указанного интервала, однако сумма долей четырех первых классов всегда составляет 90% и более. Для РД характерна сравнительно небольшая доля конструкторских решений при большом удельном весе материаловедческих и технологических.

Второй важной особенностью радиодеталестроения является широта диапазона проектных решений, различных по степени сложности. Наряду с простейшими конструкторскими решениями существуют такие проблемы, как формообразо-

вание мощных керамических конденсаторов, работающих в СВЧ полях с большой токовой и температурной нагрузками, или как прецизионные (0,1%) переменные резисторы на десятки миллионов оборотов. Степень сложности технологических решений, принимаемых при формировании оксидно-полупроводниковых и фоточувствительных слоев, и материаловедческих – при создании сегнетоэлектрических, резистивных и полупроводниковых систем с числом компонентов до 10 – одна из самых высоких в электронной технике.

Повышение эффективности (степени оптимальности) проектных решений указанных выше классов требует различных подходов. Так, оптимизация конструкций РД возможна путем существенного развития и повышения степени использования расчетно-теоретических способов формирования проектных решений. Оптимизация технологических и материаловедческих решений, норм на параметры изделий, формируемых способом натуральных экспериментов, возможна путем адаптации и широкого использования математических методов и ЭВМ.

При разработке системы автоматизированного проектирования САПР РД предстояло построить и внедрить в инженерную практику комплекс методов и средств, позволяющих повысить производственно-экономические показатели РД за счет увеличения числа проектных решений (ПР), оптимальных по отношению к указанному выше обобщенному критерию (или близким к нему), а также ПР, формируемых (обосновываемых) расчетно-теоретическим способом; повышения эффективности (степени отработанности, обоснованности) ПР, формируемых экспериментальным способом.

Кроме того, создание САПР РД должно привести к расширению классов ПР по степени сложности, сокращению трудоемкости, продолжительности и стоимости ПР [4].

САПР рассматривается как сложная структура, компонентами которой являются методическое, программное, информационное и техническое обеспечение [5].

Для вовлечения широкого круга инженеров-разработчиков в число пользователей САПР РД последняя должна удовлетворять следующим требованиям:

- охватывать проектные решения всех основных классов;
- содержать методы формирования и оптимизации проектных решений, допускать их пополнение, модификацию и замену;
- обеспечивать наглядность процесса формирования проектного решения, его обязательную и полную документированность, возможность вовлечения новых пользователей и т. д.;

– обеспечивать прием, редактирование, сохранение, пополнение исходной информации о проектной задаче;

– допускать совместную работу с базами данных (необходимое информационное обеспечение) и личными архивами проектировщиков;

– содержать аппарат настройки задачи на имеющийся набор методов формирования проектных решений и настройки методов на задачу;

– допускать работу пользователей различной квалификации (на рецептурном уровне, совместно с консультантом и т.д.);

– обеспечивать прохождение в год не менее 100 проектных задач каждого класса.

В связи с чрезвычайно развитой номенклатурой и разнообразием конструктивного исполнения РД принято решение ориентировать структуру САПР РД (рис. 1) не на типы изделий, а на классы проектных решений. На рис. 2, 3, 4 представлены классы

проектных решений, охватываемые функциональной подсистемой синтеза конструкторских, технологических и материаловедческих решений. Подсистема 2г (см. рис. 1) ориентирована на формирование двух классов решений: определения и обоснования норм на параметры новых изделий; определения (моделирования) и прогнозирования эксплуатационных свойств изделий для ненормируемых режимов применения.

Подсистема 1 ориентирована на постановку и решение задач оптимизации проектных решений, формируемых предварительно подсистемой формирования проектных решений.

Подсистема 4 ориентирована на решение двух классов задач: машинной графики (МГ) и документирования. Визуализация объекта проектирования на различных этапах процесса создания РД имеет чрезвычайно важное значение при формировании комплексных проектных решений. В настоящее время не существует аппарата, позволя-

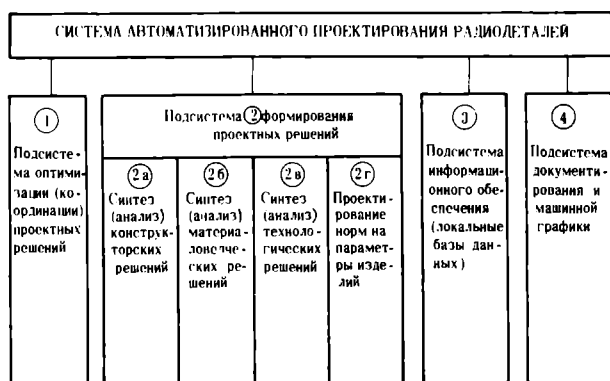


Рис. 1. Структура системы автоматизированного проектирования радиодеталей

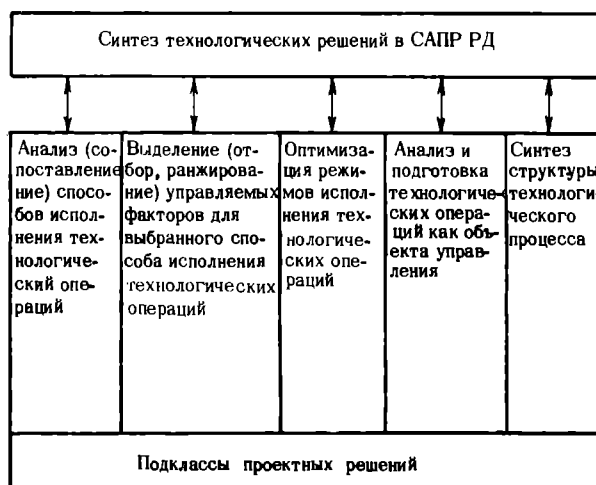


Рис. 3. Состав задач подсистемы синтеза технологических решений САПР РД

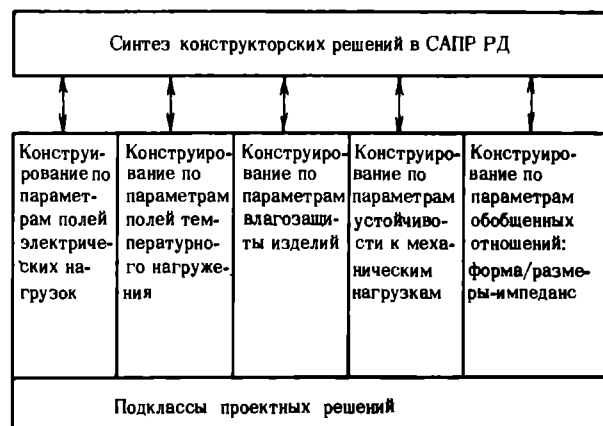


Рис. 2. Состав задач подсистемы синтеза конструкторских решений САПР РД

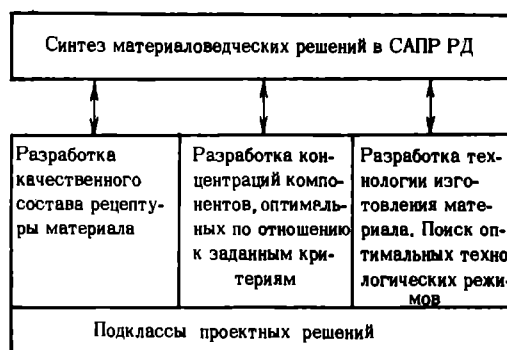


Рис. 4. Состав задач подсистемы синтеза материаловедческих решений САПР РД

ющего решать задачи конструирования с одновременным учетом параметров нескольких разрушающих нагрузок: электрической, температурной, влажностной, механической и пр. Лишь визуализируя поля этих нагрузок и используя итерационные циклы, можно сформировать и обосновать комплексное конструкторское решение.

Важную роль в задачах формирования технологических и материаловедческих решений играют графические образы анализируемых математических моделей объектов.

Подсистема 3 САПР РД содержит информационные массивы, необходимые как для работы программного комплекса системы, так и для проектировщиков.

В основу организации важнейшего компонента САПР РД — программного комплекса — положена известная концепция пакетов программ [6]. Специализированные пакеты прикладных программ (СПП) выступают в роли носителей методов формирования проектных решений.

В состав подсистемы 2а для решения задач конструирования по параметрам полей электрических нагрузок входят два основных пакета программ. Первый предназначен для расчета параметров электрических полей в конструкциях РД. Модули, входящие в пакет, реализуют численные методы решения уравнения Лапласа для различных способов задания сложных по форме границ области решения. Задача инженерного синтеза конструкции реализуется методом анализа направленно модифицируемых вариантов при прямом участии проектировщика.

Второй пакет предназначен для расчета (оценки, прогнозирования) электрической прочности материалов и конструкций РД. Модули, входящие в пакет, реализуют методы параметрической, порядковой статистики, статистики экстремальных значений и др.

В подсистеме 2а для решения задач конструирования по параметрам температурных полей разработан пакет, в котором реализована схема расчета теплового режима конденсатора, основанная на тепловой модели, учитывающей конструктивные особенности, произвольное расположение источников выделения тепла по объему конденсатора, произвольное изменение мощности потерь во времени. Все многообразие конструкций РД разбито на три типа: цилиндры, полые цилиндры, прямоугольные параллелепипеды. Активная часть РД рассматривается как ортотропное тело с различными коэффициентами теплопроводности вдоль координатных осей. Для решения уравнений теплопроводности с соответствующими краевыми условиями используются модули, реализующие

метод конечных интегральных преобразований. В пакет входят модули, позволяющие рассчитывать выделяемое тепло для различных режимов нагружения изделий.

Еще один пакет подсистемы 2а ориентирован на расчет термоупругих напряжений в конструкциях. В пакете реализован приближенный метод решения нестационарного уравнения теплопроводности в виде произведения частных решений для трех неограниченных составных пластин, которые при пересечении образуют исследуемые параллелепипеды. Для вычисленных изменений температурного поля во времени определяются величины нормальных и вторичных напряжений в средах.

Для подсистемы 2а разрабатываются СПП, ориентированные на решение задач расчета влагопроницаемости конструкций РД, собственных резонансных частот, импедансных характеристик и др.

Программный комплекс (ПК) подсистем 2б, 2в и 2г по организации более сложен, чем ПК в подсистеме 2а. Поскольку проектные решения, охватываемые этими подсистемами, формируются на основе натурального эксперимента, ПК базируется на аппарате математической теории эксперимента (МТЭ). Универсальность и адаптируемость методов МТЭ определяет целесообразность организации ПК в виде библиотеки модулей, методо-ориентированных и проблемно-ориентированных пакетов прикладных программ.

Библиотека модулей, реализующих методы математической статистики и МТЭ, для подсистем 2б, 2в и 2г содержит следующие разделы:

- планирование экспериментов (построение стандартных планов для независимых переменных; построение стандартных планов для смешанных переменных; численные методы синтеза планов; анализ планов эксперимента);

- просмотр и описание исходных данных, проверка статистических гипотез (основные числовые характеристики случайной величины, группирование, преобразование данных; функции распределения и оценивание параметров; проверка гипотез; статистическое моделирование на ЭВМ);

- классификация многомерных наблюдений, выявление наиболее информативных признаков (дискриминантный анализ; непараметрические процедуры классификации наблюдений; кластер-анализ; метод главных компонент; факторный анализ; процедуры распознавания образов; анализ экспертных оценок);

- статистическое исследование зависимостей (предварительный корреляционный анализ исследуемых переменных: построение и анализ регрес-

сионных моделей; дисперсионный и ковариационный анализы; канонический анализ).

В программном комплексе для подсистем 2б, 2в и 2г реализованы два методо-ориентированных СПП: планирование экспериментов и выделение существенных эффектов.

Проблемно-ориентированные СПП для подсистем 2б, 2в и 2г созданы на основе единой организующей программы СПП САПР РД и модулей указанной выше библиотеки.

Целевая установка на получение средствами САПР РД оптимальных (возможно более близких к ним) проектных решений привела к необходимости специального исследования моделей РД на различных этапах процесса проектирования. Анализ показал, что главной особенностью математических моделей задач оптимизации РД следует считать их многокритериальность. Известные подходы к решению задачи оптимизации при векторном критерии качества (установление иерархии критериев; сведение к одномерному критерию на основе компромисса; определение множества неуправляемых точек ПАРЕТО) приводят к значительному усложнению области переменных или вида целевой функции. С учетом отмеченных выше особенностей структура СПП для подсистемы 1 должна содержать модули, реализующие следующие методы:

- одномерного поиска (Фибоначчи; ДСК-Пауэлла; квадратичной аппроксимации);
- поиска экстремума функций многих переменных без ограничений (Девидсона—Флетчера—Пауэлла; Розенброка; Нелдера и Мида);
- поиска экстремума функций многих переменных с ограничениями (модифицированный симплексный метод решения задачи линейного программирования; методы штрафных функций; методы поиска при наличии ограничений простого вида, Розенброка с ограничениями; проекции градиента; скользящего допуска; квадратичного и целочисленного программирования);
- релаксационные;
- решение многокритериальных задач (вычисление обобщенных критериев; методы построения множеств неуправляемых точек).

Подсистема 4 содержит ряд СПП, организующих представление исходных, промежуточных и окончательных данных в графической и табличной формах.

Все СПП подсистемы САПР построены на основе специально разработанной программной системы БАЗИС, включающей язык управления и организующую программу СПП, а также средства создания и модификации пакетов. Указанные компоненты

инвариантны к проблемной ориентации СПП, но содержат средства настройки на конкретную предметную область (ее особенности). Кроме набора программ-модулей, являющихся носителями методов решения задач данной предметной области, в пакет включаются наборы паспортов модулей пакета, паспортов основных директив входного языка, а также макроопределения, написанные на входном языке БАЗИС.

Программа-модуль пакетов представляет собой процедуру на ПЛ1, подпрограмму на языке ФОРТРАН или программу на языке Ассемблер, удовлетворяющие соглашениям о связях ОС ЕС. Паспорт модуля — принятое в БАЗИС формальное описание общих характеристик модуля и его параметров. Паспорт директивы — принятое в БАЗИС формальное описание связей между директивой языка управления пакетами и реализующими ее модулями пакета.

Обязательным элементом формального представления являются также паспорта данных, которые записываются в базу данных пакета при его создании или формируются автоматически в ходе работы проектировщика с САПР.

Введение паспортов в качестве формального описания элементов пакета позволяет организовать семантический контроль над действиями пользователя САПР.

Система БАЗИС предусматривает как диалоговый, так и пакетный режим работы САПР.

В качестве общесистемного программного средства САПР РД используется ОС ЕС (версия 4.1).

САПР РД построена на стандартных технических средствах ЕС ЭВМ. В качестве базового процессора использована ЕС 1033. Для организации телеобработки данных и работы САПР РД в диалоговом и пакетном режимах в качестве опорных абонентских пунктов выбраны АП-4. В комплекс технических средств входят МПД-2, Модем-1200, УЗО-1200, графопостроители.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронная промышленность Японии. — "Зарубежная электронная техника", 1977, вып. 22.
2. Электронная промышленность ФРГ. — "Зарубежная электронная техника", 1978, вып. 7.
3. Электронная промышленность Великобритании. — "Зарубежная электронная техника", 1978, вып. 9.
4. Ступаченко А.А. Человек и ЭВМ в процессе инженерного проектирования. — "Электронная пром-сть", 1973, вып. 4.
5. Семенов О.И., Митяев И.С. Диагностический анализ систем проектирования. Минск, "Наука и техника", 1975.
6. Тамм Б.Г., Тыугу Э.Х. Пакеты программ. — "Техническая кибернетика", 1977, № 5.

Статья поступила 3 августа 1978 г.

Н. Г. Вахитов, В. Я. Ершов,

Э. А. Лукин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Применяя математические модели и готовые модули программ для анализа и оптимизации характеристик приборов квантовой электроники, можно повысить качество изделий и экономическую эффективность разработок, окупить расходы на создание автоматизированных систем проектирования в процессе их разработки, обеспечить соответствие создаваемых систем реальным требованиям проектирования.

УДК 621.373.828.825.001.2.012.001.56

Направления разработок, объемы выпуска и области применения приборов квантовой электроники расширяются из года в год. Перспективы развития ряда отраслей промышленности ориентированы на внедрение лазерной техники, открывающей



Основные функциональные блоки и процессы, рассчитываемые автономно

принципиально новые возможности. Перед квантовой электроникой стоят сложные задачи по созданию широкого класса приборов с параметрами и выходными характеристиками, удовлетворяющими самым различным требованиям. Непрерывно возрастают требования к качеству приборов, стабильности выходных характеристик, надежности и срокам службы приборов.

В ближайшее время необходимо улучшить эти показатели в десятки, а для некоторых применений — в сотни и тысячи раз.

Успешное решение этих проблем во многом зависит от внедрения новейших методов проектирования, основанных на использовании ЭВМ для анализа и расчета характеристик приборов, нахождения оптимальных конструкций.

В электронной промышленности автоматизация проектирования получила наибольшее развитие в области проектирования сложных электронных схем, интегральных микросхем, печатных плат и др. В квантовой электронике это направление составляет лишь одну из задач. В целом автоматизация проектирования приборов квантовой электроники требует решения гораздо более широкого круга проблем.

Приборы квантовой электроники отличаются значительным разнообразием и сложностью физических процессов, сочетающихся в одном устройстве, и, как следствие, большой сложностью технологии изготовления. Поэтому разработка математических моделей, описывающих работу приборов квантовой электроники с точностью, необходимой для проектирования, а также разработка соответствующих алгоритмов и программ составляет трудоемкую задачу, без решения которой нельзя переходить к автоматизации проектирования таких устройств.

В этом направлении получены значительные результаты главным образом применительно к проектированию отдельных функционально законченных элементов и блоков приборов, а также некоторых технологических установок.

Остановимся на задачах, связанных с проектированием твердотельных лазеров. При разработке лазеров выделяют функциональные блоки и процессы, расчет и оптимизацию основных характеристик которых можно проводить в значительной степени автономно (см. рисунок). Каждый блок представляет собой достаточно сложную систему, резко отличающуюся от других как по физико-техническим характеристикам, так и по математическим методам расчета.

Пакеты прикладных программ, созданные в настоящее время, позволяют проводить расчет и оптимизацию их основных параметров с использованием ЭВМ.

Коротко охарактеризуем некоторые из них.

Расчет процесса генерации. В процессе проектирования прибора необходимо создать генератор с заданными характеристиками выходного излучения при некоторых дополнительных ограничениях на массу, габариты, сроки службы и другие параметры прибора. При разработке математического обеспечения конечной целью является создание машинных методов расчета процесса генерации с учетом взаимодействия всех блоков. Эта задача пока решена только для отдельных простейших случаев: имеется комплекс программ на языке ФОРТРАН для ДОС ЕС ЭВМ (ЕС-1022) для расчета стационарных режимов генерации в резонаторе с тонким усиливающим слоем. Программы позволяют рассмотреть конкуренцию поперечных мод двух низших номеров и оптимизировать одномодовые режимы генерации.

Разработан ряд программ для расчета временных характеристик генерации в приближении балансных уравнений с учетом зависимости от времени добротности резонатора и некоторых других параметров, входящих в кинетические уравнения [1]. Программы написаны на языке АЛГОЛ-60 для ЭВМ БЭСМ-4 (транслятор ТА-1М).

Расчет резонаторов. Резонаторы являются одним из основных элементов квантовых генераторов, определяющих пространственные характеристики выходного излучения, а также существенно влияющих на его спектральные и энергетические характеристики.

Получены программы, позволяющие рассчитывать излучательные потери, угловые расходимости пучков и структуру полей в сложных резонаторах, содержащих диафрагмы и диэлектрические тела с показателями преломления, зависящими от радиуса по квадратичному закону [2]. Программы составлены на языке ФОРТРАН для ДОС ЕС ЭВМ.

Разработан большой комплекс программ для расчета многозеркальных резонаторов с произвольно расположенными в пространстве зеркалами. Программы позволяют определять пространственное положение осевого контура резонаторов, анализировать структуру полей и состояния поляризации мод, анализировать устойчивость резонаторов по отношению к разъюстировкам зеркал [3]. Программы написаны на языке АЛГОЛ-60 для ЭВМ БЭСМ-4 (транслятор ТА-1М).

Расчет интерференционных покрытий. В приборах квантовой электроники получили широкое применение интерференционные покрытия, представляющие собой систему плоско-параллельных диэлектрических слоев с различными показателями преломления и толщинами слоев, сравнимыми с длиной световой волны. Такие многослойные системы дают возможность реализовать оптические поверхности с

любым коэффициентом пропускания и отражения и с различными поляризационными свойствами.

Процесс проектирования интерференционных покрытий состоит в определении параметров многослойной системы так, чтобы покрытие обеспечивало заданную зависимость коэффициента отражения от частоты в некотором интервале [4].

К параметрам, подлежащим определению, относятся: число слоев, показатели преломления слоев, оптические толщины слоев. Эта задача наиболее полно решается при использовании методов машинного проектирования.

С помощью ЭВМ удается получить структуры, реализующие любые спектральные характеристики, при целом ряде дополнительных требований, возникающих на практике. Программы составлены на языке АЛГОЛ-60 (транслятор ТА-1М) и на языке ФОРТРАН для ДОС ЕС ЭВМ (ЕС-1022).

Разработаны также программы, позволяющие моделировать на ЭВМ процесс контроля толщин слоев по максимуму и минимуму отражения. Это позволяет прогнозировать спектральные характеристики реальных систем с учетом точности реализации толщин слоев в процессе их напыления. Программы написаны на языке АЛГОЛ-60 (транслятор ТА-1М).

Расчет конструкций камер напылительных установок. Спектральные и фазовые характеристики многослойных покрытий зависят от точности, с которой выдерживается толщина каждого слоя, и равномерности толщины слоев по поверхности подложки. Для большинства применений ошибка в толщине каждого слоя не должна превышать 5%, а равномерность толщины слоя по всей поверхности подложки должна составлять 1–2%.

В настоящее время приняты групповые методы изготовления покрытий, требующие обеспечения указанных допущений одновременно на большом числе изделий (подложек). В связи с этим возникает задача поиска конструкций камер напылительных установок, оптимальных с точки зрения взаимного расположения и перемещения испарителя и подложкодержателя, а также их формы и размеров с целью разработки высокопроизводительного оборудования. Использование машинных методов расчета позволяет успешно решить эту задачу. Испытания разработанных камер показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных [5].

Программы разработаны на языке АЛГОЛ-60 для транслятора ТА-1М. Ведется разработка новой версии программы на языке ФОРТРАН для ДОС ЕС ЭВМ (ЕС-1022).

Проектирование оптических систем. Оптические системы используются во всех приборах квантовой электроники и оказывают существенное влияние на качество этих приборов. Проектирование оптических систем осуществляется с помощью ЭВМ, что позволяет создавать системы высокого качества, оптимизированные по многим характеристикам и параметрам. Расчеты проводятся с помощью математического обеспечения, разработанного в Ленинградском Государственном оптическом институте (ГОИ).

Разработка электронных схем. Электронные схемы, применяемые в приборах квантовой электроники, не имеют принципиальных особенностей, препятствующих использованию существующих в стране систем автоматизированного проектирования этих изделий. Сложности внедрения определяются только многообразием схем, используемых в квантовой электронике. Поэтому прежде всего необходимо провести унификацию и стандартизацию применяемых схем и печатных плат.

Первые версии программ для рассмотренных блоков достаточно хорошо проверены в эксплуатации и достигли определенной завершенности в пределах возможностей имеющихся ЭВМ.

Накопленный опыт позволяет сделать некоторые выводы относительно дальнейшего развития данного направления. Конечной целью можно считать создание комплексного математического обеспечения, позволяющего проектировать как отдельные блоки, так и прибор в целом с учетом взаимодействия основных блоков.

Реализация этой программы в значительной степени определяется возможностями вычислительной техники. Анализ показывает, что достаточно полное решение задачи проектирования отдельных блоков лазеров достигается на базе ЭВМ ЕС-1050, ЕС-1060. Моделирование процесса генерации с необходимой степенью полноты осуществимо только на машинах четвертого поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голяев Ю.Д., Лантратов С.В. Пиковые режимы генерации в лазерах на гранате с неодимом. — "Квантовая электроника", 1974, т. 1, вып. 10.
2. Вахитов П.Г., Зенкин В.А., Кушнир В.Р., Шкупов Н.В. Трехпараметрическое представление радиационных потерь в резонаторе с диафрагмой. — "Электронная техника. Сер. 10. Квантовая электроника", 1975, вып. 1.
3. Савельев И.И., Хромых А.Н. Продольные моды объемного кольцевого резонатора. — "Квантовая электроника", 1976, т. 3, вып. 7.
4. Колодный Г.Я., Левчук Е.А., Мешков Б.Б., Яковлев П.П. Синтез просветляющих покрытий методом прямого поиска. — "Квантовая электроника", 1978, т. 5, вып. 1.
5. Ковалев Л.К. Расчет конструкции камер напылительных установок методами математического моделирования. — "Электронная техника. Сер. 10. Квантовая электроника", 1975, вып. 1.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

·ЭП·



РЕКЛАМА

НОВЫЕ КНИГИ

КУРС АПЛ, ДИАЛОГОВЫЙ ПОДХОД

Л. Гилман, А. Роуз

Пер. с англ. М., "Мир", 1979
27 л., 25000 экз.

Книга посвящена описанию АПЛ — универсального языка программирования высокого уровня. Знакомит с реализацией АПЛ на машинах ИБМ серий 360 и 370, организацией файловых систем и особенностями различных версий языка. Все понятия иллюстрируются примерами программ, часто встречающимися на практике. Книгу удобно использовать для изучения языка в диалоговом режиме — каждая глава соответствует одному сеансу работы с ЭВМ.

МИКРОПРОГРАММИРОВАНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДОС/ЕС

Л. И. Шатровский

М., "Сов. радио", 1979, 13 л., 44000 экз.

Излагаются методы и приемы программирования на ЕС ЭВМ с дисковой операционной системой (ДОС). Описываются средства комплексирования программ. Приводятся многочисленные примеры. Из языков программирования ДОС ЕС подробно излагаются ФОРТРАН и ПЛ/1.

Книга предназначена для программистов — пользователей, разработчиков программного обеспечения АСУ, информационных систем обработки данных, для которых необходимо создание крупных программных комплексов.

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

П. П. Авранков, Ю. Н. Беляков, Ю. Б. Егоров,
Ф. А. Курмаев, А. В. Фельдский

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ САМРИС-2

Система схемотехнического проектирования САМРИС-2 позволяет проводить любые виды анализа биполярных и МДП интегральных схем, статистический анализ и оптимизацию при произвольном задании целевой функции. Допускается расчет схем, содержащих до 500 элементов.

УДК 621.3.049.77.001.24:681.3

Опыт производственной эксплуатации системы САМРИС [1, 2] показал, что она должна развиваться по следующим основным направлениям:

– расширение класса решаемых задач за счет организации развитых библиотек моделей элементов и возможность введения в библиотеку моделей пользователя;

– возможность организации многовариантных расчетов при изменении любых параметров элементов схемы, формулировки различных задач оп-

тимизации средствами входного языка, расширение состава рассчитываемых параметров;

– увеличение производительности системы путем использования свойств разреженности матриц.

Перечисленные тенденции учитывались при разработке системы схемотехнического проектирования САМРИС-2.

Рассмотрим принципы, положенные в основу организации САМРИС-2. Система позволяет проводить в автоматическом режиме комплекс схемотехнических расчетов: статический, динамический, частотный и статистический анализ, детерминированную и статистическую оптимизацию. При этом предполагается, что задание на расчет записывается однократно на проблемно-ориентированном входном языке [3].

Обобщенная блок-схема организации системы приведена на рисунке.

Управляющая программа последовательно вызывает подпрограммы "Транслятор" и "Диспетчер". Подпрограмма "Транслятор" транслирует входную информацию и заполняет информационные массивы. Подпрограмма "Диспетчер" определяет виды заказанных расчетов, список используемых моделей полупроводниковых элементов и передает управление в один из коммутаторов блока подпрограмм коммутаторов. При этом на основе исходной информации определяется сложность анализируемой схемы и размерности массивов подпрограмм коммутаторов.

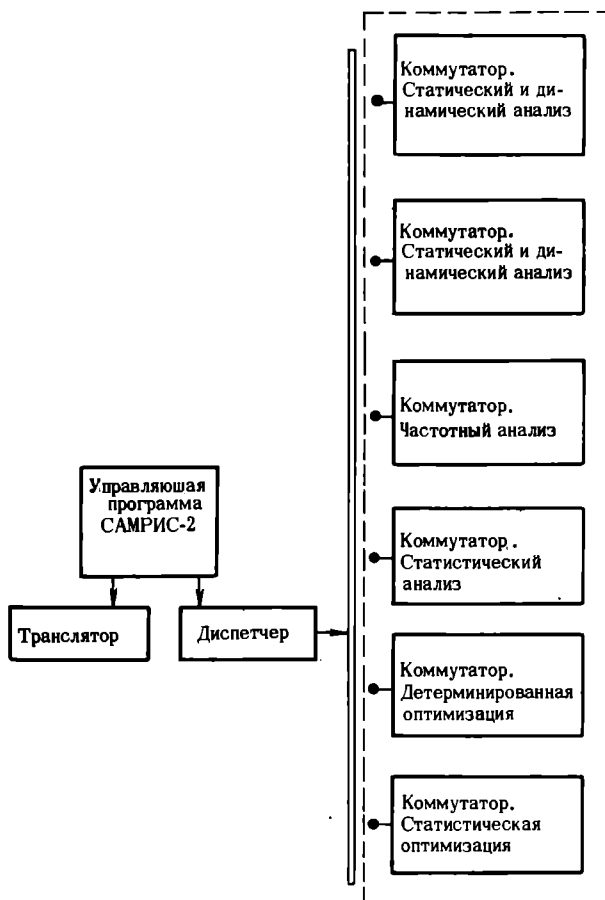
Поскольку задание на расчет формулируется пользователем, то порядок вызова коммутаторов и подпрограмм внутри коммутаторов не определен до начала решения. Диспетчер формирует на внут-

реннем языке программу работы системы. Эта программа "настраивает" систему на решение конкретной задачи.

Коммутаторы осуществляют формирование внешних условий анализируемой схемы, при которых проводится расчет; редактирование описания схемы; вызов подпрограмм, реализующих требуемый вид расчета; вычисление значений электрических параметров схемы; вызов подпрограммы моделирования случайного вектора параметров компонентов; подпрограмм вычисления целевых функций, ограничений и их производных; организации поиска оптимума; обработки и вывода результатов.

Управление работой коммутаторов осуществляет программа, составленная на внутреннем языке системы. После выполнения очередной макрооперации управление вновь передается коммутатору, в котором определяется номер следующей заданной подпрограммы.

Библиотека встроенных моделей элементов системы включает модели линейных и биполярных элементов, МДП и полевых транзисторов и может пополняться новыми моделями. Кроме того, реа-



Обобщенная блок-схема организации системы САМРИС-2

лизована возможность составления в терминах входного языка произвольных моделей элементов схемы. В этих моделях допускаются R , C , L – двухполюсники, диоды и источники тока, управляемые токами, протекающими через диоды произвольной модели. Наряду с нелинейными, в систему включены и кусочно-линейные модели перечисленных элементов, что достигается за счет аппроксимации нелинейных вольт-амперных характеристик элементов непрерывными кусочно-линейными функциями.

Математическая модель схемы формируется с помощью метода узловых потенциалов в виде

$$G_0 \bar{V} + C_0 \frac{d\bar{V}}{dt} + A_y^T \bar{j} + \bar{I}(t) = 0, \quad (1)$$

где G_0 – матрица узловых проводимостей линейных элементов схемы;

\bar{V} – вектор узловых потенциалов;

C_0 – матрица узловых емкостей;

A_y^T – подматрица матрицы инцидентности, соответствующая нелинейным двухполюсникам;

\bar{j} – вектор токов нелинейных элементов;

$\bar{I}(t)$ – вектор токов независимых источников.

Использование в модели (1) в качестве вектора \bar{j} нелинейных моделей полупроводниковых элементов в виде

$$\bar{j} = \bar{\psi}(\bar{U}, \frac{d\bar{U}}{dt}) \quad (2)$$

приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений ($\bar{\psi}$ – нелинейная вектор-функция, \bar{U} – вектор напряжений на элементах схемы).

Аппроксимация выражения (2) кусочно-линейной непрерывной функцией вида [4, 5]

$$\left. \begin{aligned} \bar{j} &= G^{(l)} \bar{U} + \bar{j}_0^{(l)}; \\ \bar{U} &\in p^{(l)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

позволяет получить кусочно-линейные модели полупроводниковых элементов ($G^{(l)}$ – квазидиагональная матрица проводимостей нелинейных элементов, соответствующая мультииндексу l областей

аппроксимации нелинейных элементов; $\bar{j}_0^{(l)}$ – вектор остаточных токов; $p^{(l)}$ – многомерная область, образованная пересечением гиперплоскостей, ортогональных координатным осям пространства напряжений на нелинейных элементах и проходящих через точки разбиения осей этого пространства).

Использование в модели (1) в качестве вектора \bar{j} выражения (3) приводит к кусочно-линейной системе дифференциальных уравнений.

Математическая модель (1) при статическом анализе имеет вид

$$G_0 \bar{V} + A_y^T \bar{j} + \bar{I} = 0$$

и является или системой трансцендентных алгебраических уравнений, или системой кусочно-линейных уравнений в зависимости от использования выражений (2) или (3).

Система трансцендентных алгебраических уравнений решается модифицированным методом Ньютона с регулировкой шага. Для решения системы кусочно-линейных уравнений применен модифицированный алгоритм Катцнельсона [6].

Интегрирование выражения (1) производится методом Эйлера, с использованием неявной формулы первого порядка. Контроль начальной погрешности и выбор шага интегрирования осуществляются по вторым разностям векторов ∇^{k-1} , ∇^k , ∇^{k+1} .

Использование кусочно-линейных моделей значительно уменьшает затраты машинного времени при моделировании сложных схем. Прецизионные расчеты целесообразно выполнять с использованием нелинейных моделей.

Учет разреженности матрицы дифференциальных проводимостей в системе достигается методом почти k -диагональных матриц [7] и учетом разреженности при гауссовом исключении [8].

Целесообразность применения того или иного метода зависит от конкретного вида графа анализируемой схемы, и выбор метода осуществляется автоматически на этапе оптимальной перенумерации узлов схемы.

Эффективность реализованных в САМРИС-2 методов подтверждают данные расчетов схем по системам САМРИС и САМРИС-2, приведенные в таблице.

Все приведенные данные получены для кусочно-линейных моделей ИС.

Статистический анализ ИС можно проводить методом Монте-Карло при заданной матрице коэффициентов корреляции и трех способах задания входной информации:

– при заданном в процентах разбросе парамет-

ров элементов. В этом случае вектор \bar{X} параметров элементов распределен по нормальному закону; – при заданных в виде гистограмм законах распределений параметров элементов, что позволяет проводить статистический анализ ИС при произвольном законе распределения \bar{X} [9];

– при заданных в виде таблиц законах распределений параметров элементов, что также позволяет проводить статистический анализ при произвольном законе распределения \bar{X} .

Входной язык системы дает возможность пользователю сформулировать задачу детерминированной оптимизации. В общем виде эта задача формулируется:

$$\begin{aligned} \max / \phi_0(\bar{x}) /; \\ \phi_i(\bar{x}) \geq 0 \quad i = 1, \dots, N; \\ \phi_i(\bar{x}) = 0 \quad i = N+1, \dots, M; \\ d_1 \leq \bar{x} \leq d_2, \end{aligned}$$

где ϕ_0 – целевая функция; \bar{x} – вектор переменных оптимизаций; ϕ_i – функция-ограничения; d_1 , d_2 – ограничения на переменные оптимизации.

Различные варианты записи целевой функции позволяют решать следующие задачи:

– максимизировать (минимизировать) какой-либо параметр схемы при ограничениях на остальные параметры;

– синтезировать схему с передаточной (переходной, частотной) характеристикой максимально близкой к заданной;

– максимизировать запасы работоспособности по всем выходным параметрам схемы [10].

Переменными оптимизации могут быть R , C , L , коэффициенты усиления транзисторов, площади эмиттерных переходов транзисторов, площади диодов. Общее число переменных оптимизации не превышает 20.

В качестве методов поиска используются методы первого порядка, для реализации которых необходим расчет производных

$$\frac{d\bar{\phi}}{d\bar{x}} = \frac{d\bar{\phi}}{d\bar{Y}} \frac{d\bar{Y}}{d\bar{V}} \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}},$$

где $\bar{\phi}$ – вектор целевой функции и функций-ограничений;

\bar{Y} – вектор электрических параметров схемы;

\bar{V} – вектор узловых потенциалов.

Матрица $\frac{d\bar{V}}{d\bar{x}}$ находится из решения уравне-

ний в вариациях [5,11].

При решении задачи статистической оптимизации

Число узлов в схеме	Число p - l переходов	Время решения, мин.			
		Статический анализ		Динамический анализ	
		САМРИС	САМРИС-2	САМРИС	САМРИС-2
139	94	3	2	33	20
153	90	16	5	46	9
121	74	8	3	50	19
116	65	3	2	16	7
189	128	25	8,56	210	22,56

ции целевой функцией является вероятность выхода годных схем $P(\bar{x})$. Задача формулируется следующим образом:

$$\max P(\bar{x}); \quad \bar{Y}_1 \leq \bar{Y} \leq \bar{Y}_2,$$

где \bar{x} – вектор средних значений параметров элементов;

\bar{Y}_1, \bar{Y}_2 – ограничения на электрические параметры схемы.

Для решения поставленной задачи используется градиентный метод с автоматическим выбором шага, метод наискорейшего спуска и метод Ньютона.

Градиент $\frac{\partial P}{\partial \bar{x}}$ и матрица Гессе $\left[\frac{\partial^2 P}{\partial x_l \partial x_m} \right]$,

$l, m = 1, \dots, n_0$, где n_0 – число переменных оптимизации, рассчитываемых статистическим методом.

Реализация изложенных методов решения линейных систем и модульный принцип построения САМРИС-2 обеспечивают расчет схем сложностью до 500 элементов, 300 узлов (основной режим анализа); 200 элементов, 100 узлов, 20 переменных оптимизации (режим детерминированной оптимизации); 200 элементов, 100 узлов, 100 случайных переменных (режим статистического анализа и статистической оптимизации).

В системе программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6 с оперативной памятью объемом 32 К.

Программное обеспечение системы характеризуется 250 подпрограммами и 31000 условными фортрановскими операторами. Средняя производительность программистов составила 6 условных фортрановских операторов в день. При расчете производительности учитывалось не только время составления программ, но и время разработки алгоритмов, время, затраченное на комплексную отладку системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васенков А.А., Казеннов Г.Г., Беляков Ю.Н., Аврашков П.П. Система автоматизированного моделирования и расчета интегральных схем (САМРИС). – В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1975.
2. Аврашков П.П., Беляков Ю.Н., Егоров Ю.Б., Федьинский А.В. Программное обеспечение автоматизированной системы моделирования и расчета ИС. – "Электронная промышленность", 1977, вып. 2.
3. Беляков Ю.Н., Аврашков П.П., Егоров Ю.Б. Входной язык и принципы организации транслятора системы САМРИС-2. – "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 4.
4. Егоров Ю.Б., Беляков Ю.Н. Расчет статического режима БИС методом кусочно-линейной аппроксимации. – В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1975.

5. Егоров Ю.Б., Федьинский А.В. Применение метода кусочно-линейной аппроксимации для расчета интегральных схем. – "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1978, вып. 6.

6. Chien M.I., Kuh E.S. Solving piecewise-linear equations for resistive networks. – In: Circuit Theory and Applications. 1976, vol. 4, N 1.

7. Егоров Ю.Б., Федьинский А.В. Метод формирования и решения почти k -диагональных систем узловых уравнений. – "Изв. ВУЗов СССР. Радиоэлектроника", 1977, т. 20, № 6.

8. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы. М., "Мир", 1977.

9. Баталов Б.В., Беляков Ю.Н., Котко А.П., Курмаев Ф.А. Моделирование зависимых случайных величин с реально существующим законом совместного распределения в задачах статистического анализа интегральных схем. – В кн.: Современные методы разработки РЭА. М., МДНТП им. Дзержинского, 1977.

10. Норенков И.П., Иванов С.Р., Мулярчик С.Г. Оптимизация параметров электронных схем по критерию запаса работоспособности. – "Вестник БГУ им. В.И. Ленина. Сер. I", 1970, №3.

11. Баталов Б.В., Егоров Ю.Б., Соколов А.Г. Алгоритм расчета оптимальных параметров фрагмента БИС. – В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1975.

Статья поступила 26 июня 1978 г.

В. И. Кольдяев, В. Т. Корнохин, И. Я. Корчагин,
П. П. Люмаров, В. Г. Назаров

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ И ЛИНЕЙНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Предлагаемая система автоматизированного проектирования позволяет решать основные задачи моделирования физических процессов в компонентах операционных усилителей и МДП-схем памяти, проводить схемотехнический расчет ИМС, а также проектирование фотошаблонов в интерактивном режиме.

УДК 681.327.67.001.2

Процесс проектирования МДП ЗУ и линейных интегральных схем исключает этап логического проектирования и моделирования, однако предпо-

лагает более углубленный анализ схем и компонентов, по сравнению, например, с микропроцессорными БИС, что обусловлено значительной чувствительностью электрических параметров подобных схем к их электрофизическим и технологическим параметрам. Процесс проектирования состоит из трех этапов (см. рисунок): анализа электрофизических параметров компонентов и технологии их изготовления, расчета схем и проектирования фотошаблонов. Разработанная система автоматизированного проектирования компонентов МДП ЗУ и линейных ИМС и технологии их изготовления содержит четыре подсистемы, позволяющие анализировать БИС, изготовленные по различным технологиям. Программы подсистем написаны на языке ФОРТРАН и оформлены для дисковой операционной системы ЕС-1022.

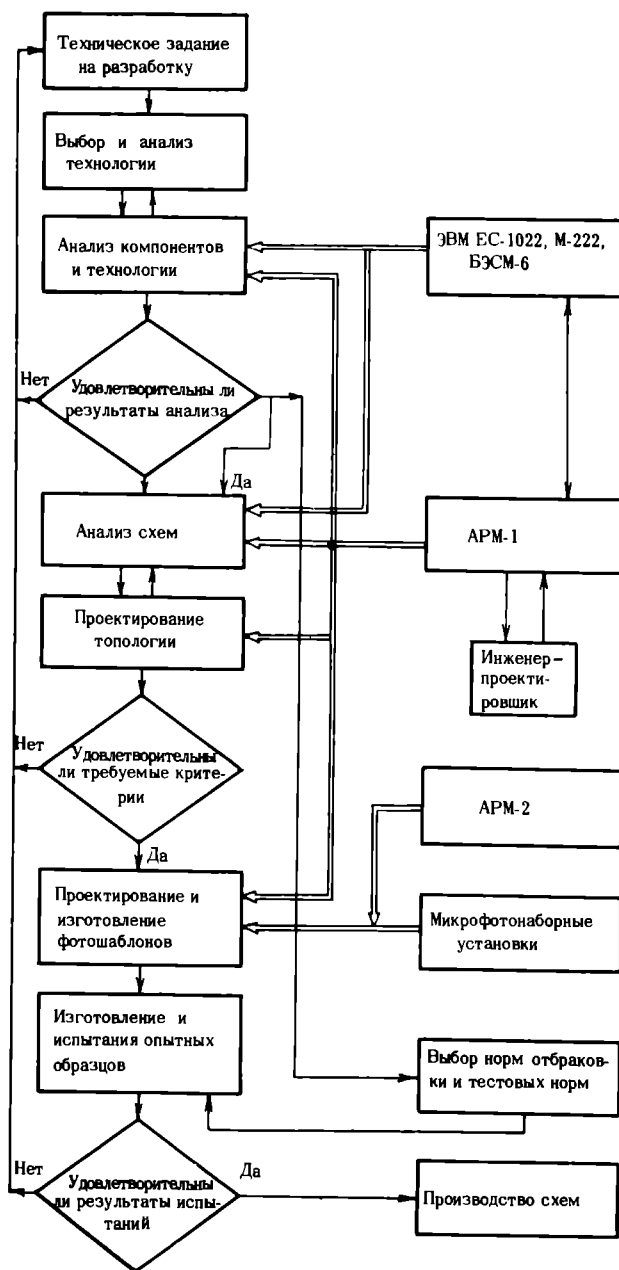
Подсистема расчета электрофизических параметров биполярных вертикальных $p-n-p$ и $n-p-n$ транзисторов и n -канальных (с управляющим $p-n$ переходом) полевых транзисторов и технологического маршрута их изготовления на одном кристалле при создании линейных ИМС содержит три программы, реализующие физико-топологические модели транзисторных структур. В основу моделей для биполярных транзисторов положены подход и алгоритмы, изложенные в работе [1]. Однако в силу специфики физической структуры транзисторов и режима их работы в линейных ИМС типа операционных усилителей учитываются некоторые особенности явлений переноса заряда в транзисторах [2]. Выходными характеристиками моделей биполярных транзисторов являются:

- глубины, площади, удельные и полные емкости $p-n$ переходов;
- поверхностные сопротивления слоев и сопротивление растекания на контакты;
- статический коэффициент усиления в схеме с общим эмиттером;
- зависимость f_T от тока эмиттера и напряжения на коллекторе;
- напряжение пробоя коллекторного перехода с учетом его кривизны;
- напряжение смыкания (прокола) базовой области при оборванном базовом контакте;
- сопротивление базовой области в активном линейном режиме;

– тестовые значения глубин $p-n$ переходов и поверхностных сопротивлений слоев.

Для полевого транзистора разработана программа, позволяющая на основе физической структуры и топологии транзистора рассчитать пробивные напряжения $p-n$ переходов затворов; напряжение отсечки канала; проводимость канала при нулевых напряжениях на затворе и стоке; крутизну и выходное сопротивление транзистора. Время счета варианта задачи – 2 мин.

Для расчета данных о физической структуре



Укрупненный процесс проектирования ИМС

применяется специальный набор программ, которые можно использовать также при оценке технологического маршрута изготовления ИС:

- программы одномерного анализа профиля распределения примесей бора, фосфора и сурьмы, после ряда последовательных операций: диффузии (первая стадия и вторая стадия с одновременным окислением кремния, эпитаксии над скрытым слоем, ионного легирования бора или фосфора, высокотемпературного отжига);

- программы расчета характеристик модели перераспределения примеси по результатам эксперимента;

- программы аппроксимации результирующих профилей распределения примесей после окончания цикла технологического процесса; результаты данной программы непосредственно используются как исходная информация для физико-топологических моделей.

В основу программ расчета переноса примесей положено решение уравнений диффузии методом функции Грина [2]. При алгоритмизации задачи использовались некоторые особенности метода [3], позволившие создать быстродействующий алгоритм с временем счета на одну высокотемпературную операцию не более 2 мин.

Данная подсистема позволяет выполнять оптимизацию физических структур транзисторов и технологической последовательности их изготовления по критерию максимизации процента выхода. Например, возможность расчета длительности одной из операций отжига в зависимости от толщины эпитаксиальной пленки кремния позволяет увеличить процент выхода схем в три раза в рамках АСУТП по сравнению с исходным временем отжига, независимым от толщины эпитаксиальной пленки.

Подсистема анализа электрофизических свойств МНОП-структур решает две задачи и соответственно содержит программу расчета кинетики инжекции заряда в структуру для определения динамических характеристик записи и стирания заряда и программу расчета релаксации заряда МНОП-структуры в течение длительного времени при воздействии температуры и внешних электрических полей. Первая задача реализуется с использованием регионального приближения при решении уравнения непрерывности для полного тока, учитывающего следующие особенности процесса накопления заряда в двухслойном диэлектрике:

- коэффициент захвата заряда, инжектированного через окисел кремния, в нитриде много меньше единицы;

- величина заряда, накапливаемого в стационарном режиме, определяется проводимостью нитрида;

- в малых полях вероятно туннелирование носителей заряда прямо на ловушки в нитриде кремния.

Модель динамики изменения заряда в структуре представляет собой систему алгебро-дифференциальных уравнений, решаемую неявным методом второго порядка. Для определения деполяризации заряда в МНОП-структуре решена краевая задача, поставленная на базе системы уравнений Пуассона и переноса заряда в пленке нитрида кремния. При этом в качестве начального условия выбран нестационарный профиль заряда [4], в качестве механизмов переноса заряда – механизмы Пула-Френкеля и прямого туннелирования, а локализованные состояния (ловушки) в запрещенной зоне диэлектрика имеют гауссову спектральную плотность. Решение системы уравнений сведено к аппроксимации краевой задачи системой нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, что позволяет за 30 мин рассчитать один вариант. Найдены лучшие режимы записи и стирания информации, разработан способ определения времени растекания заряда до заданного уровня.

Подсистема анализа электрофизических свойств МДП-структур с плавающим затвором с лавинной инжекцией заряда содержит программу (модель) расчета кинетики инжекции заряда на плавающий затвор и программу (модель) расчета характеристики релаксации инжектированного заряда при воздействии электрического поля и температуры.

Обе модели представляют собой систему алгебро-дифференциальных уравнений. Они построены в предположении, что разогрев носителей происходит в канале в области отсечки с захватом заряда на плавающем затворе, а растекание заряда с плавающего затвора происходит через поликремниевый окисел. Моделированием на ЭВМ определены максимальные скорости и величина инжектированного заряда, а также время его хранения.

Для обеспечения системы машинного анализа схем электрическими моделями МДП транзисторов: с легированным каналом, со встроенным каналом,

с плавающим затвором, биполярных транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$ типа и полевых транзисторов с $p-n$ переходом разработан набор программ, позволяющих определять характеристики моделей по результатам эксперимента. С целью повышения точности расчетов переходных процессов в схемах разработаны нелинейные динамические модели.

Система автоматизации проектирования включает программу расчета статического режима и переходных процессов линейных ИМС на $n-p-n$ и $p-n-p$ биполярных транзисторов и полевых с управляющим $p-n$ переходом.

В программе используется метод узловых потенциалов, интегрирование проводится модифицированным неявным методом второго порядка с допустимым количеством итераций до 5 и применен алгоритм работы с ненулевыми элементами матрицы Якоби [6], что позволяет за достаточно небольшое время (20 мин) рассчитать реакцию на импульс операционного усилителя, состоящего из 60 узлов на 28 биполярных и 3 полевых транзисторах.

Подсистема анализа МДП ИМС включает программы расчета передаточных характеристик и переходных процессов, статистического расчета стационарного режима, многовариантного детерминированного расчета и детерминированной оптимизации по одному-трем независимым и нескольким зависимым параметрам. Кроме того, подсистема содержит транслятор универсального бесформатного входного языка анализа, программы создания, копирования и обновления архивов задач, создания, копирования, корректировки и удаления параметров моделей. Библиотека моделей подсистемы включает следующие электрические модели элементов, доступные для использования любой программой расчета: МДП-транзисторов основного и дополнительного типа проводимостей, резисторов, емкостей $p-n$ переходов, линейных, МДП-емкостей. Расчет МДП-схем проводится с использованием метода узловых потенциалов. Решение системы интегро-дифференциальных уравнений выполняется с применением неявного метода интегрирования второго порядка в сочетании с методом учета разреженности матриц [6].

В подсистеме расчета МДП-схем используется смешанный позиционно-ключевой формат. Каждому элементу топологической структуры соответству-

ет свой идентификатор. Параметры, связи и коды элементов имеют позиционную структуру. Это, с одной стороны, избавляет транслятор от перенасыщения символами, а с другой — позволяет включать новые элементы без изменения транслятора. Входной язык, описывающий любые элементы ИМС, совместно с библиотекарем архива задач и параметров моделей допускает внесение изменений, перезапись, добавление новых элементов к уже имеющимся фрагментам и их выдачу для решения по любой программе подсистемы.

Для повышения устойчивости метода решения алгебраических уравнений в программе расчета передаточных характеристик выполняется выравнивание проводимостей областей истока и стока МДП-транзисторов. С целью ускорения работы программы расчета переходных процессов Якобиан системы вычисляется и обращается не на каждой итерации, а по мере существенного изменения его компонентов. Критерием для выполнения этих операций является величина узловых потенциалов. Подобный подход основан на той особенности МДП-схем, что работа с матрицей проводимости занимает значительную часть времени итерации, хотя изменение проводимости от итерации незначительно. При этом ускоряется работа программы расчета переходных процессов в 2–3 раза.

В одном задании могут быть выполнены все программы подсистемы. На ЭВМ типа ЕС-1022 с МОЗУ 256К анализу доступны схемы сложностью до 400 узлов. Время расчета переходных характеристик ~ 200 МДП-транзисторов составляет 30 – 60 мин.

Анализ МДП ЗУ с применением упомянутой подсистемы проводится в рамках специально разработанного маршрута анализа, типовые приемы которого могут быть автоматизированы.

Основу системы проектирования фотошаблонов составляет автоматизированная системы проектирования АСП-12 [7], усовершенствованная с целью расширения функциональных возможностей и организации интерактивного режима отладки топологии.

Разработана и включена в систему программа подготовки управляющей перфоленты микрофотонаборной установки (МФНУ), к системе подключен графопостроитель "Вектор-1301", работающий в режиме "on-line" с ЭВМ М-222, созданы и сопряжены с АСП-12 два автоматизированных рабочих

места проектировщика (АРМ-1 и АРМ-2) на базе мини-ЭВМ "Электроника-100".

Алгоритм программы (АФОН) подготовки перфоленты, управляющей МФНУ-549, основан на предлагаемой модели топологии. В качестве элемента модели используется угловая точка P_i контура топологии, взятая совместно с двумя ориентациями, которые определяются как значения функции от направления вдоль ребер $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ и $\overrightarrow{P_i P_{i-1}}$.

Множество таких элементов, названных дважды ориентированными точками, после сортировки их по возрастанию координат образуют объект (модель топологии), являющийся входом алгоритма АФОН.

Применение в алгоритме дважды ориентированной точки-объекта топологически более элементарного по сравнению с используемыми в работах [7-9], позволяет алгоритмически просто решать такие задачи, как автоматическая фрагментация слоя, деформация границы областей экспонирования, огибание смежных контуров (при допущении их во входном массиве), автоматический выбор режима экспонирования позитив-негатив.

Программа по предложенному алгоритму обеспечивает выигрыш в машинном времени тем большим, чем сложнее по конструкции и по числу точек будет топология слоя. Кроме того, сравнение некоторых поконтурных алгоритмов и алгоритма АФОН по числу масок, необходимых для построения достаточно сложной топологии, показало, что АФОН дает в 2,5-3 раза меньше масок. Это сокращает время работы не только ЭВМ, но и МФНУ. Сортировкой масок по монотонно-периодическому изменению их параметров получаем программу, оптимальную по вариации типоразмера масок, что существенно повышает надежность работы установки и точность экспонирования масок. Обнаружение регулярных масок и формирование операторов цикл-строка эффективно сокращает длину перфоленты.

Интерактивный режим отладки топологии обеспечивается за счет применения автоматизированных рабочих мест проектировщика (АРМ-1 и АРМ-2).

АРМ-1 позволяет проводить:

- обмен информацией по программному каналу между ЭВМ М-222 и мини-ЭВМ "Электроника-100";
- редактирование на экране дисплея УГД 43-1

листингов фрагментов топологии с поиском требуемых участков по контексту;

- вывод фрагментов топологий (послойных и совмещенных) на экран дисплея в требуемом масштабе, при этом имеется возможность с помощью светового пера задавать границы фрагмента (процедура "Окно") и устанавливать связь между угловой точкой контура топологии и ее описанием в листинге с учетом его иерархической структуры;

- прорисовку фрагментов топологии, задаваемых процедурой "Окно", в требуемом масштабе на графопостроителе ЭМ-712 под управлением мини-ЭВМ "Электроника-100" параллельно с редактированием листингов или просмотром любых фрагментов на экране дисплея;

- ввод информации с перфоленты, полученной на АРМ-2, в рабочий архив системы АСП-12; при необходимости введенный фрагмент топологии может быть просмотрен на экране дисплея и выполнено редактирование его листинга.

АРМ-2 обеспечивает кодирование в интерактивном режиме фрагментов топологии, выполненных на миллиметровой бумаге с точностью не хуже 1 мм, при помощи автокодировщика ЭМ-709, работающего под управлением мини-ЭВМ "Электроника-100". При этом мини-ЭВМ производит:

- привязку системы координат автокодировщика к системе координат миллиметровки с коррекцией систематической погрешности автокодировщика, а также погрешностей, связанных с несоответствием цены деления автокодировщика, неортогональностью системы координат миллиметровки и короблением бумаги;

- вывод листинга кодируемого фрагмента топологии на экран дисплея УГД 43-1 с контролем на острые углы и соответствие синтаксису входного языка системы АСП-12;

- редактирование получаемого листинга на экране дисплея с поиском информации по контексту;

- безошибочный вывод отредактированного текста листинга на перфоленту.

ЭВМ АРМ-1 с ОЗУ емкостью 32К подключена к ЭВМ М-222, снабженной дополнительным НМБ. Обмен информацией между НМБ, НМЛ и АРМ осуществляется одновременно с решением других задач через устройство системного сопряжения. Устройство обеспечивает двухсторонний обмен между ЭВМ в полудуплексном асинхронном режиме с использованием команд программного канала ми-

ни-ЭВМ и команд одиночного обмена ЭВМ М-222. Этим достигается простота устройства при скорости обмена, достаточной для режима реального времени.

Дальнейшее совершенствование системы проектирования предполагает более полное сочетание преимуществ пакетной обработки информации за счет применения системы АСП-51 [7] и интерактивного режима работы путем использования более совершенных АРМ на базе мощных мини-ЭВМ с внешними магнитными накопителями, с более совершенными пультами (дисплеями графическими на трубках с запоминанием, дисплеями алфавитно-цифровыми, графопостроителем с быстродействием около 1 м/с, автокодировщиками с курсором в виде карандаша). Для организации интерактивного режима в реальном времени, в том числе при схемотехническом проектировании и анализе компонентов ИМС, в качестве ЭВМ верхнего уровня следует использовать ЭВМ типа ЕС 1050 или более быстродействующую ЭВМ этой серии, включенную наряду с другими ЭВМ и мини-ЭВМ в системное кольцо для повышения производительности и надежности функционирования системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казенков Т.Г., Баталов Б.В. и др. Проектирование физической структуры логических интегральных микросхем с помощью ЭВМ. — В кн.: Микроэлектроника. Вып.7. М., "Сов.радио", 1974.
2. Кремниевые планарные транзисторы. Под ред. Я.А.Федотова, М., "Сов.радио", 1973.
3. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел. М., "Наука", 1964.
4. Arnett P.C., Yun B.H. Silicon-nitride trap properties as revealed by charge centroid measurements on MNOS-structures. — "Appl.Phys.Lett.", 1975, vol.26, N 1.
5. Lundkvist L. Discharge of MNOS-structure at elevated temperatures. — "Solid-State Electron.", 1976, vol.19, N 3.
6. Глариков Е.Л., Сыпчук П.П., Ссорин В.Г. Введение в автоматизацию схемотехнического проектирования. М., "Сов.радио", 1976.
7. Брусникин Г.Н., Лошаков В.Н., Широ Г.Э. Автоматизированная система АСП-51 проектирования топологии интегральных схем на базе ЕС ЭВМ. — "Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника", 1976, вып.6.
8. Осипов Л.Б., Широ Г.Э. Алгоритмические методы подготовки и контроля информации для микрофотонаборных установок. — "Электронная техника. Сер.10. Микроэлектронные устройства", 1978, вып.2(8).
9. Казенков Г.Г., Осипов Л.Б., Шемелин В.М., Стемпковский А.Л. Алгоритм подготовки данных для МФУ. — "Электронная пром-сть", 1974, вып.6.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

В.В.Макарчук, И.В.Мальшев

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ РАДИОПРИЕМНОЙ АППАРАТУРЫ

Разработанное программное обеспечение позволяет повысить эффективность и качество схемотехнического проектирования специализированных полупроводниковых схем для приемных трактов радиоаппаратуры.

УДК 621.3.049.77.001.2

Современный уровень развития схемотехники и технологии производства полупроводниковых ИМС дает возможность успешно использовать их при построении практически всех узлов радиоаппаратуры. Исследование

тенденций развития различных типов бытовой радиоаппаратуры показывает, что создание ее образцов на базе полупроводниковых ИМС требует одновременной комплексной разработки серий микросхем, существенно отличающихся по технологии изготовления, функциональной сложности и особенно по составу параметров, характеризующих возможности применения этих схем в высококачественной аппаратуре массового применения.

Успешное проектирование серий полупроводниковых радиотехнических ИМС, обоснованный выбор параметров определяют необходимость создания системы автоматизированного проектирования этого самостоятельного класса аналоговых полупроводниковых схем. Ряд таких задач, как разработка конструкторской документации на послонные чертежи, моделирование и расчет профиля компонентов и некоторых параметров микросхем в статическом и переходном режимах, успешно решен при создании и эксплуатации системы проектирования цифровых микросхем [1].

Однако в меньшей степени известны результаты практического использования программного обеспечения для расчета широкого перечня специализированных параметров ИМС, предназначенных для преобразования сигналов в приемных трактах радиоаппаратуры, например для расчета нелинейных искажений, коэффициентов передачи АМ и ЧМ трактов, спек-

тральных характеристик смесителей, эффективности замкнутых систем АРУ и т.д.

Некоторые вопросы расчета специальных параметров радиотехнических полупроводниковых ИМС на этапе схемотехнического проектирования могут быть решены на основе созданного комплекса программ, успешно используемого при разработке серий ИМС для бытовой радиоаппаратуры.

При построении пакета программ схемотехнического проектирования учитывались как современные тенденции развития класса радиотехнических полупроводниковых ИМС, так и требования системного подхода к их реализации.

Можно отметить два основных направления развития полупроводниковых радиотехнических ИМС [2].

— Разработка и усовершенствование серии универсальных полупроводниковых ИМС малой и средней степеней интеграции с относительно устоявшейся системой параметров, например усилителей радиочастоты, смесителей, широкополосных усилителей, усилителей низкой и промежуточной частоты с электронной регулировкой усиления и т.д. При проектировании таких схем проводится работа по снижению уровня шумов, расширению частотного диапазона, повышению выходной мощности. Программное обеспечение для расчета этих схем должно обеспечивать возможность

определения полного набора статических и высокочастотных характеристик, а также возможность совершенствования моделей компонентов ИМС на основе новых технологических процессов.

— Создание ИМС повышенной степени интеграции, включающих ряд универсальных схем и реализующих функции отдельных трактов радиоаппаратуры, например усилителя промежуточной частоты с собственной системой АРУ, тракта УПЧ с ЧМ-детектором и т.д. При построении программного обеспечения для проектирования схем этого направления необходимо учитывать их все возрастающую схемотехническую (до 300–500 компонентов) и функциональную сложность, отсутствие устоявшегося перечня параметров и, как следствие, их многочисленность.

Системный подход к созданию пакета прикладных программ определил единый для всех программ метод анализа электрической цепи — метод узловых потенциалов, реализацию математического обеспечения на базе алгоритмического языка высокого уровня, модульный принцип построения отдельных программ и наличие в каждой программе блока контроля ошибок во входной информации, единый язык описания принципиальной электрической схемы.

Опыт разработки программного обеспечения для расчета электрических параметров радиотехнических ИМС показал, что расчет на ЭВМ параметров большинства из них может быть осуществлен на базе относительно небольшого числа машинных программ детерминированного анализа, существенное отличие между которыми заключается прежде всего в математической постановке решаемой задачи и использовании различных моделей компонентов ИМС.

На алгоритмическом языке АЛГОЛ-60 применительно к ЭВМ БЭСМ-6 разработаны и используются в процессе проектирования полупроводниковых радиотехнических ИМС следующие специализированные программы схемотехнического проектирования:

Программа расчета статического режима. Позволяет определять токи и напряжения в узлах микросхем сложности до 120 узлов и 260 компонентов при изменении напряжения внешних источников питания и рабочих температур. Предусмотрена возможность представления моделей различных компонентов ИМС в виде многополюсных подсхем.

Метод решения нелинейной системы алгебраических уравнений, описывающей математическую модель схемы, комбинированный, основанный на сочетании итерационных методов Ньютона и Бroyдена. Итерационный процесс начинается с ненулевых начальных приближений, формируемых автоматически с помощью алгоритма, который учитывает специфику статического режима радиотехнических ИМС, заключающуюся в работе большинства транзисторов в области активного режима.

Среднее время расчета статического режима большинства типовых схем составляет от 2 до 50 с. Например, для расчета статического режима микросхемы К174УР1 усилителя промежуточной частоты канала звукового сопровождения телевизионного приемника

[3], содержащей 59 транзисторов и диодов, 51 резистор, потребовалось 39 с времени центрального процессора ЭВМ БЭСМ-6.

Программа совместного расчета статического режима и малосигнальных частотно-фазовых характеристик. Рассчитана на допустимую сложность анализируемых микросхем (95 узлов и 260 компонентов) Алгоритм части программы, реализующей поиск режима схемы по постоянному току, аналогичен алгоритму программы статического режима. Частотно-фазовые характеристики микросхемы рассчитываются по точкам путем последовательного формирования и решения системы линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами на каждой частоте. Необходимые для формирования матрицы системы численные значения параметров малосигнальных моделей транзисторов определяются автоматически на основе данных расчета статического режима. В качестве алгоритма решения системы уравнений используется LU -разложение, причем с целью сокращения затрат машинного времени система решается с учетом разреженности матрицы узловых проводимостей, а для уменьшения числа необходимых арифметических операций использован алгоритм перенумерации узлов схемы. В зависимости от сложности схемы расчет 20 точек частотной характеристики типовых усилительных ИМС занимает время от 10 с до 2,5 мин.

Программа наиболее эффективно используется при анализе широко распространенных полупроводниковых радиотехнических ИМС, содержащих регулируемые усилители, и позволяет определить частотные зависимости малосигнальных параметров в диапазоне изменения напряжения электронной регулировки.

Программа анализа динамических процессов в радиотехнических ИМС. Обладает возможностью рассчитывать схемы, содержащие до 100 узлов и 250 компонентов. Для интегрирования системы интегро-дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель схемы, в программе реализован неявный метод интегрирования первого порядка. Программа позволяет моделировать работу микросхем при подаче на вход следующих воздействий: синусоидального, импульсного, АМ- и ЧМ-сигналов, телевизионного видеосигнала.

Программа используется для расчета переходных процессов, протекающих в радиотехнических ИМС, осуществляющих нелинейные преобразования информационных сигналов. При этом среднее время расчета типовых вариантов схем обычно не превышает 5 мин.

Программа расчета функциональных параметров радиотехнических ИМС в режиме большого сигнала. Позволяет решать задачи определения установившегося режима колебаний при периодическом входном воздействии, гармонического анализа и расчета спектральных составляющих выходного сигнала для схем, содержащих до 70 узлов и 200 компонентов.

При расчете установившегося режима используется модификация алгоритма, предложенного в работе [4], что сокращает время счета. Для определения спектральных составляющих выходного сигнала использован

рекуррентный алгоритм Хемминга [5]. Программа имеет набор входных сигналов, аналогичный набору в программе анализа динамических процессов и, в частности, позволяет определить следующие широко используемые для описания радиотехнических ИМС параметры:

- эффективность регулировки усиления трактов, содержащих регулируемые усилительные элементы, детектор и контур автоматической регулировки усиления;
- нелинейные искажения в широкополосных усилителях;
- коэффициенты подавления опорной и сигнальной частот в смесителях [6];
- коэффициент передачи усилителя промежуточной частоты, содержащего усилитель-ограничитель и частотный детектор.

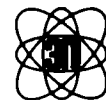
Время расчета типового варианта составляет от 5 до 30 мин в зависимости от сложности схемы и вида входного воздействия.

Применение комплекса программ помимо повышения эффективности и качества схемотехнического проектирования позволило разработать оригинальные схемотехнические варианты многофункциональных специализированных интегральных схем для радиотехнических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васенков А.А., Казеннов Г.Г., Щавлев Н.И. Структура технических средств автоматизированной системы проектирования БИС. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов.радио", 1976.
2. Малышев И.В., Губеев Ф.Я., Аракелян С.Г., Кравчук И.Я. Полупроводниковые ИС для приемно-усилительных трактов радиоаппаратуры. — "Зарубежная электронная техника", 1976, № 18.
3. Аракелян С.Г., Губеев Ф.Я., Малышев И.В., Кравчук И.Я., Ткачев Е.М. Полупроводниковая ИС К174УР1. — "Электронная пром-сть", 1977, вып. 3.
4. Эйприлл Т.Д., Трик Т. Анализ стационарного режима нелинейных цепей с периодическими входными сигналами. — "ТИИЭР", 1972, т. 60, № 1.
5. Хемминг Р.В. Численные методы. М., "Наука", 1972.
6. Волков Н.П., Макаруч В.В., Малышев И.В. Расчет нелинейных характеристик интегральных схем для радиотехнических устройств на ЭВМ. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1977, вып. 1.

Статья поступила 26 июня 1978 г.



ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ

Л. Г. Оганесянц, В. А. Шепелев

ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА СИНТЕЗА ТОПОЛОГИИ БИС

Интерактивная система обеспечивает проектирование сложных фрагментов БИС на экране графического дисплея с возможностью автоматического контроля соответствия топологии исходной принципиальной схеме. Применение системы значительно повышает производительность труда проектировщика и сокращает сроки разработки БИС.

УДК 621.3.049.77.002.72

Синтез топологии БИС, как правило, производится вручную, в то время как этапы контроля чертежа и получение конструкторской документации в большей степени автоматизированы. Поэтому автоматизация синтеза топологии БИС является чрезвычайно актуальной задачей, решение которой приведет не только к сокращению сроков получения чертежа, повышению его качества, но и к упрощению и ускорению этапа контроля топологии и, следовательно, к уменьшению стоимости производства БИС в целом.

Трудности формализации и алгоритмизации задач проектирования топологии и отсутствие математических моделей, удобных для постановки задачи автоматического синтеза топологии, обуслов-

ливают целесообразность интерактивного метода проектирования, основанного на оптимальном разделении функций между ЭВМ и пользователем.

Разработанная интерактивная система проектирования топологии построена на базе мини-ЭВМ и дисплеях с регенерацией изображения.

Иерархический принцип синтеза топологии. Несоответствие между размерами и высокой информативной емкостью топологического чертежа БИС и разрешающей способностью дисплеев приводит к необходимости использования метода фрагментации [1, 2]. Развитием метода фрагментации является иерархический принцип синтеза топологии.

Согласно этому принципу на первом этапе проектирования формируются элементы топологии, которые представляют ее низший уровень и используются для формирования подфрагментов топологии более высокого уровня. Последние применяются при формировании фрагментов еще более высокого уровня и т.д. Для формирования фрагмента топологии некоторого уровня можно использовать подфрагменты любого более низкого уровня. Таким образом, весь топологический чертеж рассматривается как многоуровневая структура, верхний уровень которой отображает всю топологию БИС.

В предлагаемой системе проектирования используется текстовое описание топологии на языке высокого уровня [3]. Любой подфрагмент имеет свое имя, а его положение в фрагменте более высокого

уровня определяется точкой привязки в системе координат этого фрагмента. Текстовое описание топологического чертежа может быть введено в ЭВМ.

В процессе проектирования топологии интегральной схемы используются все средства работы с графическим и текстовым описанием топологии. При этом в системе осуществляется автоматическое взаимно-однозначное отображение графического описания в текстовое. Реализация таких возможностей, на наш взгляд, позволяет пользователю наиболее оптимально с точки зрения временных затрат производить синтез топологии.

Исходя из вышеизложенного, сформулируем основные этапы синтеза топологии в интерактивной системе.

1. Формирование топологии элементов низшего уровня (транзисторов, диодов и их сборок).
2. Компоновка фрагментов топологии из элементов низшего уровня и подфрагментов.
3. Формирование контуров металлизации, резисторов, контактных площадок и т.д.
4. Формирование топологических и электрических моделей.

Таким образом, процесс проектирования представляется как последовательное выполнение работ на этапах 1–4 с переходом (если это необходимо) с этапа 4 на этап 2.

Рассмотрим возможности системы для выполнения операций на различных этапах проектирования. На этапе 1 формируются топологии элементов электрической схемы (транзисторы, диоды и их сборки), представляющие фрагменты (библиотечные элементы) нижнего уровня в иерархической структуре топологии. Топология элемента представляет собой набор контуров.

Число элементов, используемых при проектировании топологии биполярных БИС, может достигать нескольких сотен, поэтому создать библиотеку топологии элементов достаточно трудно.

В системе предусмотрен параметрический подход к формированию топологии элементов, при котором используются хранящиеся в библиотеке описания обобщенных элементов. Топология элемента может быть сформирована путем задания конкретных значений технологических допусков и конструктивных параметров.

На этапе 2 должна решаться задача размеще-

ния подфрагментов на некоторой сетке, моделируемой на экране дисплея, с учетом целого ряда критериев. Основными критериями принято считать минимизацию площади кристалла, количества слоев металлизации и, следовательно, количества внутрисхемных пересечений проводников. Для решения задачи размещения недостаточно вычислительной мощности мини-ЭВМ. Поэтому задача размещения элементов и компоновки фрагментов из подфрагментов решается топологом в интерактивном режиме. Перечень функций, которые должна выполнять интерактивная система на этапе компоновки для реализации иерархического принципа, представлен в табл.1.

На этапе 3 решаются задачи формирования проводников, резисторов, контактных площадок и других контуров, входящих непосредственно в проектируемый фрагмент, а также задачи изменения конфигурации (деформации) существующих контуров (табл.2).

На этапе 4 создается упрощенная модель спроектированного фрагмента, предназначенная для использования на следующих уровнях проектирования. Смысл таких моделей заключается в сохранении лишь той информации о геометрии и электрической схеме фрагмента, которая необходима для формирования фрагментов более высокого уровня.

Таблица 1

Операции компоновки фрагмента

Операция	Данные	Выполнение операции
Сдвиг подфрагмента	j, i, k	Пошаговое или следящее перемещение
Относительный сдвиг подфрагмента	j, i, k ; ограничитель; направление; допуск H	Перемещение по вертикали или горизонтали с автоматическим соблюдением допуска относительно отрезка -ограничителя
Изменение ориентации	j, i, k_1, k_2	Значение k_1 заменяется на значение k_2
Вызов из библиотеки	j, k	Формирование изображения $\Phi_j^{i,k}$ по элементу базы данных b_j
Стирание подфрагмента	j, i, k	Удаление изображения $\Phi_j^{i,k}$
Копирование подфрагмента	j, i, k	Повторение изображения $\Phi_j^{i,k}$

Примечание: j — имя подфрагмента; i — тип привязки подфрагмента; k — тип ориентации подфрагмента.

Моделирование сетки проектирования на экране графического дисплея. Рассмотрим средства системы, позволяющие обойти несоответствие между размерами и разрешающей способностью экрана дисплея и топологического чертежа, вычерчиваемого топологом на миллиметровке.

Для современных дисплеев размер сетки экрана составляет примерно 2048×2048 адресуемых точек с расстоянием между ними (дискретом экрана) $- 0,1-0,2$ мм. Линии, проведенные по соседним узлам сетки, практически неразличимы для глаза. Поэтому даже если сопоставить дискрету экрана шаг сетки проектирования, то разработка топологии сравнительно небольшого кристалла все равно представляет трудность.

Пусть описание структуры графических данных, хранящееся в памяти ЭВМ, содержит любые значения координат угловых точек контуров и точек привязки подфрагментов на сетке проектирования в форме с фиксированной запятой. Таким образом, сетке экрана $F^Э$ сопоставим сетку проектирова-

ния $F^П$. Очевидно, точность проектирования и предельный размер кристалла определяются разрядностью ЭВМ.

При переходе от $F^П$ к $F^Э$ получится "грубое" изображение топологии на экране дисплея, построенное по его точному описанию. Причем различие тем больше, чем больше размер проектируемого фрагмента. Внести изменение в точное описание, используя "грубое" представление, выведенное на экран дисплея, достаточно трудно.

Эффективному применению операций проектирования способствуют следующие средства:

- Выбор размера сетки $F^П$, соответствующего габаритным размерам проектируемого фрагмента Φ_0 , существенно облегчает проектирование небольших фрагментов. Габаритная область фрагмента $\Gamma_0(x_1^Г, x_2^Г, y_1^Г, y_2^Г)$ определяется из условий $x_1^Г = x_{\min}$; $y_1^Г = y_{\min}$; $x_2^Г = x_{\max}$; $y_2^Г = y_{\max}$, где x_{\min} , y_{\min} (x_{\max} , y_{\max}) - минимальные (максимальные) координаты угловых точек контуров фрагмента Φ_0 .

- Сдвиг локальной системы координат фрагмента Φ_0 в точку $O_1^Г(x_1^Г, y_1^Г)$. При этом формируется новая габаритная область

$$\Gamma_{01}(x_{11}^Г, y_{11}^Г, x_{21}^Г, y_{21}^Г),$$

где $x_{11}^Г = 0$; $y_{11}^Г = 0$; $x_{21}^Г = x_2^Г - x_1^Г$; $y_{21}^Г = y_2^Г - y_1^Г$.

- Команда "моделирование окна" обеспечивает использование дисплея для обработки части топологии. Вырезание части топологии является довольно сложной задачей в том случае, если данные представлены в виде структурного массива [4]. Действительно, одна графическая подпрограмма $\delta_j^{ГК}$, как правило, соответствует различным подфрагментам Φ_j^{ik} , которые могут различными способами пересекаться границами выделяемого окна. Одним из решений проблемы, позволяющих сохранить представление данных в форме структурного массива, является формирование для каждого конкретного случая пересечения Φ_j^{ik} с границами окна специальной графической подпрограммы. Такое решение ведет к увеличению объе-

Таблица 2
Операции формирования контуров

Операция	Данные	Выполнение операции
Формирование контура	-	Формирование по координатам или в следящем режиме
Параметрическое формирование контура по осевой	Осевая линия, ширина	Формируются контуры металлизации и резисторов
Автоматическое формирование проводников	Ширина	Формируется контур металлизации или осевая линия для параметрического формирования
Параметрическое формирование контуров	Контур или слой, допуск H	Формируется контур или слой расширением (сжатием) исходных контуров на величину H
Сдвиг контура	-	Пошаговое или следящее перемещение контура
Относительный сдвиг контура	Ограничитель, направление, допуск H	Перемещение по вертикали или горизонтали с автоматическим соблюдением допуска относительно отрезка ограничителя
Стирание контура	-	Удаление изображения контура
Копирование контура	-	Повторение изображения контура
Деформация контура	-	Сдвиг, стирание, копирование точки; сдвиг, относительный сдвиг отрезка
Объединение контуров	-	Формирование сложного контура из более простых

ма дисплейного файла и усложнению алгоритмов проектирования особенно на этапе компоновки.

Предлагаемая упрощенная модель окна O включает набор подфрагментов Φ^0 и контуров $Q^0 = \{q_m\}$:

$$\Phi^0 \subset \Phi \mid \forall \Phi_j^{ik} \subset \Phi^0 \{ \Gamma_j^{ik} \subset \Gamma^0 \};$$

$$Q^0 \subset \Phi^0 \mid \forall q_m \subset Q^0 \{ \Gamma_m^q \subset \Gamma^0 \},$$

где Γ_j^{ik} – габаритная область подфрагмента Φ_j^{ik} ; Γ_m^q – габаритная область контура $q_m \subset \Phi^0$; Γ^0 – область окна.

Возможность моделирования окна облегчает решение задачи взаимного размещения близко расположенных подфрагментов и контуров. Малый объем информации в окне существенным образом упрощает отражение изменений массива b^{Γ_0} в массив b^{Γ_0} (b^{Γ_0} – графическая подпрограмма, описывающая попавшую в окно часть проектируемого фрагмента). Для этого формируется некоторая таблица, устанавливающая соответствие адресов элементов массивов b^{Γ_0} и b^{Γ_0} .

Вывод на экран дисплея координат на сетке F^{Π} угловых точек контуров и точек привязки подфрагментов позволяет выполнить точные перемещения элементов изображения на сетке F^{Π} .

– Наложение опорной сетки F^0 и измерение расстояний позволяют приблизительно оценить расположение топологических фигур. Опорная сетка F^0 представляет собой видимую на экране сетку, шаг которой больше шага F^{Π} . Более точная оценка взаимного расположения получается при измерении расстояний между отрезками, указанными световым карандашом.

Формирование и использование топологических моделей фрагментов. Рассмотренные средства позволяют обойти такой недостаток дисплея, как малая разрешающая способность экрана. Второй недостаток, связанный с ограниченным объемом выводимой на экран графической ин-

формации, ограничивает информационную емкость проектируемого фрагмента. В связи с этим предлагается при компоновке фрагмента использовать упрощенные изображения подфрагментов, содержащие только информацию, существенную для выполнения операций компоновки. Таким образом, процесс проектирования любого фрагмента завершается формированием его топологической модели Q^T . Для построения алгоритма формирования топологической модели определим состав топологической модели:

$$Q^T = Q_a^T \cup Q_M^T \cup Q_k^T,$$

где Q_a^T – информация, определяющая площадь фрагмента, занятую активными элементами и резисторами; Q_M^T – информация, определяющая площадь фрагмента, занятую проводниками; Q_k^T – массив контактных окон, не покрытых проводниками.

Если фрагмент включает несколько слоев металлизации, то $Q_M^T = \cup_i Q_{Mi}^T$, где i – номер слоя металлизации.

Алгоритм А формирования Q_a^T .

Процедура A_1 : деформация контуров. Все контуры слоя разделения, характеризующего площадь, занятую активными элементами топологии и резисторами, расширяются на величину $\delta = (H_i + D_i) / 2$. Здесь H_i – допуск типа "зазор" между контурами; D_i – допуск типа "размер" контуров. В полученный массив включаются все контуры из массивов Q_{aj}^T , взятые из подфрагментов Φ_j^{ik} и предварительно расширенные на величину $D_i / 2$. Массив контуров представляется в виде массива отрезков M_0 .

Процедура A_2 : формирование модели M_0^B . Из массива M_0 выделяется массив вертикальных и наклонных отрезков M_0^B , которые сортируются по координате x . Таким образом, массив M_0^B разбивается на уровни с постоянной координатой x .

Каждому вертикальному отрезку соответствует запись $m^B \in M_0^B$

$$m^B = \{ N, N', x, y_1, y_2, y_1', y_2' \},$$

где $N = N'$ – метки контура; $x, y_1 = y_1'; y_2 = y_2'$ – координаты отрезка.

Каждому наклонному отрезку соответствует запись

$$m_H^B = \{ N, N', x_1, y_1, x_2, y_2, x_1', y_1', x_2', y_2' \},$$

где x_1, x_2 – координаты соседних уровней.

Каждому контуру в массиве M_0^B соответствует подмассив отрезков $M_0^{NB} \subset M_0^B$. Массив M_0^B , элементы которого представлены в виде таких записей, полностью определяет геометрический чертеж слоя.

Процедура A_3 : формирование упрощенной модели M_y^B . Выбрать отрезок $m_1^B \in M_0^{NB}$, для которого $y_1 \neq y_2 \neq c, x_1$ – минимален. Выбрать отрезок $m_2^B \in M_0^{NB}$, для которого $y_1 \neq y_2 \neq c, x_2 > x_1$. Возможны следующие случаи взаимного расположения отрезков: отрезки не перекрываются по координате y ; отрезки частично или полностью перекрываются по координате y . В первом случае выбирается отрезок $m_2^B \in M_0^{NB}$ следующий за m_1^B (отрезки m_1^B и m_2^B назовем определяющими). Во втором случае определяется область перекрытия отрезков, ограниченная координатами y_1^n, y_2^n . В записях m_1^B и m_2^B изменяем значения координат y_1, y_2 , удаляя из отрезков части, соответствующие области перекрытия. Если один или оба отрезка – наклонные, то в существующих записях изменяются значения координат x_1, y_1, x_2, y_2 . Если при этом область перекрытия y_1^n, y_2^n полностью соответствует области y_1, y_2 , то принимается $y_1 = y_2 = c$.

Анализируются отрезки всех уровней, у которых $x_1 \leq x \leq x_2$. Выделяются отрезки, которые по координате y пересекаются с областью перекрытия. Изменяем значения координат y_1', y_2' (для $m_H^B - x_1', y_1', x_2', y_2'$), удаляя части, соответ-

ствующие областям перекрытия. При этом возможен случай формирования двух отрезков из одного, что влечет за собой формирование двух соответствующих записей. Если в отрезках, пересекающихся с областью перекрытия $N^* = N^{*'}$, то метке $N^{*'}$ присваивается значение N_0 . Здесь N_0 – метка определяющих отрезков; N^* – метка отрезка, пересекающегося с областью перекрытия.

Если $N^* \neq N^{*'}$, то для всех отрезков с меткой $N^{*'}$ присваивается новое значение N_0 метке $N^{*'}$.

В результате выполнения указанных операций формируется массив M_y^B , который разбивается на подмассивы M_y^{NB} , соответствующие результирующим контурам.

Процедура A_4 : формирование модели M_0^Γ . Из массива M_0^B выделяется массив горизонтальных отрезков M_0^Γ . Операции, выполняемые над элементами массива M_0^Γ , аналогичны операциям над элементами массива M_0^B в процедуре A_2 .

Процедура A_5 : формирование упрощенной модели M_y^Γ . Эта процедура аналогична процедуре A_3 .

Процедура A_6 : формирование Q_a^T . Массивы M_y^B и M_y^Γ объединяются таким образом, что новый массив M_y^N разбивается на подмассивы $M_y^N = M_y^{NB} \cup M_y^{N\Gamma}$, для которых справедливо условие

$$\exists m^B, m^\Gamma \{ N' \in m^B, m^\Gamma \} \& (m^B \in M_y^{NB}) \& \& (m^\Gamma \in M_y^{N\Gamma}) \}.$$

Отрезки массива M_y^N объединяются в результирующий контур с использованием в записях m^B координат y_1', y_2' и в записях $m^\Gamma - x_1', x_2' \dots$. Записи, соответствующие наклонным отрезкам, выбираются только из M_y^B . Контур, полученные в результате объединения, сжимаются на величину

$D_i/2$, где D_i — минимально допустимый размер контура.

Последовательность построения Q_a^T иллюстрируется на рис. 1, а — е.

В алгоритме А с помощью операции сортировки массивов M_0^B и M_0^G исключается полный перебор элементов массивов при формировании массивов M_y^B и M_y^G . Это обуславливает высокое быстродействие алгоритма.

Рассмотрим процесс получения модели Q_k^T

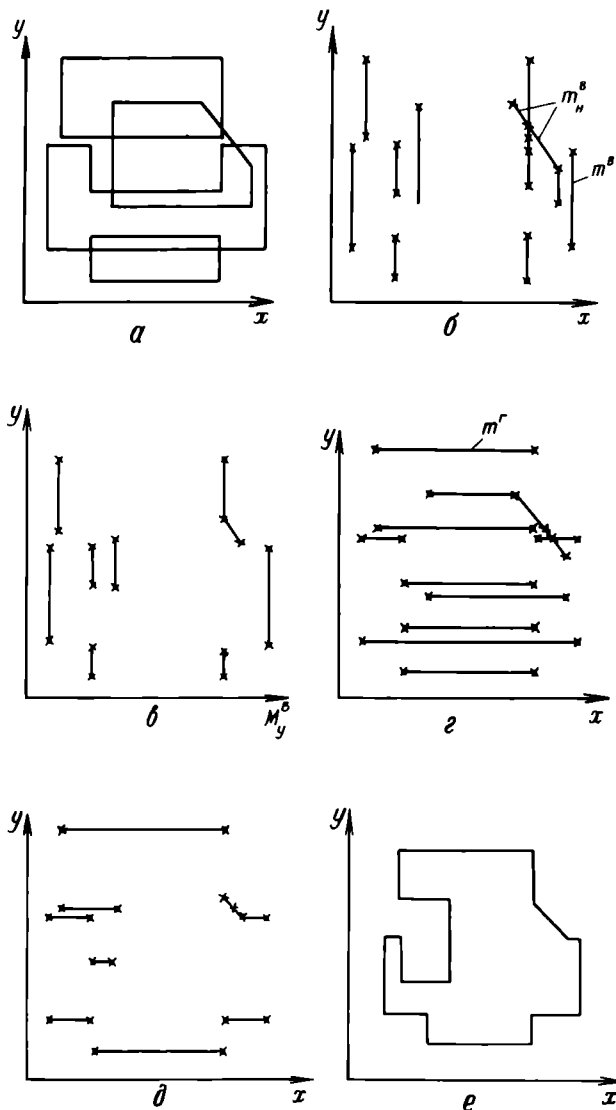


Рис.1. Последовательность формирования контура топологической модели: а — исходные контуры топологии; б — модель M_0^B ; в — упрощенная модель M_y^B ; г — модель M_0^G ; д — упрощенная модель M_y^G ; е — упрощенная топологическая модель Q_a^T

слоя контактных окон. При ее формировании оценивается взаимное расположение контура q_k и контуров модели Q_M^T . Контур q_k включается в модель Q_k^T при выполнении условия

$$\forall q_M^T \in Q_M^T \{ q_k \bar{c}_x q_M^T \}. \quad (1)$$

Таким образом, определены алгоритмы формирования Q_a^T , Q_M^T , Q_k^T и, следовательно, топологической модели Q^T .

Формирование электрических моделей фрагментов. Среди требований, предъявляемых к интерактивной системе проектирования, основным считают возможность безошибочного проектирования. Это означает, что при выполнении ряда интерактивных операций система должна автоматически контролировать результат.

Операции относительного сдвига контуров и подфрагментов, параметрического формирования контуров и элементов топологии позволяют учитывать конструкторско-технологические ограничения на минимально допустимый размер контура и минимально допустимые зазоры между контурами. Окончательный вариант чертежа проверяется в подсистеме контроля.

Немаловажное значение имеет проверка соответствия проектируемого фрагмента топологии исходной принципиальной схеме. Известные алгоритмы предназначены для обработки значительных объемов топологической информации и обладают невысоким быстродействием, что делает их непригодными для применения в интерактивных системах на основе мини-ЭВМ.

Рассмотрим метод контроля правильности проектирования фрагмента топологии, основанный на формировании электрических моделей фрагментов и использовании их при проектировании фрагмента более высокого уровня.

Представим электрическую модель фрагмента Q^3 в виде многополюсника, выводам которого присвоены метки $l \in L$. Тогда справедливо условие

$$\forall l_k, l_m \in L \{ l_k \neq l_m \}. \quad (2)$$

Для j -го элемента топологии (фрагмента низ-

шего уровня) в электрическую модель $Q_j^{\mathcal{Q}}$ включаются все выводы элемента. Метка $l \in L_j$ содержит информацию об имени j элемента и типе r вывода, т.е. $l = j \cup r$.

Пусть элемент, описанный базой данных b_j , используется для формирования различных подфрагментов Φ_j^{ik} . Очевидно, выводам, принадлежащим различным Φ_j^{ik} , соответствуют одинаковые метки l . Это обстоятельство определяет применение алгоритмов выявления изоморфизма электрического и топологического графов для решения задач контроля соответствия топологии исходной принципиальной схеме в тех случаях, когда в языке описания топологии отсутствуют средства сохранения нумерации элементов по принципиальной схеме.

В общем случае для двух подфрагментов $\Phi_j^{i_1, k_1}$ и $\Phi_j^{i_2, k_2}$ справедливо $i_1 \neq i_2, k_1 \neq k_2$. Тогда при проектировании фрагмента присвоим меткам l подфрагментов новые значения:

$$l = l \cup i \cup k, \quad (3)$$

где i – тип (номер) точки привязки подфрагмента, k – тип (номер) ориентации.

Таким образом, все выводы подфрагментов имеют несовпадающие метки – выполняется условие (2).

Построение электрической модели $Q^{\mathcal{Q}}$ фрагмента производится при формировании модели Q_k^T . Вывод q_k включается в модель $Q^{\mathcal{Q}}$ при выполнении условия (1). Выводу соотносится метка l , формируемая из условия (3).

Алгоритм В контроля топологии фрагмента на соответствие принципиальной схеме в процессе проектирования.

Процедура B_1 : ввод списка L^1 . При формировании контура металлизации q_M в систему вводится множество L^1 меток контактов элементов, связанных с данным узлом по принципиальной схеме. Элемент l^1 множества L^1 содержит следующие данные: номер элемента топологии по принципиальной схеме, имя j -го элемента, тип r вывода. Формируется массив $T^{\mathcal{Q}}$, включающий для каждого

N -го узла запись $t_N^{\mathcal{Q}}$ вида

$$t_N^{\mathcal{Q}} = \{ N, l_1^1, l_2^1, \dots \}.$$

Здесь: N – номер узла по принципиальной схеме.

Процедура B_2 : формирование списка L^2 . Составляется список $L^2 \subset L$ меток l выводов, геометрически перекрывающихся контуром q_M сформированного узла. Создается массив $T^T = \{ t^T \}$, в котором каждому контуру q_M соответствует запись вида

$$t_N^T = \{ N, l_1, l_2, \dots \},$$

где l – метка вывода элемента, входящая в $Q_j^{\mathcal{Q}}$.

Процедура B_3 : сравнение списков L^1 и L^2 . Проверяется условие

$$\forall l^1 \in L^1 \{ \exists l^2 \in L^2 [(j^1 = j^2) \& (r^1 = r^2)] \}.$$

Если условие не выполняется, то это означает, что при формировании проводника допущена ошибка. Процедуры B_1 – B_3 выполняются при построении всех проводников.

Процедура B_4 : сравнение массивов $T^{\mathcal{Q}}$ и T^T . Из массива $T^{\mathcal{Q}}$ выбирается первая запись $t_N^{\mathcal{Q}}$, из которой выделяется один элемент

$$l' = \{ n', j', r' \},$$

где n' – номер элемента принципиальной схемы.

Составляется массив $T_l^{\mathcal{Q}} \subset T^{\mathcal{Q}}$ записей $t_{Nl}^{\mathcal{Q}}$ таких, что

$$\forall t_{Nl}^{\mathcal{Q}} \in T_l^{\mathcal{Q}} \{ \exists l_m^{\mathcal{Q}} \in t_{Nl}^{\mathcal{Q}} [(n' = n'_m) \& (j' = j'_m)] \}. \quad (4)$$

После этого формируется список N^* номеров узлов $N \in t_{Nl}^{\mathcal{Q}}$. Анализируются записи t_N^T в массиве T^T . Если выполняется условие

$$\forall N \in N^* \{ \exists l_m^T \in t_N^T [(j'_k = j'_m) \& (r'_k = r'_m)] \& [\forall l_m^T \in t_N^T (n = \text{const})] \}, \quad (5)$$

то ставим в соответствие номер элемента по электрической схеме n' автоматически сформированному номеру n . При невыполнении условия (5) возникает ошибка в проектировании, заключающаяся в неверном расположении элемента топологии с номером n' по принципиальной схеме или в неверном задании нумерации узлов в процедуре B_1 . Элементы записей l' и l помечаются и в дальнейшей работе алгоритма не участвуют. Работа алгоритма B прекращается, если все l' и l помечены.

Принцип работы поясняется на рис.2. Здесь типы элементов и выводов элементов принципиальных схем проставлены внутри многополюсников. Слева от каждого многополюсника записан номер соответствующего элемента по принципиальной схеме (рис.2, а) и номер, автоматически сформированный по топологии (рис.2, б). Массивы $T^{\mathcal{Q}}$ и T^T будут иметь следующий вид:

$T^{\mathcal{Q}}$	T^T
$t_1^{\mathcal{Q}} = \{1; 1, 1, 2; 6, 2, 2; 11, 1, 2\}$	$t_1^T = \{1; 21, 1, 2; 26, 2, 1; 31, 1, 2\}$
$t_2^{\mathcal{Q}} = \{2; 1, 1, 1; 2, 3, 2; 11, 1, 1\}$	$t_2^T = \{2; 21, 1, 1; 22, 3, 2; 31, 1, 1\}$
$t_3^{\mathcal{Q}} = \{3; 2, 3, 1; 3, 6, 2\}$	$t_3^T = \{3; 27, 3, 1; 28, 6, 2\}$
$t_4^{\mathcal{Q}} = \{4; 3, 6, 1; 4, 3, 2\}$	$t_4^T = \{4; 28, 6, 1; 29, 3, 2\}$
$t_5^{\mathcal{Q}} = \{5; 4, 3, 1; 5, 4, 2\}$	$t_5^T = \{5; 24, 3, 1; 25, 5, 2\}$
$t_6^{\mathcal{Q}} = \{6; 5, 4, 1; 10, 5, 1\}$	$t_6^T = \{6; 25, 5, 5; 30, 4, 1\}$
$t_7^{\mathcal{Q}} = \{7; 9, 3, 1; 10, 5, 2\}$	$t_7^T = \{7; 29, 3, 1; 30, 4, 2\}$
$t_8^{\mathcal{Q}} = \{8; 8, 3, 1; 9, 3, 2\}$	$t_8^T = \{8; 23, 3, 1; 24, 3, 2\}$
$t_9^{\mathcal{Q}} = \{9; 7, 3, 1; 8, 3, 2\}$	$t_9^T = \{9; 22, 3, 1; 23, 3, 2\}$
$t_{10}^{\mathcal{Q}} = \{10; 6, 2, 1; 7, 3, 2\}$	$t_{10}^T = \{10; 26, 2, 2; 27, 3, 2\}$

При выполнении процедуры B_3 выявляются ошибки, обусловленные неверным подсоединением элемента b при сравнении множеств L^1 и L^2 для узлов 1 и 10 по несоответствию типов выводов (см. записи $t_1^{\mathcal{Q}}$ и t_1^T , $t_{10}^{\mathcal{Q}}$ и t_{10}^T). Ошибка, полученная от перемены мест элементов 5 и 10 , будет обнаружена в результате анализа узлов 5 и 7 по несоответствию типов элементов (см. записи $t_5^{\mathcal{Q}}$ и t_5^T , $t_7^{\mathcal{Q}}$ и t_7^T). Ошибка, допущенная при неверном соединении элементов 3 и 8 принципиальной схемы, не обнаруживается сравнением узлов в процедуре B_3 (см. записи $t_3^{\mathcal{Q}}$, t_3^T ; $t_8^{\mathcal{Q}}$, t_8^T ; $t_9^{\mathcal{Q}}$, t_9^T).

Рассмотрим действие процедуры B_4 для данно-

го примера. Пусть из записи $t_1^{\mathcal{Q}} \in T^{\mathcal{Q}}$ выбран элемент $l' = \{1, 1, 2\}$. Массив $T_l^{\mathcal{Q}}$ по условию (4) будет включать записи $t_1^{\mathcal{Q}}$ и $t_2^{\mathcal{Q}}$. Список номеров узлов N^* включает $N = 1$ и $N = 2$. В записях t_1^T , $t_2^T \in T^T$ имеются элементы $l_{11} = \{21, 1, 2\}$ и $l_{12} = \{31, 1, 2\}$; $l_{21} = \{21, 1, 1\}$ и $l_{22} = \{31, 1, 1\}$. Это означает, что принципиальная схема содержит два элемента одного типа, соединенные параллельно. Номеру $n' = 1$ может быть сопоставлен номер $n = 21$ или $n = 31$.

Выберем из записи $t_7^{\mathcal{Q}} \in T^{\mathcal{Q}}$ элемент $l' =$

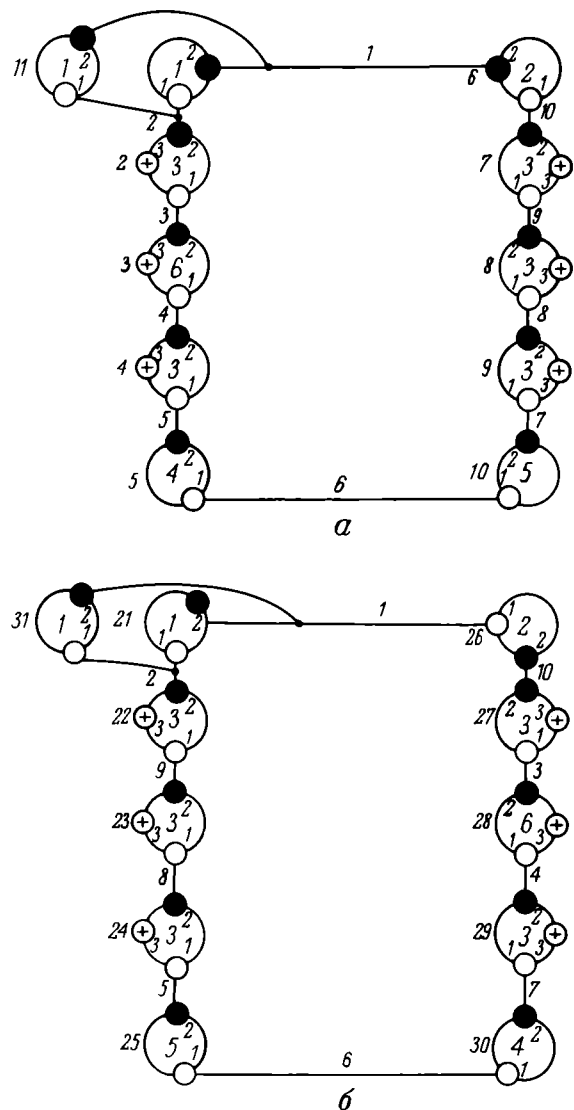


Рис.2. Электрические модели: а – исходная; б – восстановленная по топологии

$= \{ 9, 3, 1 \}$. Массив T_l^3 включает записи t_7^3 и t_8^3 , список N^* включает $N = 7, N = 8$. В записях $t_7^T, t_8^T \in T^T$ не существует элементов l , для которых выполнялось бы условие (5) ($l \neq \text{const}$).

Очевидно, многополосники (см. рис. 2) могут представлять собой модели не только элементов, но и фрагментов более высокого уровня. Это не влияет на справедливость алгоритма В, поскольку любой вывод многополюсника содержит информацию об имени элемента и типе его вывода.

Данный подход к решению задачи контроля ответственности топологии исходной принципиальной схеме может быть использован для контроля законченного варианта топологии, описанного по иерархическому принципу. В этом случае описанию каждого проводника должен соответствовать список L^1 . Контроль топологии должен проводиться пофрагментно по мере возрастания номера уровня в соответствии с структурой описания и с формированием электрических моделей Q^3 проверенных фрагментов. Последнее обстоятельство исключает необходимость обработки сразу всей топологической информации и делает возможным реализацию данного подхода на мини-ЭВМ.

Оценка качества проекта. Основным требованием к топологии является минимизация площади кристалла ИС, поэтому за критерий качества можно принять отношение полезной площади кристалла (занятой активными элементами и резисторами) к общей площади. Полезной площадью фрагмента считается площадь S_a контуров модели Q_a^T . В ряде случаев при проектировании фрагмента непрямоугольной формы трудно определить его общую площадь. Поэтому в системе должны быть предусмотрены следующие возможности: вычисление площади S_a контуров модели Q_a^T ; отношение площади S_a к площади S_k кристалла, введенной топологом; отношение площади S_a к площади S_T габаритной области Γ_0 фрагмента.

Предлагаемая интерактивная система синтеза топологии БИС в значительной степени упростит труд проектировщика и исключит этап предварительного вычерчивания топологии на бумаге, что

будет способствовать повышению качества проекта в целом. Достаточная простота формирования топологии фрагмента даст возможность разработчику просмотреть несколько возможных топологических решений. Систему синтеза топологии наиболее целесообразно, на наш взгляд, использовать при проектировании топологии биполярных БИС, хотя система и не имеет ограничений для БИС, выполняемых по другим технологиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глориозов Е.Л., Иванников А.Д., Сыпчук П.П. Автоматизация проектирования топологии интегральных схем. — "Обзоры по электронной технике. Сер.3. Микроэлектроника", 1976, вып.2.
2. Петренко А.И., Саватьев В.А., Цурин О.Ф., Бобовский В.В., Тетельбаум А.Я. Автоматизированная подсистема проектирования топологии БИС с использованием устройств графического взаимодействия. — "Управляющие системы и машины", 1974, № 5.
3. Оганесьянц Л.Г., Шепелев В.А. Подсистема графического редактирования топологии БИС. — "Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника", 1978, вып.4.
4. Ньюмен У., Спрулл Р. Основы интерактивной машинной графики. М., "Мир", 1976.

Статья поступила 10 июля 1978 г.

В.А.Шепелев

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ В ТОПОЛОГИИ БИС

Эвристический алгоритм, реализующий метод формирования ортогональных печатных проводников, обладает высоким быстродействием и малым потреблением памяти ЭВМ и предназначен для применения в системе, построенной на базе мини-ЭВМ и дисплеев с регенерацией изображения.

удк 621.3.049.77.002.72

В процессе интерактивного проектирования топологии БИС значительная часть времени затрачивается на построение соединительных проводников. Поэтому в развитой системе целесообразно

предусмотреть возможность автоматического формирования некоторого начального варианта проводника. Этот вариант может быть впоследствии доработан пользователем с помощью команд деформации контуров.

Рассмотрим постановку задачи формирования ортогональных печатных соединений [1].

Пусть Q_{ki} – некоторое множество выводов q_k элементов топологии, заданных их расположением, где $i = 1, 2, \dots, m$. Задача создания соединений между выводами $q_k \in Q_{ki}$ состоит в определении точной прокладки проводников, т.е. все выводы Q_{ki} должны быть электрически связаны между собой и ни один вывод элемента из множества Q_{ki} не должен иметь электрического соединения с каким-либо выводом из множества Q_{kj} , где $i \neq j$.

При интерактивном проектировании упрощается решение задачи построения соединений за счет исключения из нее следующих подзадач, решаемых в данном случае непосредственно пользователем: распределение соединений по слоям, упорядочение соединений.

Предлагаемый метод позволяет решать две другие подзадачи: определение списка соединений и трассировку проводников. В основу метода положено представление монтажной поверхности, не

занятой ранее проведенными проводниками и контурами Q_{ki} , в виде некоторого множества W геометрически не пересекающихся прямоугольных ячеек $w \in W$ (рис. 1). Ячейки w_1 и w_2 назовем соседними, если длина их общей границы Π составляет не менее $\delta = H + D$, где H и D – минимально допустимые расстояние между проводниками и ширина проводника.

Построим модель монтажной поверхности в виде графа $G(V, U)$, где V – множество вершин, U – множество ребер. Каждой вершине $v \in V$ сопоставим некоторую общую границу Π соседних ячеек или вывод $q_{ki} \in Q_{ki}$, представленный точкой (рис. 2). Две вершины v_1 и v_2 связаны ребром в том случае, если выполняются следующие условия:

$$-\Pi_1 \subset w_m (q_{1ki} \in w_m) \text{ и } \Pi_2 \subset w_m (q_{2ki} \in w_m);$$

– если Π_1 и Π_2 вертикальны или горизонтальны, то расстояние между ними должно быть не менее минимально допустимой ширины проводника. В противном случае область перекрытия Π_1 и Π_2 должна быть не менее δ .

Каждому ребру $u \in U$ сопоставим вес ω , зависящий от расстояния между общими границами и выводами, соответствующими инцидентным данному ребру вершинам.

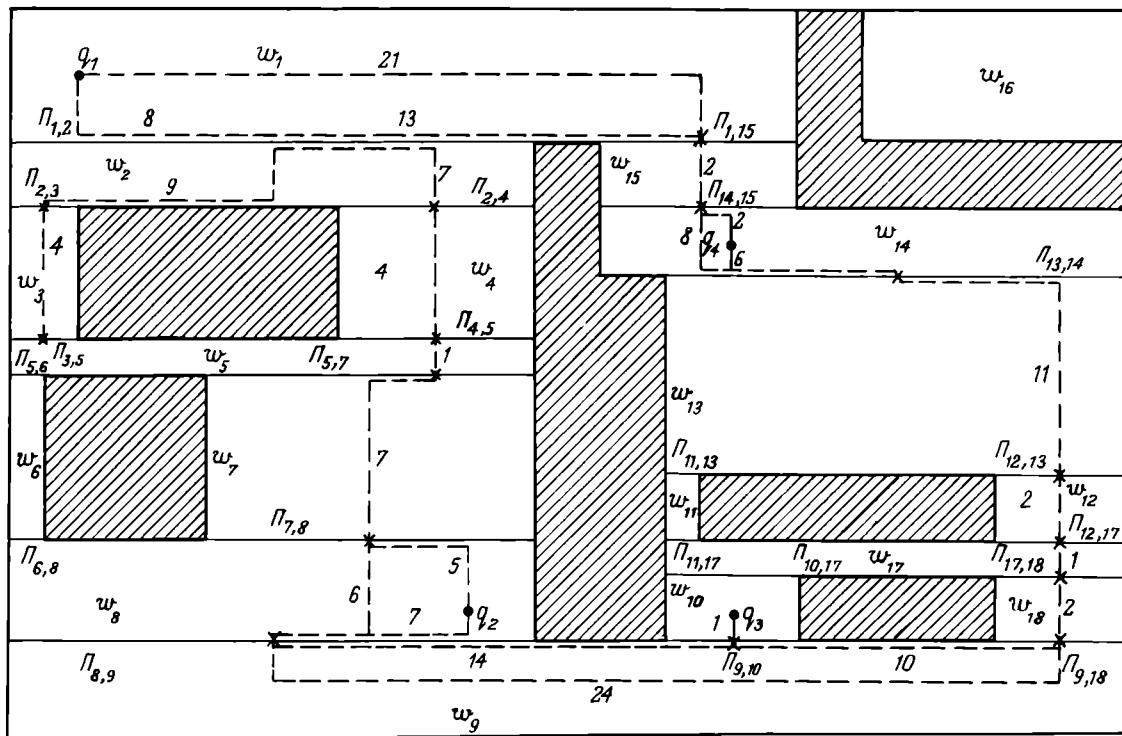


Рис. 1. Декомпозиция монтажной поверхности

Таким образом, задача построения соединения сведена к поиску кратчайшего дерева, связывающего вершины графа $G(V, U)$, соответствующие элементам множества Q_{ki} . Решить ее можно с помощью алгоритма Прима [2] или его модификации [3].

Получаемый результат (в виде дерева) зависит от способа декомпозиции монтажной поверхности, способа присвоения весов ω ребрам $u \in U$. Формирование множества ячеек W может производиться по известным алгоритмам подготовки информации для генераторов изображений. Среди них имеются алгоритмы, обладающие повышенным быстродействием [4]. Использование топологических моделей

Q_k^T и Q_M^T [5] при интерактивном проектировании даже сложных фрагментов гарантирует ограниченное число элементов множества W .

Рассмотрим алгоритм Z формирования соединительного проводника.

Процедура Z_1 : подготовка монтажной поверхности. Все ранее проведенные соединения выделяются в массив Q_M , после чего контуры $q_k \in Q_M$ соотносятся топологической модели Q_M^T . Полученный таким образом массив Q_M' объединяется с Q_M^T в массив Q_{M0}^T .

Процедура Z_2 : формирование W . Производится декомпозиция монтажной поверхности на прямоугольные ячейки $w \in W$.

Процедура Z_3 : формирование модели $G(V, U)$. Правила формирования модели монтажной поверхности описаны выше.

Процедура Z_4 : формирование дерева соедине-

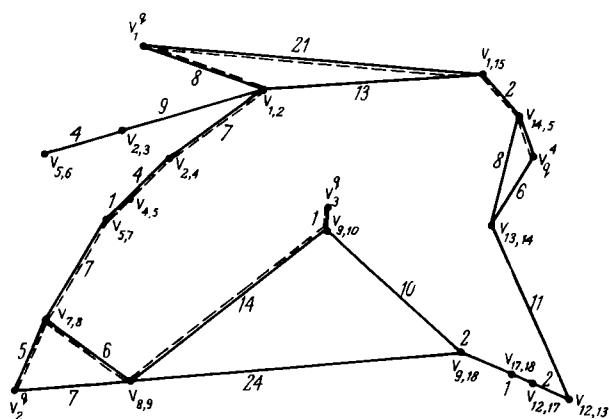


Рис. 2. Построение графа $G(V, U)$ и поиск минимального дерева*

ния $G'(V', U')$. В графе $G(V, U)$ отыскивается кратчайшее дерево, связывающее вершины $q_k \in Q_{ki}^T$.

Если не все вершины принадлежат одной компоненте связности, работа алгоритма заканчивается.

Процедура Z_5 : формирование средней линии соединения. Для формирования средней линии контура проводника примем правила соединения общих границ Π и вершин q_k в соответствии с

рис. 3. Сплошными толстыми линиями показаны соединения общих границ Π , расположенных на противоположных сторонах ячейки w (рис. 3, а), на смежных сторонах (рис. 3, б) и на одной стороне (рис. 3, в), а также соединение вершины q_k с Π (рис. 3, г).

На ранней стадии проектирования фрагмента при малой заполненности монтажной поверхности и близком расположении соединяемых вершин возможно попадание нескольких вершин q_k в пределы

одной ячейки w . В этом случае целесообразно формирование соединения таких вершин средствами параметрического формирования контуров по осевой линии, что не представляет трудностей. Сформированные таким образом части проводника объединяются с частями, сформированными автоматически, с помощью операции объединения контуров.

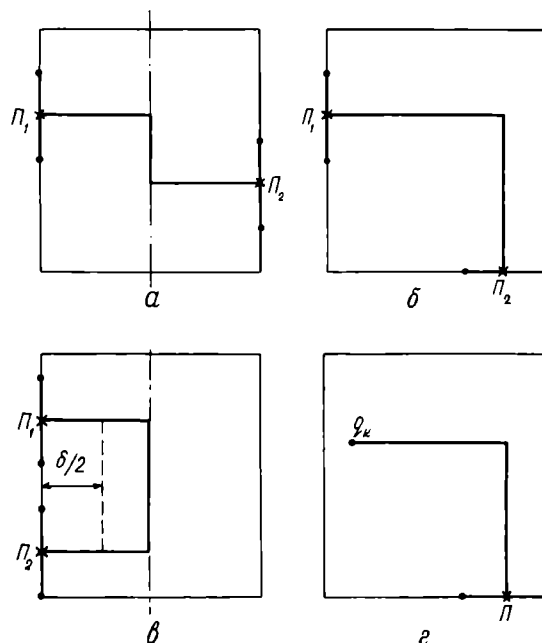


Рис. 3. Соединение общих границ ячеек и выводов элементов: а – общие границы расположены на противоположных сторонах ячейки; б – на смежных сторонах; в – на одной стороне; г – вершины соединены с общей границей

Процедура Z_6 : коррективная средняя линия. Производится проектировщиком с помощью операций деформации.

Процедура Z_7 : параметрическое формирование контура по средней линии.

Принцип работы алгоритма Z иллюстрируют рис. 1, 2. На рис. 1 показано монтажное поле после выполнения процедур Z_1, Z_2 . Контур $q_M \in Q_{M0}^T$

заштрихованы. Пунктиром даны линии, соответствующие ребрам графа $G(V, U)$. Рядом проставлены значения весов. Границы $\Pi_{5,6}, \Pi_{6,8}, \Pi_{11,13}, \Pi_{11,17}$ не участвуют в формировании модели $G(V, U)$, так как их длина меньше δ . Поскольку расстояние между $\Pi_{4,5}$ и $\Pi_{5,7}$ меньше δ , то вершина $v_{5,7}$ графа соответствует середине области перекрытия.

На графе $G(V, U)$ пунктирной линией выделено минимальное дерево (см. рис. 2).

На рис. 4, а показан результат выполнения алгоритма. Пунктирной линией показана средняя ли-

ния, полученная автоматически. Участки линий 2-7-8 и 11-12-13-15 скорректированы пользователем, и получены участки 3-8, 14-18. Из рисунка видно, что принцип равномерного заполнения монтажной поверхности во многих случаях дает результаты, нуждающиеся в корректировке. Поэтому целесообразно применять модификации алгоритма Z . Одна из модификаций позволяет формировать проводники, максимально "прижимающиеся" к контурам $q_M \in Q_{M0}^T$ (рис. 4, б).

Введем изменение в правило соединения общих границ, проиллюстрированное на рис. 3, в (пунктирная линия). В алгоритм Z введем процедуру Z'_4 - автоматическую корректировку средней линии. Для некоторого ребра $u \in U'$ переместим точки на общих границах Π , соответствующие $v_1, v_2 \in V'$, таким образом, чтобы расстояние между ними сократилось, а расстояние от каждой точки до границы составляло бы величину

$$\frac{\delta}{2} = \frac{H+D}{2}.$$

Вершины v_1 и v_2 помечаются. Про-

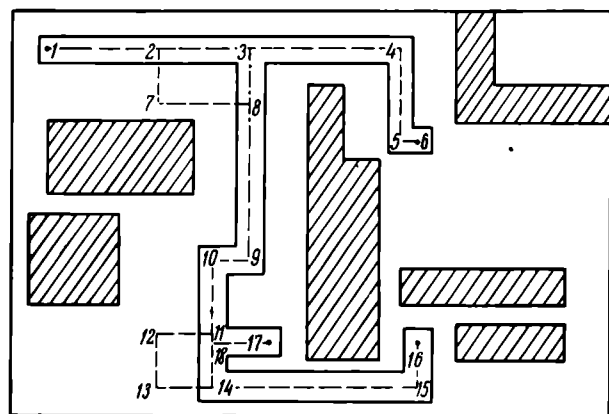
цесс повторяется для всех ребер смежных с $u \in U'$, до тех пор, пока множество U' не будет исчерпано. Перемещаются только точки, соответствующие непомеченным вершинам.

Контур металлизации, полученный в результате выполнения модифицированного алгоритма Z , показан на рис. 4, б. В качестве начального выбрано ребро $u(v_{8,3}, v_{9,10})$.

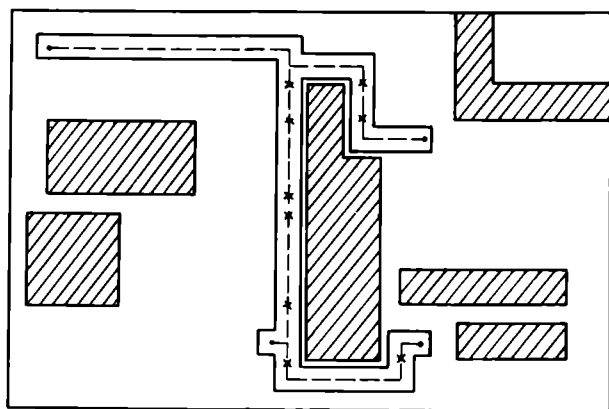
Рассмотренный алгоритм отличается от алгоритма Ли и его модификаций тем, что не требует представления монтажной поверхности в виде регулярной сетки. В результате сокращается требуемый объем ОЗУ ЭВМ и время построения проводника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреуэр М. А. Последние достижения в области автоматизации проектирования и анализа цифровых систем. - В кн.: Автоматизация в проектировании. М., "Мир", 1972.
2. Прим Р. К. Кратчайшие связывающие сети и некоторые обобщения. - "Кибернетический сборник", 1961, № 2.
3. Широ Г. Э., Лapidус Л. И. Метод трассировки печатных соединений. - В кн.: Применение вычислительных машин для проектирования цифровых устройств. М., "Сов. радио", 1968.
4. Широ Г. Э., Осипов Л. Б., Волков В. И. Параллельный быстродействующий алгоритм подготовки информации для микрофотонаборных установок. - "Электронная техника, Сер. 11. Комплексная микроминиатюризация радиоэлектронных устройств и систем", 1976, вып. 3.
5. Оганесьянц Л. Г., Шепелев В. А. Интерактивная система синтеза топологии БИС. - См. настоящий выпуск.



а



б

Рис. 4. Результат работы алгоритма: а - проводник построен по принципу равномерного заполнения поверхности; б - проводник "прижимается" к ранее построенным проводникам

Статья поступила 10 июля 1978 г.

Г.Э. Широ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В МИКРОСХЕМАХ

Предлагаемый метод обеспечивает высокое качество трассировки за счет реализации таких эффективных приемов ручного проектирования, как смещение или раздвижка ранее построенных проводников, переброска их через свободные контакты.

удк 681.3.06:621.3.049.75.001.63

Автоматизация проектирования соединений в интегральных схемах остается нерешенной задачей, несмотря на большой объем работ, проводимых в данном направлении. Это объясняется тем, что конструкция наиболее широко распространенных ИМС содержит, как правило, один слой металлизации, в котором должны быть проложены все соединительные проводники. Применение известных методов последовательной геометрической трассировки, основанных на алгоритме Ли [1], приводит к необходимости увеличения размеров кристалла по сравнению с проектированием вручную.

Для автоматизации проектирования соединений в ИМС представляется перспективным метод топологической трассировки, имитирующий высокоэффективные приемы ручного проектирования.

В основу метода топологической трассировки [2, 3], с успехом применяемого для трассировки многослойных печатных плат со сквозной металлизацией, положено топологическое задание трасс, т.е. задание с точностью до топологических понятий связности и плоской деформации. В пределах плоской деформации конфигурация проводников может многократно целенаправленно меняться для достижения высокой плотности трассировки. Это соответствует таким эффективным приемам ручного проектирования, как смещение, раздвижка, перенос трасс, "переброска" их через свободные контакты и т.п. Деформация трасс ог-

раничивается выводами элементов (транзисторов, диодов, резисторов), жестко закрепленных на кристалле при предварительном размещении.

Суть топологического метода трассировки заключается в разбиении поверхности печатной платы или слоя ИМС на крупные ячейки, ограниченные выводами элементов. Ячейки печатных плат с регулярным расположением выводов имеют квадратную или прямоугольную форму и образуют ортогональную сеть. Размеры ячейки могут достигать 15×15 элементарных дискретов Ли. Трассы проводников задаются с точностью до координат ячеек, через которые они проходят. Задание трасс внутри ячеек производится с помощью стандартных топологических моделей (СТМ) [3]. Для заданной пропускной способности ячейки p строим и храним в памяти ЭВМ полный набор возможных вариантов проложения всех допустимых проводников в ячейке. Пронумеровав СТМ, задаем состояние ячейки на каждом этапе проектирования номером соответствующей стандартной топологической модели, а плату в целом — набором номеров СТМ для всех ячеек. Процесс последовательного проложения проводников сводится к смене номеров СТМ в тех ячейках, через которые проводник проходит. Смена номеров СТМ сопровождается плоской деформацией ранее построенных конфигураций, которая обеспечивает проложение вновь строящегося проводника.

Анализируя состояние ячеек, окружающих каждый незадействованный вывод, можно в случае неравномерной их загрузки "перебросить" одну или более трасс через незадействованный вывод, поменяв номера СТМ в соответствующих ячейках.

ТОЧНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В ИМС

При применении топологического метода трассировки к печатным платам выбор ячеек и определение их пропускной способности не вызывает затруднений, так как все выводы имеют одинаковую простую форму (обычно круглую), четыре смежных вывода образуют ячейку, величина p измеряется по сторонам и диагоналям квадрата (прямоугольника). Все ячейки имеют одинаковые размеры, поэтому каждой СТМ можно поставить в соответствие один геометрический эквивалент, задающий точные координаты проводников в ячейке. Процесс преобразования топологического задания

платы как набора СТМ для ячеек в геометрическое задание, т.е. точные координаты проводников, сводится к привязке соответствующих геометрических эквивалентов к координатам ячеек.

Иначе обстоит дело в ИМС. Выводы элементов имеют различную форму, часто весьма сложную, существенно различаются по размерам (рис. 1), расположены на кристалле нерегулярно. Выбор ячеек и способа измерения их пропускной способности должен производиться по специально обоснованной процедуре. Усложняется также преобразование результатов топологической трассировки в геометрические координаты проводников. Поскольку форма и размеры ячеек получаются существенно различными, построение для каждой ячейки набора геометрических эквивалентов не представляется возможным.

Для удобства изложения алгоритмов, решающих поставленные задачи, введем следующие определения.

Исходная геометрическая модель (ИГМ) — точное геометрическое описание кристалла ИМС до трассировки, содержащее размеры кристалла и координаты точек изгиба (сопряжения) кривых, описывающих выводы элементов.

Исходная топологическая модель (ИТМ) — топологическое описание кристалла ИМС, позволяющее производить трассировку проводников топологическим методом. Каждому выводу элемента в ИТМ соответствует одна точка. Заданы ячейки и их пропускная способность.

Результирующая топологическая модель (ТМ) — результат топологической трассировки ИМС. Каждой ячейке поставлен в соответствие номер СТМ.

Результирующая геометрическая модель (ГМ) — точное геометрическое описание кристалла ИМС после трассировки, содержащее размеры кристалла и координаты точек изгиба (сопряжения) кривых, описывающих выводы элементов и проводники.

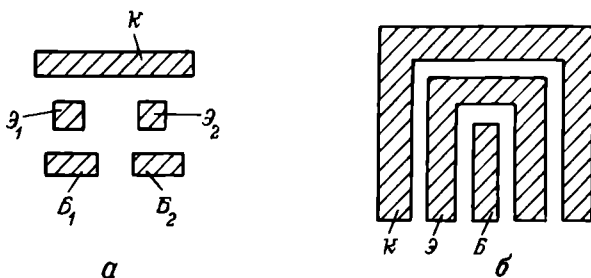


Рис. 1. Выводы биполярных транзисторов: а — двойного мощного, б — мощного

Процесс проектирования соединений в ИМС теперь можно представить в виде последовательности преобразований:

$$\text{ИГМ} \rightarrow \text{ИТМ} \rightarrow \text{ТМ} \rightarrow \text{ГМ}. \quad (1)$$

Рассмотрим пример (рис. 2), иллюстрирующий последовательность преобразования (1) в достаточно общем виде. Пусть в микросхеме, содержащей пять выводов (A, B, C, D, E), необходимо протрассировать соединения AC, DE . Если решать эту задачу геометрическим методом, то поверхность кристалла следует разбить на дискретные Ли, равные половине шага проложения проводников (рис. 2, а). Проводник AC , проложенный первым, блокирует вывод D и исключает возможность проложения проводника DE , хотя в принципе место для него есть. Достаточно деформировать проводник AC , сдвинув его вправо, чтобы получить решение (рис. 2, б) топологическим методом.

ПОСТРОЕНИЕ ИСХОДНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Процесс построения исходной топологической модели, т.е. преобразование ИГМ \rightarrow ИТМ представим в виде последовательности ряда процедур.

Процедура 1. Отыскание "узких мест" и их пропускных способностей. Выберем на выводе A произвольную точку a и на выводе B — точку σ так, чтобы соединяющий их отрезок $a\sigma$ не пересекал другие выводы (рис. 2, в). Перемещая точку a по A и точку σ по B , найдем такие положения точек, при которых отрезок $a^I\sigma^I$ имеет минимальную длину. Найденный критический отрезок $a^I\sigma^I$ задает "узкое место" между выводами A и B , а его длина, измеренная максимально допустимым числом прокладываемых проводников, равняется пропускной способности "узкого места". Повторив процедуру 1 для других начальных точек a и σ , сможем для сложных выводов получить два и более "узких места". В нашем примере выводы A и B имеют "узкие места" $a^I\sigma^I$ и $a^{II}\sigma^{II}$ с пропускной способностью $p(a^I\sigma^I) = 1$, $p(a^{II}\sigma^{II}) = 3$. Повторив процедуру 1 для всех возможных пар выводов, получим множество "узких мест" ИГМ. Граница кристалла F при этом рассматривается как бесконечный вывод, т.е. вывод с бесконечной поверхностью. Некоторые пары выводов, например

$= \{ 9, 3, 1 \}$. Массив T_l^3 включает записи t_7^3 и t_8^3 , список N^* включает $N = 7, N = 8$. В записях $t_7^T, t_8^T \in T^T$ не существует элементов l , для которых выполнялось бы условие (5) ($n \neq \text{const}$).

Очевидно, многополосники (см. рис. 2) могут представлять собой модели не только элементов, но и фрагментов более высокого уровня. Это не влияет на справедливость алгоритма В, поскольку любой вывод многополосника содержит информацию об имени элемента и типе его вывода.

Данный подход к решению задачи контроля ответственности топологии исходной принципиальной схеме может быть использован для контроля законченного варианта топологии, описанного по иерархическому принципу. В этом случае описанию каждого проводника должен соответствовать список L^1 . Контроль топологии должен проводиться пофрагментно по мере возрастания номера уровня в соответствии с структурой описания и с формированием электрических моделей Q^3 проверенных фрагментов. Последнее обстоятельство исключает необходимость обработки сразу всей топологической информации и делает возможным реализацию данного подхода на мини-ЭВМ.

Оценка качества проекта. Основным требованием к топологии является минимизация площади кристалла ИС, поэтому за критерий качества можно принять отношение полезной площади кристалла (занятой активными элементами и резисторами) к общей площади. Полезной площадью фрагмента считается площадь S_a контуров модели Q_a^T . В ряде случаев при проектировании фрагмента непрямоугольной формы трудно определить его общую площадь. Поэтому в системе должны быть предусмотрены следующие возможности: вычисление площади S_a контуров модели Q_a^T ; отношение площади S_a к площади S_k кристалла, введенной топологом; отношение площади S_a к площади S_T габаритной области Γ_0 фрагмента.

Предлагаемая интерактивная система синтеза топологии БИС в значительной степени упростит труд проектировщика и исключит этап предварительного вычерчивания топологии на бумаге, что

будет способствовать повышению качества проекта в целом. Достаточная простота формирования топологии фрагмента даст возможность разработчику просмотреть несколько возможных топологических решений. Систему синтеза топологии наиболее целесообразно, на наш взгляд, использовать при проектировании топологии биполярных БИС, хотя система и не имеет ограничений для БИС, выполняемых по другим технологиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глориозов Е.Л., Иванников А.Д., Сыпчук П.П. Автоматизация проектирования топологии интегральных схем. — "Обзоры по электронной технике. Сер.3. Микроэлектроника", 1976, вып.2.
2. Петренко А.И., Саватьев В.А., Цурин О.Ф., Бобовский В.В., Тетельбаум А.Я. Автоматизированная подсистема проектирования топологии БИС с использованием устройств графического взаимодействия. — "Управляющие системы и машины", 1974, № 5.
3. Оганесьянц Л.Г., Шепелев В.А. Подсистема графического редактирования топологии БИС. — "Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника", 1978, вып.4.
4. Ньюмен У., Спрулл Р. Основы интерактивной машинной графики. М., "Мир", 1976.

Статья поступила 10 июля 1978 г.

В.А.Шепелев

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ В ТОПОЛОГИИ БИС

Эвристический алгоритм, реализующий метод формирования ортогональных печатных проводников, обладает высоким быстродействием и малым потреблением памяти ЭВМ и предназначен для применения в системе, построенной на базе мини-ЭВМ и дисплея с регенерацией изображения.

УДК 621.3.049.77.002.72

В процессе интерактивного проектирования топологии БИС значительная часть времени затрачивается на построение соединительных проводников. Поэтому в развитой системе целесообразно

предусмотреть возможность автоматического формирования некоторого начального варианта проводника. Этот вариант может быть впоследствии доработан пользователем с помощью команд деформации контуров.

Рассмотрим постановку задачи формирования ортогональных печатных соединений [1].

Пусть Q_{ki} – некоторое множество выводов q_k элементов топологии, заданных их расположением, где $i = 1, 2, \dots, m$. Задача создания соединений между выводами $q_k \in Q_{ki}$ состоит в определении точной прокладки проводников, т.е. все выводы Q_{ki} должны быть электрически связаны между собой и ни один вывод элемента из множества Q_{ki} не должен иметь электрического соединения с каким-либо выводом из множества Q_{kj} , где $i \neq j$.

При интерактивном проектировании упрощается решение задачи построения соединений за счет исключения из нее следующих подзадач, решаемых в данном случае непосредственно пользователем: распределение соединений по слоям, упорядочение соединений.

Предлагаемый метод позволяет решать две другие подзадачи: определение списка соединений и трассировку проводников. В основу метода положено представление монтажной поверхности, не

занятой ранее проведенными проводниками и контурами Q_{ki} , в виде некоторого множества W геометрически не пересекающихся прямоугольных ячеек $w \in W$ (рис. 1). Ячейки w_1 и w_2 назовем соседними, если длина их общей границы Π составляет не менее $\delta = H + D$, где H и D – минимально допустимые расстояние между проводниками и ширина проводника.

Построим модель монтажной поверхности в виде графа $G(V, U)$, где V – множество вершин, U – множество ребер. Каждой вершине $v \in V$ сопоставим некоторую общую границу Π соседних ячеек или вывод $q_{ki} \in Q_{ki}$, представленный точкой (рис. 2). Две вершины v_1 и v_2 связаны ребром в том случае, если выполняются следующие условия:

$$-\Pi_1 \subset w_m(q_{1ki} \in w_m) \text{ и } \Pi_2 \subset w_m(q_{2ki} \in w_m);$$

– если Π_1 и Π_2 вертикальны или горизонтальны, то расстояние между ними должно быть не менее минимально допустимой ширины проводника. В противном случае область перекрытия Π_1 и Π_2 должна быть не менее δ .

Каждому ребру $u \in U$ сопоставим вес ω , зависящий от расстояния между общими границами и выводами, соответствующими инцидентным данному ребру вершинам.

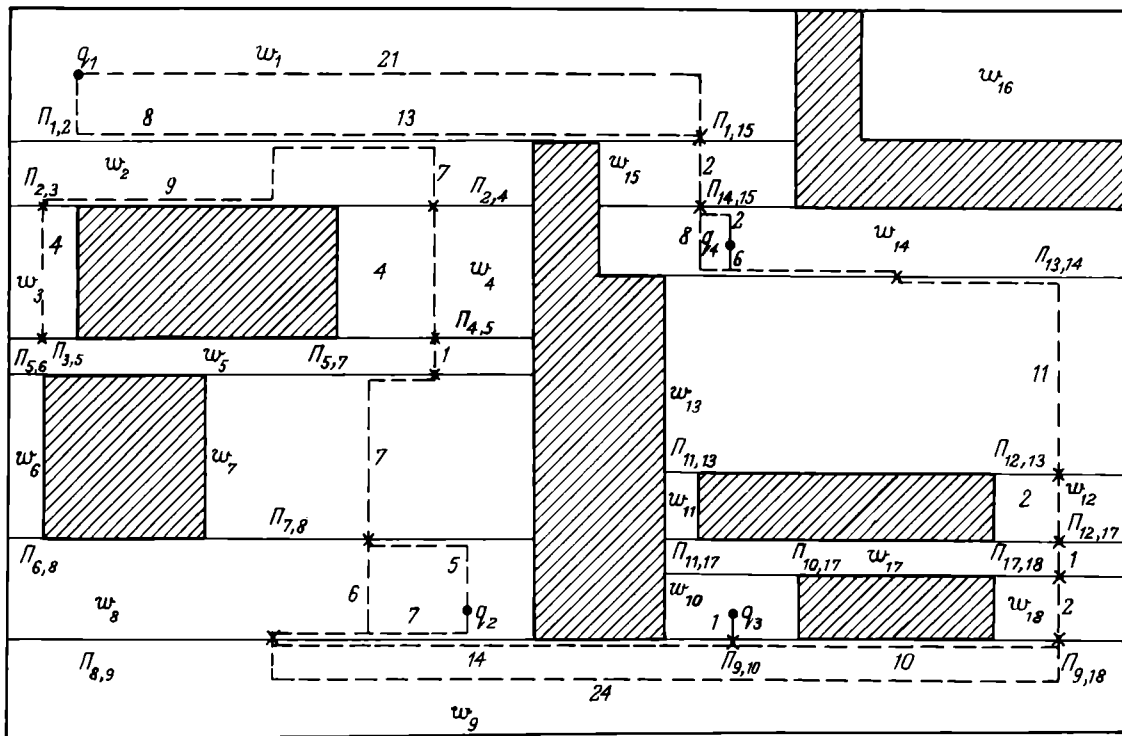


Рис. 1. Декомпозиция монтажной поверхности

А и D, не имеют ни одного "узкого места," поскольку выполнение процедуры 1 для них невозможно.

Процедура 2. Исключение несущественных "узких мест". Пусть вывод А имеет с выводами В и С "узкие места" $a^I \sigma^I, ac$, а выводы В и С — узкое место $\sigma^I c^I$. При этом для пропускных способностей $p(a^I \sigma^I), p(ac), p(\sigma^I c^I)$ выполняется соотношение:

$$p(ac) \geq p(a^I \sigma^I) + p(\sigma^I c^I) + 1. \quad (2)$$

В этом случае "узкое место" ac можно исключить как несущественное, в нашем примере

$4 > 1 + 1 + 1$. Действительно, как видно из рис. 2, в, через отрезок ac в самом сложном случае может пройти лишь три проводника: через отрезок $a^I \sigma^I$, через отрезок $\sigma^I c^I$ и исходящий от вывода Е. Но пропускная способность $p(ac) = 4$, следовательно, отрезок ac не может быть "узким местом" ни в одном варианте трассировки.

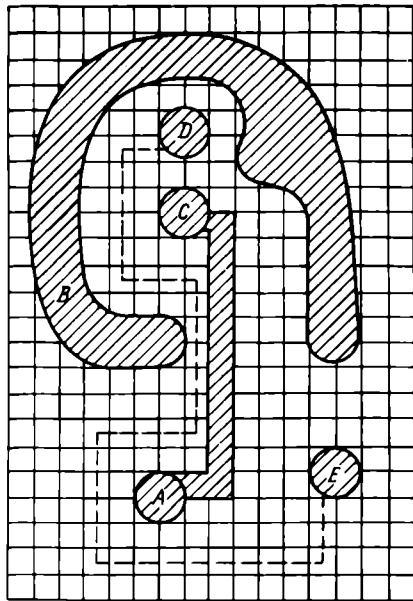
Применяя процедуру 2 для всех возможных выводов, исключаем все несущественные "узкие места". В нашем примере вычеркнуты отрезки $ac, a^II f^II, ae$.

Поскольку из бесконечного вывода F не может исходить ни одного проводника, то пропускная способность

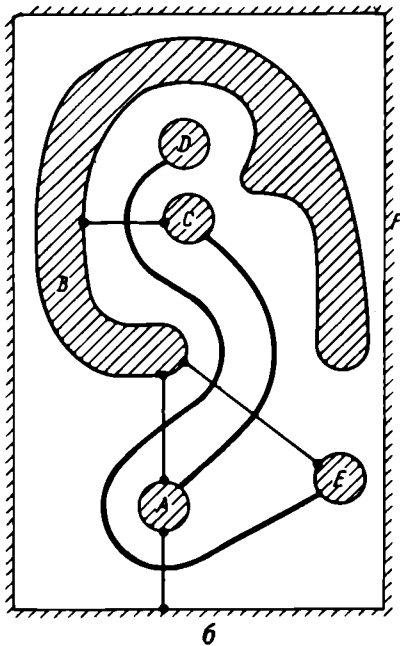
$$p(fe) \geq p(fe) + p(\sigma^{II} e^{II}). \quad (3)$$

В данном примере "узкое место" fe исключается ($1 \geq 0 + 1$). После применения процедуры 2 осталось 10 существенных "узких мест": $a^I b^I, a^{II} b^{II}, a^I f^I, b^I c^I, b^{II} c^{II}, bd, b^I e^I, b^{II} e^{II}, bf, cd$, (см. рис. 2, в). В разрывах отрезков проставлены значения пропускных способностей.

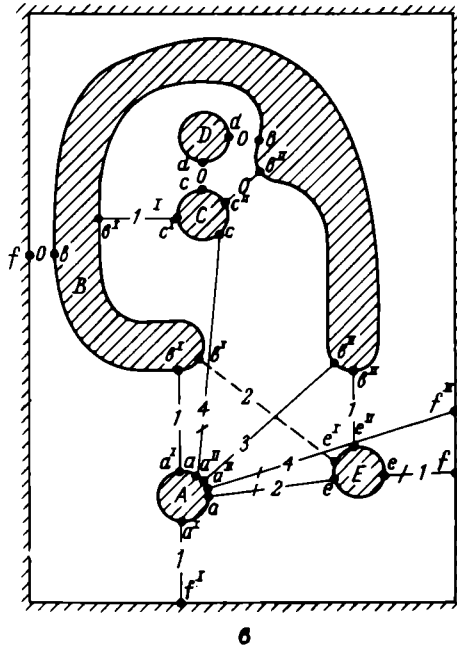
Процедура 3. Исключение пересечений критических отрезков. Как видно из рис. 2, в, критические отрезки, задающие некоторые "узкие места",



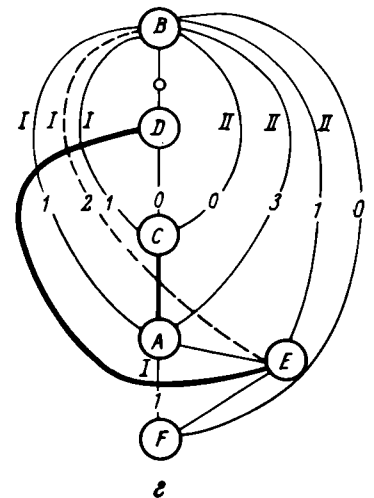
a



б



в



г

Рис. 2. Сравнение результатов трассировки соединений: а — геометрическим; б — топологическим методом; в — определение "узких мест"; г — построение исходной топологической модели

могут пересекаться, например $a^{\text{II}}e^{\text{II}}$ и $e^{\text{I}}e^{\text{I}}$. Исключим (но запомним) один из пересекающихся критических отрезков $e^{\text{I}}e^{\text{I}}$. Повторив процедуру 3 для всех отрезков, получим плоский граф (см. рис. 2, σ).

Процедура 4. Стягивание выводов в точки. В полученном графе стянем в точки грани, соответствующие выводам A, B, C, D, E, F , оставив остальные грани неизменными. Получим граф (рис. 2, ι), множество вершин которого соответствует множеству выводов ИГМ, а ребра — критическим отрезкам, т.е. "узким местам" ИГМ. Каждому ребру поставлена в соответствие пропускная способность.

Процедура 5. Разбиение граней графа на трехвершинные. Введением ребер AC, AE, EF (рис. 2, ι) делаем все грани, в том числе бесконечную, трехвершинными. Для введенных ребер не заданы пропускные способности, поскольку соответствующие им отрезки не являются критическими.

Процедура 6. Расчленение графа на треугольники. Представим граф (см. рис. 2, ι) в виде набора его граней, изобразив каждую грань треугольником (рис. 3, a). Поставим в соответствие каждой грани номер или начальный адрес массива информации в памяти машины $A1-A8$. Пронумеруем ребра граней цифрами 1-3 в направлении по часовой стрелке. Так, для грани ABC , хранящейся по адресу $A1$, ребра AB, BC и CA получают номера 1, 2, 3. Связь идентичных ребер для двух смежных граней зададим взаимными адресными ссылками.

Например, ребро BC грани $A1$ имеет ссылку $A2/1$, а это же ребро грани $A2$ — ссылку $A1/2$. Бесконечная грань FBA на рис. 3, a изображена "вывернутой" по сравнению с рис. 2, ι , что достигается сменой направления обхода. Каждому ребру треугольника, соответствующему "узкому месту", поставлена в соответствие пропускная способность.

Процедура 7. Задание проверяемых критических отрезков. Каждый пересекающийся критический отрезок, исключенный процедурой 3, зададим парой цепей, заключающих его в цикл минимальной длины. Для нашего примера исключенный отрезок $e^{\text{I}}e^{\text{I}}$ зададим парой цепей: $EAB, BCBE$ (рис. 3, b). Прохождение проводника в "узком месте" $e^{\text{I}}e^{\text{I}}$ фиксируем в момент пересечения им цепей $EAB, BCBE$.

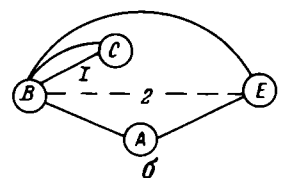
Полученный в результате проведения процедур 1-7 набор треугольных ячеек $A1-A8$ (см. рис. 3, a) и проверяемых критических отрезков (см. рис. 3, b) является ИТМ, позволяющей далее осуществлять трассировку топологическим методом.

Из рассмотренного примера видно преимущество предлагаемой ИТМ перед разбиением поверхности ИМС на дискеты Ли: восьми ячейкам модели (см. рис. 3) соответствует $17 \times 23 = 391$ дискрет Ли (см. рис. 2, a), т.е. в среднем по 49 дискретов на ячейку. Как показано в работе [3], это существенно сказывается на быстродействии алгоритма трассировки.

Адрес	A1	A2	A3	A4
Ячейка ИТМ				
Адрес	A5	A6	A7	A8
Ячейка ИТМ				

a

Рис. 3. Представление ИТМ в памяти машины: a — ячейки ИТМ, b — проверяемые критические отрезки



b

ПОСТРОЕНИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Построение результирующей топологической модели, т.е. преобразования ИГМ → ТМ производится с помощью алгоритма топологической трассировки [3]. Ограничимся иллюстрацией его работы на рассматриваемом примере. Воспользуемся набором стандартных топологических моделей для треугольных ячеек. Число типов СТМ связано с пропускной способностью ячеек зависимостью, близкой к кубической, и составляет $N = 33$ при $p = 3$ [3]. Для решения рассматриваемого примера ограничимся начальной частью набора СТМ (рис. 4). Нулевая конфигурация $N0$ набора СТМ свидетельствует о том, что в данной ячейке не проложено ни одного проводника. Следовательно, в ИГМ все ячейки $A1-A8$ содержат $N0$. Построение первого проводника AC сводится к соединению вершин A и C в ячейках $A1$ и $A4$. Это означает, что в данные ячейки записывается СТМ $N1$ (рис. 5, а). Второй проводник DE проходит через ячейки $A2, A1, A8$ и $A7$. При этом в данные ячейки записываются соответствующие СТМ. В процессе построения проверяется пропускная способность "узких мест", через которые проходят проводники: AC — через $\sigma^1 e^1$, DE — через $\sigma^1 c^1, \sigma^1 e^1, \sigma^1 a^1, a^1 f^1$. Как видно из рис. 3, пропускная способность этих "узких мест" достаточна, следовательно, указанное построение допустимо.

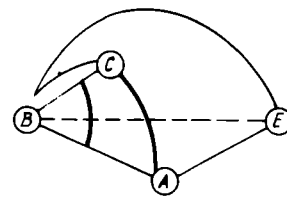
На рис. 5 изображена результирующая ТМ, в

Номер СТМ	$N0$	$N1$	$N2$	$N3$	$N4$	$N5$	$N6$
Конфигурация							

Рис. 4. Набор стандартных топологических моделей

Адрес		$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$
Ячейка ТМ	Номер СТМ	$N5(0^\circ)$	$N3(240^\circ)$	$N0(0^\circ)$	$N1(0^\circ)$	$N0(0^\circ)$	$N0(0^\circ)$	$N3(240^\circ)$	$N2(240^\circ)$
	Конфигурация								

а



б

Рис. 5. Представление результирующей ТМ в памяти машины: а — содержимое ячеек, б — пересечения проверяемых критических отрезков

чем легко убедиться, если содержимое треугольников из рис. 5, а перенести на граф рис. 2, г.

ПОСТРОЕНИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Преобразование ТМ → ГМ выполним с помощью двух процедур.

Процедура 8. Разметка "узких мест". В соответствии с ТМ выделим в ИГМ "узкие места", не пересекаемые проводниками, и разметим точки пересечения. Для "узких мест" $\sigma^1 c^1$ и $a^1 f^1$ пропускная способность точно равна числу проложенных проводников, поэтому разметка выполняется однозначно. Для "узких мест" $\sigma^1 a^1, \sigma^1 e^1$ возможна неоднозначность, поэтому выбирается любой допустимый вариант разметки (см. рис. 2, б).

Процедура 9. Соединение размеченных точек. Для каждого проводника соединяем соответствующие ему точки разметки с помощью кривых-эквидистант с выводами и отрезками прямых, касательных к ним. Точки разметки, заданные процедурой 8 неоднозначно, могут при этом смешаться (см. рис. 2, б).

Очевидно, что выполнение процедур 8 и 9 всегда возможно и, следовательно, ТМ, полученная на предыдущих этапах построения, гарантированно преобразуется в искомую результирующую ГМ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Алгоритм топологической трассировки запрограммирован для ЭВМ ЕС-1033 и находится в стадии промышленной эксплуатации в составе системы АСП-53 автоматического проектирования многослойных печатных плат регулярной конструкции [4]. Программа позволяет трассировать электрические схемы, содержащие до 12000 выводов. Максимальное время трассировки схемы состав-

ляет 8 ч. Настройка программы на нерегулярные конструкции с помощью введения адресных ссылок снизит максимальный объем исходной электрической схемы до 9000 выводов (порядка 3000 транзисторов) и увеличит время трассировки ориентировочно до 9 ч. Это означает, что программа применима для трассировки БИС.

Процедуры преобразования ТМ → ГМ реализованы в системе АСП-53 в расчете на координатографы с фотоголовкой ЭМ-538, М-2005, позволяющие проводить линии на фотошаблоне под углом, кратным 45°. Объем оперативной памяти, необходимый для работы этой программы, и время работы пренебрежимо малы по сравнению с программой топологической трассировки.

Процедуры преобразования ИГМ → ИТМ не запрограммированы, и в процессе экспериментального проектирования топологии ИМС выполнялись вручную. В случае выпуска ряда схем на одном базовом кристалле, а также при индивидуальном проектировании ИМС малой степени интеграции это оправдано, однако для СИС и БИС процедуры подготовки ИТМ должны быть запрограммированы.

Для реализации процедуры 1 может быть использован алгоритм Ли, позволяющий определить "узкие места" как кратчайшие пути между выводами. Реализация процедур 2-7 вытекает непосредственно из их формулировки и затруднений не вызывает.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

метод топологической трассировки применим для проектирования соединений в ИМС с однослойной металлизацией; его эффективность обусловлена использованием приемов ручного проектирования — целенаправленного смещения, раздвижки, деформации ранее построенных проводников, переброски их через незадействованные контакты;

опыт промышленной эксплуатации программы топологической трассировки в составе системы АСП-53 проектирования многослойных печатных плат, а также экспериментальное проектирование ИМС показывают, что с помощью этой программы можно в приемлемое время трассировать на ЭВМ ЕС-1033 схемы с уровнем интеграции до 3000 транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee C.V. An algorithm for path connections and its applications. — "IRE Trans. on Electronic Comp.", 1961, vol. EC-10, N 3.

2. Широ Г.Э. Метод проектирования печатного монтажа, основанный на эвристических принципах. — В кн.: Методы разработки схем и конструкций цифровых систем. Ч. 2. ЛДНТП, 1967.

3. Широ Г.Э., Ревинский В.Г. Трассировка соединений с использованием стандартных топологических моделей. — "Электронная техника. Сер. 11", 1976, вып. 3.

4. Лошаков В.И., Широ Г.Э., Осипов Л.Б., Брускин Г.И. Системы машинного проектирования топологий изделий электронной техники. — "Электронная техника. Сер. 10", 1977, вып. 6.

Статья поступила 3 мая 1978 г.

Л. Г. Оганесянц, Т. М. Попова,
В. А. Шепелев

ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ПОЛНОГО КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ БИС

Используя интерактивную систему, построенную на базе мини-ЭВМ, можно визуально и программно контролировать на экране дисплея топологию любой сложности, описанную на языке высокого уровня. Оперативность контроля обеспечена за счет сортировки данных в процессе трансляции.

УДК 621.3.049.771.14:681.3.06

Одной из основных задач при разработке и построении автоматизированных систем проектирования фотошаблонов является создание средств контроля топологии БИС. Двухуровневые системы, базирующиеся на большой и малой ЭВМ, несмотря на свои достоинства, обладают существенным недостатком — малой оперативностью. Большая ЭВМ является машиной общего пользования, на которой при большом потоке задач невозможно организовать оперативный режим. Задачи же контроля топологии и внесения в нее необходимых изменений требуют от системы большой оперативности и максимальных удобств для пользователя. В противном случае отладка топологий, содержащих десятки и сотни тысяч компонентов, практически невозможна.

Для отладки фрагментов топологий БИС разработана и успешно эксплуатируется интерактив-

ная диалоговая система [1–3], построенная на базе мини-ЭВМ, графических и символьных дисплеев и НМД. Такая система обладает высокой оперативностью, поскольку все ресурсы мини-ЭВМ отданы одному или двум пользователям и для обработки данных используется только ОЗУ ЭВМ. Время отклика системы составляет от нескольких секунд (при работе с простейшими программами: синтаксического контроля, проверки на острые углы и т.п.) до 1–2 мин (при работе с программами проверки технологических допусков для сложных слоев). Недостаток системы — ограниченный объем ОЗУ мини-ЭВМ, как правило, не позволяет проконтролировать часть топологии, расположенную на стыке крупных фрагментов.

Рассмотрим принципы построения и основные алгоритмы новой версии интерактивной системы контроля, позволяющей осуществить анализ любой части топологии.

Представление исходных данных. Для описания топологии в автоматизированных системах применяются специализированные языки высокого уровня, позволяющие представить топологию как набор фрагментов, входящих друг в друга с некоторыми точками привязки. Таким образом, полное позиционное описание топологии координатами угловых точек контуров отображается в компактное иерархическое представление на языке. Язык высокого уровня позволяет значительно сокращать входную информацию, а также облегчает решение задач автоматизированного синтеза топологии.

Однако неудачное обратное отображение (трансляция) иерархических данных в позиционные может привести к значительным затруднениям при решении задач геометрического контроля и вывода информации для генератора изображений (ГИ). В частности, при трансляции фрагментов нижнего уровня по дереву ссылок может оказаться, что координатные описания контуров, расположенных в различных частях чертежа, будут записаны в одном месте позиционного массива и наоборот. Поэтому при разработке трансляторов целесообразно руководствоваться принципом, изложенным ниже.

Трансляция с языка описания топологии.

Принцип трансляции. Трансляция с языка описания топологии должна проводиться при сохранении подобия структуры записи информации в памяти ЭВМ с геометрической структурой чертежа. Иными словами, контуры топологии, расположенные "близко" геометрически, должны быть расположены "близко" в памяти ЭВМ. Добиться полного подобия

невозможно даже при наличии двумерного носителя памяти из-за неопределенности понятия геометрической "близости" контуров (для нерегулярно расположенных, различной протяженности и т.п.).

Рассмотрим один из возможных принципов получения "упорядоченной" геометрической информации, не касаясь оптимальной записи ее в память ЭВМ. Пусть мы имеем конечное множество контуров M , расположенных в некоторой прямоугольной области P , и его текстовое описание, представляющее собой совокупность эталонов с их точками привязки. Требуется построить отображение текстового описания в графическое таким образом, чтобы по возможности удовлетворить принципу трансляции.

Алгоритм Т такого отображения может быть следующим.

Процедура Т1. Нанесем на прямоугольник P некоторую регулярную сетку с элементарной ячейкой p_i . Тогда каждая ячейка будет содержать некоторое подмножество m_i контуров M или их частей.

Процедура Т2. Из полного дерева ссылок D , описывающего всю топологию, выделим "усеченное" дерево d_i ссылок, включив в него лишь те фрагменты, которые полностью или частично входят в ячейку p_i .

Процедура Т3. После получения всех "усеченных" деревьев переходим к их трансляции, считая, что внутри каждой элементарной ячейки порядок записи каждого контура безразличен.

Для упрощения работы алгоритма и ускорения его быстрого действия предварительно обрабатывается дерево ссылок всей топологии, в результате которой фрагменты получают свои габаритные размеры (т.е. вычисляется и приписывается каждому фрагменту информация о минимальном прямоугольнике, которому принадлежит фрагмент).

"Усеченное" дерево ссылок выделяется по принадлежности габарита фрагмента или его частичного пересечения с заданным прямоугольником. Информация о контурах, содержащаяся в ячейке топологии после трансляции, состоит из контуров, целиком лежащих в ячейке, или части контура, обрезанного границами ячейки. Причем точки разреза контура помечаются специальным образом (как точки слияния), чтобы сделать возможным получение полных контуров после работы программы слияния.

Достоинство алгоритма трансляции заключается не только в соблюдении принципа трансляции, но и в

возможности вести обработку больших объемов графической информации при ограниченном объеме оперативной памяти ЭВМ, так как выход на уровень графического описания происходит на последнем этапе работы алгоритма. Основная работа ведется с текстовым описанием топологии, которое во много раз меньше графического. При этом размеры ячейки p_i заранее могут быть выбраны такими, чтобы объем содержащейся в ней информации не превосходил объема выделенной оперативной памяти ЭВМ.

Так как при работе алгоритма приходится неоднократно обращаться к обработке исходного дерева ссылок для получения усеченных деревьев d_i , то необходимо свести время обработки дерева к минимуму. Этого, как нам кажется, можно достичь, если учесть свойства преобразований, которые выполняются над точками контуров. Действительно, каждая точка контура (в составе фрагмента) подвергается сдвигу (изменению точки привязки), ряду преобразований \vec{S} типа поворота и зеркального отражения относительно осей. Иными словами, для точки с координатами x, y новые координаты \bar{x}, \bar{y} после перехода на один уровень по дереву ссылок вычисляются по формуле

$$\vec{P}(\bar{x}, \bar{y}) = \vec{r}_0 + \vec{S}_i(x, y),$$

где $\vec{r}_0 = \{x_0, y_0\}$ — вектор, проведенный в точку привязки, \vec{S}_i — ориентация, т.е. одно из преобразований из таблицы.

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
x	x	$-x$	$-x$	y	y	$-y$	$-y$
y	$-y$	y	$-y$	x	$-x$	x	$-x$

Нетрудно проверить, что множество преобразований \vec{S} обладает следующими свойствами:

$$\vec{S}_i(\vec{S}_j(x, y)) = \vec{S}_k(x, y), \quad (1)$$

$$\vec{S}_i(x_1 + x_2, y_1 + y_2) = \vec{S}_i(x_1, y_1) + \vec{S}_i(x_2, y_2),$$

где $\vec{S}_i, \vec{S}_j, \vec{S}_k \in \vec{S}$.

Предположим, что имеется последовательность вложенных фрагментов: $\mathcal{E}^{(k)}, \mathcal{E}^{(k-1)}, \dots, \mathcal{E}^{(1)}, \mathcal{E}^{(0)}$, т.е. $\mathcal{E}^{(k)}$ вложен в $\mathcal{E}^{(k-1)}$ с точкой привязки $\vec{r}^{(k-1)}$ и ориентацией $\vec{S}_{i_{k-1}}$, который в свою очередь вло-

жен в $\mathcal{E}^{(k-2)}$ с точкой привязки $\vec{r}^{(k-2)}$ и ориентацией $\vec{S}_{i_{k-2}}$ и т.д. Тогда координаты произвольной

точки $\vec{r} = (x, y)$, принадлежащей фрагменту $\mathcal{E}^{(k)}$ относительно осей координат фрагмента $\mathcal{E}^{(0)}$, вычисляются по формуле:

$$\vec{P}(\bar{x}, \bar{y}) = \vec{r}^{(0)} + \vec{S}_{i_0}(\vec{r}^{(1)}) + \vec{S}_{i_0}(\vec{S}_{i_1}(\vec{r}^{(2)})) + \dots + \vec{S}_{i_0}(\dots(\vec{S}_{i_{k-2}}(\vec{r}^{(k-1)}))) + \vec{S}_{i_0}(\dots(\vec{S}_{i_{k-1}}(\vec{r})))$$

или, окончательно используя свойства (1), получим

$$\vec{P}(\bar{x}, \bar{y}) = \vec{r}^{(0)} + \vec{S}_{j_1}(\vec{r}^{(1)}) + \dots + \vec{S}_{j_{k-1}}(\vec{r}^{(k-1)}) + \vec{S}_{j_k}(\vec{r}),$$

где \vec{S}_{j_k} — преобразование, являющееся произведением нескольких преобразований.

Отсюда легко построить алгоритм преобразований координат контура при переходе с нижнего уровня дерева ссылок на уровень самого верхнего по дереву ссылок (головного) фрагмента: достаточно на каждом шаге получать новые точки привязки и одно преобразование (как произведение двух заданных преобразований) над точками контуров и только на уровне головного фрагмента провести это преобразование над всеми координатами точек контуров.

Алгоритмы разрезания и слияния контуров.

Алгоритм R разрезания контуров, связанный с процессом трансляции. Предназначен для формирования информации о контурах топологии для каждой ячейки p_i (или для их совокупности, что определяется оптимальным использованием оперативной памяти ЭВМ).

В результате обработки транслятором дерева ссылок d_i формируется множество контуров, которые являются входной информацией для алгоритма R.

Итак, пусть имеется описание контура $K = \{k_j\}$, заданного координатами угловых точек k_j с выбранным направлением их обхода (например, по часовой стрелке) и являющегося границей темной и светлой областей фотошаблона. При этом соответствие внутренности контура (т.е. области, лежащей справа при обходе контура) темной или

светлой области фотошаблона не определено в языке описания топологии.

При формировании массива контуров M_i , относящихся к ячейке p_i , определяется принадлежность контура ячейке p_i (сравнением координат угловых точек контура с границами ячейки). В случае полной принадлежности результатом действия алгоритма R на контур K является множество контуров K^* , где элемент этого множества $K \in K^*$, $K^j = \{k_{1i}^*, \dots, k_{li}^*, \dots, k_{mi}^*\}$ есть часть контура K , а точки k_{1i}^* и k_{mi}^* являются точками слияния контуров, введенными топологом.

При неполной принадлежности контура K ячейке p_i производится такое же разбиение контура, как и в предыдущем случае, но дополнительно вводятся точки разреза (обозначаемые также как точки слияния) контура границами ячейки. Предполагается, что линии разреза не совпадают с сеткой проектирования топологии.

Кроме этого, алгоритму R вменяется в обязанность подсчет числа L точек пересечения контуров с вертикальным лучом, направленным из левой нижней вершины ячейки p_i . При условии, что известна окраска внешней области топологии, лежащей за пределами кристалла (т.е. контура топологической рамки), четность или нечетность L позволяет судить о принадлежности этой вершины темной или светлой области фотошаблона соответственно.

Таким образом, в результате работы алгоритма R получается множество контуров, записанных в единообразной форме. Приведение топологической информации к такой форме удобно для проведения слияния контуров.

Алгоритм S слияния контуров. Предназначен для объединения контуров, закодированных топологом с точками слияния и являющихся границами одной области фотошаблона, в единый контур, а также для формирования замкнутых областей фотошаблонов внутри каждой ячейки p_i . Алгоритм состоит из следующих процедур.

Процедура S_1 – слияние контуров K^j . В массиве M_i осуществляется поиск контуров K^1 и K^2 , у которых конечные точки являются точками слияния. Из полученного массива M_i^* выбираются и уничтожаются полностью совпадающие контуры. Из оставшейся части массива M_i^* контуров, имеющих точки слияния, выбирается группа контуров,

связанных общими точками слияния. Контуров этой группы объединяются в один. Далее выбирается следующая группа связанных контуров и процедура повторяется до тех пор, пока в массиве останутся лишь контуры, не вошедшие в группы. Если среди оставшихся контуров имеются такие, которые содержат точки слияния, введенные топологом (т.е. не лежащие на границе разреза), то по ним выдается соответствующая диагностика.

Процедура S_2 – сортировка точек слияния. При выполнении процедуры S_2 производится упорядочение точек слияния, лежащих на границах ячейки p_i , по координате x для горизонтальных и по y – для вертикальных границ. Причем для левой (верхней) границы точки упорядочиваются по возрастанию, для правой (нижней) – по убыванию координаты. Осуществляется сквозная нумерация точек от левой нижней вершины с нуля или единицы в зависимости от светлой или темной окраски области фотошаблона, включающей левую нижнюю вершину ячейки p_i .

Процедура S_3 – формирование из контуров K^j границ областей внутри p_i . В процессе работы процедуры S_3 помечаются точки слияния, участвующие в формировании замкнутых областей. В исходном состоянии все точки слияния предполагаются непомеченными. Выбирается непомеченная точка слияния, имеющая минимальный нечетный номер. Соответствующий контур K^j включается в состав формируемой границы. Аналогично проводятся поиск и формирование следующего контура, номер граничной точки которого превосходит на единицу номер конечной точки предыдущего контура. Участок границы ячейки p_i между этими точками также включается в состав границы области. Точки слияния, участвующие в формировании границы области, помечаются.

Процесс формирования одной границы считается законченным, если очередная найденная точка слияния совпадает с первой точкой границы.

Границы формируются до тех пор, пока не будут помечены все точки слияния.

Идеи алгоритма R и процедуры S_1 могут быть применены для решения задачи объединения контуров, разрезанных при кодировке топологом, если считать размер ячейки p_i равным размеру кристалла.

Задача оптимальной записи информации. При разбиении информации о топологии интегральной схемы на ячейки p_i возникает необходимость

записать содержание ячеек во внешнюю память (например, на магнитные диски) так, чтобы выборка из нее могла проводиться за минимальное время.

Если предположить, что размер кристалла составляет 4×4 мм, то топологический чертеж в масштабе 1000:1 имеет размеры 400×400 см и содержит 400 ячеек размером 20×20 см. Записывая информацию из этих ячеек на магнитные диски с перемещаемыми головками, следует иметь в виду, что переход с цилиндра на цилиндр требует значительно большего времени (по крайней мере на два порядка), чем переход с дорожки на дорожку в пределах одного цилиндра. Поэтому задача оптимальной записи информации (и, следовательно, считывания ее в процессе контроля) имеет большое значение как с точки зрения скорости считывания информации в память ЭВМ, так и с точки зрения оптимальной эксплуатации НМД.

Следует иметь в виду, что переход с цилиндра на цилиндр происходит с помощью механического перемещения головок, а с дорожки на дорожку — электрическим выбором головки. Предполагается, что тополог может начать контроль топологии с любой ячейки и передвигаться в горизонтальном и вертикальном направлениях по соседним ячейкам.

Таким образом, задачу оптимальной записи информации можно рассматривать как задачу отображения регулярного двумерного множества ячеек на регулярное двумерное множество (в общем случае другой размерности) позиций с минимизацией стоимости перехода из одной позиции в другую, при переходе в исходном множестве в соседнюю позицию.

Математическая формулировка задачи. Пусть дана матрица T размерностью $m \times n$ ($mn = N_0$) элементов a_{ik} и матрица D размерностью $r \times s$ ($rs = N'_0 \geq N_0$, $r \leq m$) элементов b_{jl} . Известно, что переход из одной ячейки матрицы T в другую возможен лишь по вертикали или по горизонтали, т.е. $i, k \Rightarrow i-1, k$; $i+1, k$; $i, k-1$; $i, k+1$.

Пусть далее некоторым образом устроено отображение матрицы T в D , т.е. поставлено в соответствие $a_{i,k} \Rightarrow b_{j,l}$, для которой справедливо следующее свойство: переход через горизонталь стоит C_1 , а через вертикаль — C_2 , $C_2 \gg C_1$. Таким образом, если $(i, k) \Rightarrow (j, l)$, $(i-1, k) \Rightarrow (j, l)$ то переход $(i, k) \Rightarrow (i-1, k)$ в матрице T соответствует переходу $(j, l) \Rightarrow (j, l)$ в матрице D и стоит $C = |j_1 - j| C_1 + |l_1 - l| C_2$. Суммарную стоимость затрат на всех элементов матрицы D при перехо-

де в матрице T в соседнюю позицию можно получить из формулы:

$$C_{\Sigma} = \sum_{j,l} \sum_{k=1}^{k \leq 4} |j_k - j| C_1 + |l_k - l| C_2.$$

Таким образом, требуется найти такое отображение матрицы T в D , чтобы можно было минимизировать величину C_{Σ} .

Величина C_{Σ} будет тем меньше, чем ближе по значениям числа r и m . Можно найти нижнюю грань для величины C_{Σ} . Если предположить, что возможно тождественное отображение матриц T и D , т.е. $r = m$ ($s = n$), то легко вычислить

$$C_0 = 2\{n(m-1)C_1 + m(n-1)C_2\}.$$

Отображение должно быть легко алгоритмизуемо. Поэтому вряд ли стоит искать точное решение задачи, если для его алгоритмической реализации потребуется создание сложной программы. Кроме того, следует учесть, что размерность матрицы T меняется от топологии к топологии, в то время как число строк в матрице D сохраняется постоянным.

С учетом изложенных выше требований к отображению проведено моделирование различных способов отображения, из которых по значениям величины C_{Σ} и простоте реализации принят следующий.

Алгоритм О отображения.

Процедура O_1 — все элементы матрицы T выстраиваются в линейку $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{m_1}, a_{m_2}, \dots, a_{12}, \dots$

Процедура O_2 — полученная последовательность "змейкой" укладывается в матрицу D , т.е. $b_{11} = a_{11}, \dots, b_{r1} = a_{r1}; b_{r2} = a_{r+1,1}; \dots$

При совпадении числа строк в матрицах T и D это отображение тождественно.

Режим "движущегося окна". Для контроля любой части топологии в том числе для проверки правильности стыковки двух фрагментов, возникает необходимость непрерывного отображения графической информации на дисплей (эффект "движущегося окна").

Рассмотрим процедуру формирования дисплейных файлов, соответствующих областям топологии p'_i . С пульта дисплея пользователь задает размер области p'_i , соответствующей движущему-

ся окну, а также величину d_0 , на которую отличаются координаты x (или y) границ i -й и $i+1$ -й областей. Предельный размер области p'_i зависит от объема оперативной памяти ЭВМ, отведенной для обработки информации и хранения дисплейного файла.

Алгоритм формирования дисплейных файлов. Его можно представить в виде последовательного выполнения следующих этапов:

1. Считывание с НМД топологической информации ячеек p'_i , соответствующих элемента матрицы $T: a_{m,n}, a_{m+1,n}, \dots, a_{m+k,n}, a_{m,n+1}, \dots, a_{m+k,n+1}, a_{m,n+k}, \dots, a_{m+k,n+k}$, где число k определяется из условия $l'_i < (k+1)l$. Здесь l'_i – размер области топологии, выводимой на экран графического дисплея для контроля, l – размер ячейки p'_i .

2. Применение алгоритма R для формирования информации соответствующей области p'_i .

3. Проведение слияния с помощью алгоритма S для информации области p'_i .

4. Выполнение программного контроля информации области p'_i .

5. Формирование дисплейного файла, с соответствующими метками для ошибочных контуров.

6. Формирование границы $i+1$ -й области. При этом необходимо проверить выполнение условий:

$$x'_{\max} < x_{\max, m+k}; y'_{\max} < y_{\max, n+k}; \quad (2)$$

$$x'_{\min} > x_{\min, m}; y'_{\min} > y_{\min, n}. \quad (3)$$

Если условия (2) и (3) выполнены, то перейти на второй этап. Если условие (2) нарушено, то следует заменить $m \Rightarrow m+1, n \Rightarrow n+1$, а при нарушении условия (3) – заменить $m \Rightarrow m-1, n \Rightarrow n-1$ и в обоих случаях перейти на первый этап.

Для улучшения характеристик системы применен метод двойной буферизации [5], позволяющий совместить процессы регенерации изображения области p'_i и подготовки дисплейного файла области p'_{i+1} .

Таким образом, повторяя процесс формирования дисплейного файла с изменением границ области, получаем возможность непрерывного показа топологического чертежа.

Работа системы контроля. Выше рассмотрены и решены принципиальные вопросы, возника-

ющие при организации системы полного геометрического контроля топологии БИС и разработке ее математического обеспечения.

Последовательность работы такой системы можно разбить на два основных этапа: предварительный этап и этап контроля.

Предварительный этап предназначен для подготовки информации и включает ввод текстового описания топологии в ЭВМ и запись на НМД; обработку информации с помощью программ "Транслятор" и разрезание на части; размещение массивов информации, соответствующих частям топологии, на НМД.

На этапе контроля топологии информация выбирается с дисков и выводится на экран дисплея для визуального и программного контроля топологии. При отображении на экране результата программного контроля дисплея геометрические нарушения выделяются особым типом свечения. Режим "движущегося окна" позволяет просмотреть и выявить ошибки по всей топологической схеме. При этом предусмотрены остановки изображения и движения его в любом направлении.

Управление работой программ обеспечивается программой "Диспетчер", в функции которой входят запись на НМД и считывание информации и программ с НМД, реализация диалогового режима, обеспечение движения изображения на экране, его остановка, переход в другую ячейку топологии, вызов программ контроля в оперативную память и отображение результатов контроля на дисплее.

Предложенная организация системы контроля топологии и соответствующий набор программ позволяют создать систему контроля топологии БИС, обладающую высокой оперативностью, возможностью работы с топологиями, по объему информации значительно превосходящими объем оперативной памяти ЭВМ, возможностью контролировать любую область чертежа, наличием диалогового режима.

Так как в системе применен принцип трансляции, информация автоматически сортируется, что позволяет оптимизировать работу программ и, в частности, выдачу информации для МФНУ и других генераторов изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казеннов Г.Г., Шепелев В.А., Попова Т.М., Власенко В.А. Система контроля топологии интегральных схем на базе мини-ЭВМ с использованием дисплеев. – В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
2. Шепелев В.А. Система контроля топологии БИС. Управляющие системы и машины. Киев, "Наукова думка". 1977, вып. 6.

3. Шепелев В.А., Оганесьянц Л.Г., Попова Т.М. Функциональные возможности, структура и особенности интерактивной системы отладки топологии БИС. — "Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства", 1978, вып. 2.

4. Казеннов Г.Г., Баталов Б.В., Фейнберг В.З., Шемелин В.М., Колосовский Л.И., Стемповский А.Л., Свердлов А.Г., Пушкин Л.В. Язык описания топологии. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9, М., "Сов. радио", 1976.

5. Ньюмен У., Спрул Р. Основы интерактивной машинной графики. М., Мир, 1976.

Статья поступила 19 июня 1978 г.

А.Л.Стемповский

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ БИС В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Решение принципиально новой задачи выбора оптимального процесса изготовления фотошаблонов в системе автоматизированного проектирования БИС позволяет в несколько раз сократить суммарные временные и материальные затраты.

удк[621.3.049.77.001:2:776]:658.012.011.56

Некоторые задачи оптимизации данных для генераторов изображений (ГИ) рассматривались в печати [1], например оптимальное разбиение экспонируемой области по числу экспозиций [2] и минимизация холостого хода ГИ [3].

Решение этих задач основано на предположении, что ГИ работает в идеальных условиях, т.е. при отсутствии ошибок и сбоев. Так как процесс изготовления промежуточного фотооригинала (ПФО) с помощью ГИ необратим, т.е. при появлении ошибки процесс должен быть начат заново, несомненный интерес представляет рассмотрение работы ГИ с учетом потока ошибок, а также

выбор оптимального процесса изготовления фотошаблонов (ФШ).

Под оптимальным процессом изготовления ФШ будем понимать выбор оптимальных по некоторым параметрам (например, времени изготовления) маршрута изготовления ФШ и метода контроля процесса изготовления ФШ. Так как при некотором соотношении времени работы ГИ и потока ошибок вероятность получения годного ПФО может достигнуть очень малой величины, то в основу маршрута изготовления ПФО целесообразно положить расчленение процесса на несколько независимых частей с последующей сборкой единого изображения путем фотомонтажа.

Один из вариантов такого маршрута включает изготовление фрагментных ПФО, фотомонтаж ПФО методом контактной печати, мультипликацию. Естественно, что такое разбиение имеет оптимум по числу фрагментов, так как при их увеличении возрастает время фотомонтажа и уменьшается время изготовления одного фрагментного ПФО.

Большое влияние на время изготовления ФШ оказывает применяемый метод контроля изготовления ПФО [4].

Известные методы контроля изготовления ПФО можно разбить на три группы:

- контроль по окончании процесса изготовления, например по "знакам качества";
- промежуточный контроль сбоев путем вывода ГИ в контролируемое положение "индикаторный нуль" через интервал времени Δt ;
- постоянный контроль сбоев, т.е. контроль при наличии обратной связи путем опроса датчиков после каждой отработки, например управление от ЭВМ.

Так как при выбранном маршруте изготовления ФШ время мультипликации неизменно, найдем аналитическую зависимость времени изготовления ПФО ($T_{\text{пфо}}$) от изменяемых параметров и для различных режимов контроля процесса изготовления

$$\bar{T}_{\text{пфо}} = \bar{T}_{\text{ги}} + \bar{T}_{\text{ф}},$$

где $\bar{T}_{\text{ги}}$ — время работы ГИ; $\bar{T}_{\text{ф}}$ — время фотомонтажа. Здесь и далее черта обозначает математическое ожидание данной величины

$$\bar{T}_{\text{ги}} = \bar{T}N,$$

где \bar{T} — математическое ожидание времени изготовления одного фрагментного ПФО; N — число фрагментных ПФО.

Для получения аналитических зависимостей считаем, что поток помех и ошибок λ имеет распределение Пуассона

$$P(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}.$$

Приведем без вывода зависимости \bar{T} для каждого из трех методов контроля процесса изготовления ПФО

$$\bar{T}_1 = \frac{T_0}{P(T_0)} = \frac{T_0}{e^{-\lambda T_0}};$$

$$\bar{T}_2 = \Delta T \frac{1 - e^{-\lambda n \Delta T}}{(1 - e^{-\lambda \Delta T}) e^{-\lambda \Delta T}};$$

$$\bar{T}_3 = \frac{1 - e^{-\lambda T_0}}{\lambda e^{-\lambda T_0}},$$

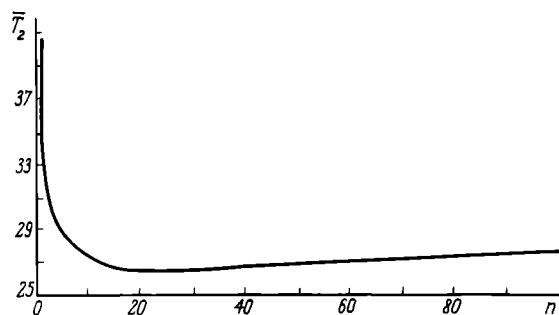


Рис. 1. Зависимость \bar{T}_2 от числа выходов в "индикаторный нуль" при $\lambda = \frac{1}{15} \text{ ч}^{-1}, T_k = 30''$, $T_0 = 15 \text{ ч}$

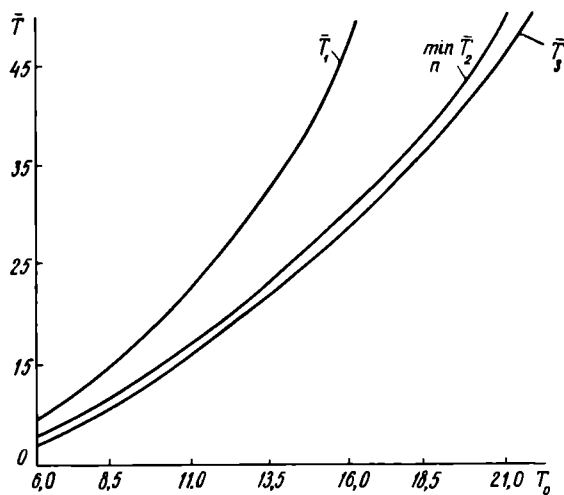


Рис. 2. Зависимости \bar{T}_1 , $\min \bar{T}_2$ и \bar{T}_3 от времени изготовления фрагментов ПФО

где $T_0 = \frac{T_\Sigma}{N}$ – время обработки на ГИ одного фрагментного ПФО без промежуточного контроля;

$\Delta T = \frac{T_0}{n} + T_k$; n – число выходов в "индикаторный нуль" при изготовлении одного фрагментного ПФО; T_k – время выхода в "индикаторный нуль" и время контроля правильности выхода; T_Σ – время изготовления на ГИ полного ПФО без промежуточного контроля.

Значительный интерес представляют зависимости $\bar{T}_2(n)$, $\bar{T}_1(T_0)$, $\min \bar{T}_2(T_0)$ и $\bar{T}_3(T_0)$, представленные на рис. 1 и 2. Результаты анализа этих зависимостей позволяют судить о выигрыше во времени, получаемом благодаря правильному выбору периода контроля, о преимуществе периодического контроля над методом изготовления ПФО без промежуточного контроля и достоинстве метода

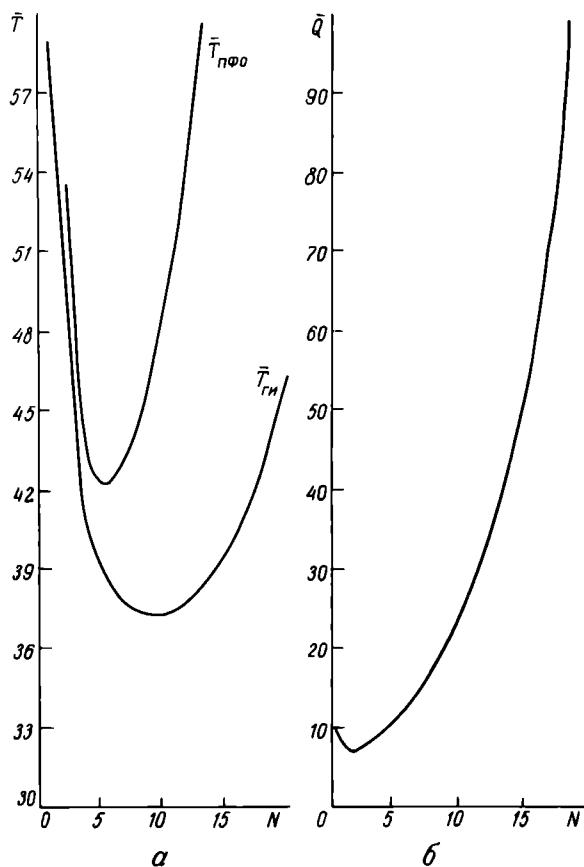


Рис. 3. Зависимости оптимизируемых параметров маршрута изготовления ПФО от числа фрагментных ПФО при $p = 0,8$; $T_{\text{тех}} = 0,5 \text{ ч}$; $p' = 0,02$; $T_\Sigma = 30 \text{ ч}$

постоянного контроля. Приведенные аналитические и графические зависимости можно использовать для оценки и выбора правильного режима в широко используемых методах изготовления ПФО без промежуточного контроля и с периодическим контролем без фотомонтажа, так как они справедливы и для изготовления единичного полного ПФО.

Время фотомонтажа ПФО из фрагментных ПФО методом контактной печати определяется по формуле

$$\bar{T}_{\Phi} = \bar{T}_{\text{совм}} + \bar{T}_{\text{повт}},$$

где $\bar{T}_{\text{совм}}$ — время, затраченное на фотомонтаж при наличии фрагментных ПФО; $\bar{T}_{\text{повт}}$ — время, затраченное на повторное изготовление на ГИ некоторых фрагментных ПФО, испорченных в процессе фотомонтажа.

Приведем без вывода аналитические зависимости $\bar{T}_{\text{совм}}$ и $\bar{T}_{\text{повт}}$

$$\bar{T}_{\text{совм}} = T_{\text{тех}} \left[\frac{1-p^N}{1-p} \right] \frac{1}{p^N};$$

$$\bar{T}_{\text{повт}} = \bar{T} \left[\frac{1-p^N}{1-p} \right] \frac{p'}{p^N}.$$

Здесь $T_{\text{тех}}$ — время технологическое, идущее на одно совмещение;

p — вероятность отсутствия брака при одном совмещении;

N — число монтируемых ПФО;

p' — вероятность порчи фрагментного ПФО при одном совмещении.

Последние две формулы получены в предположении, что вероятность порчи фрагментного ПФО при каждом отдельном совмещении остается неизменной, т.е. не возрастает от совмещения к совмещению, и "износ" различных фрагментных ПФО одинаков, т.е. фотомонтаж осуществляется каждый раз в новом порядке.

Учитывая полученные зависимости, можно вывести формулы для параметров, подлежащих оптимизации (рис.3):

$$\bar{T}_{\text{ПФО}} = \bar{T}(N + p' \frac{1-p^N}{(1-p)p^N}) + T_{\text{тех}} \frac{1-p^N}{(1-p)p^N};$$

$$\bar{T}_{\text{ГИ}} = \bar{T}(N + p' \frac{1-p^N}{(1-p)p^N});$$

$$\bar{Q} = \frac{N}{e^{-\lambda T_0}} + \frac{1-p^N}{(1-p)p^N} p' + \frac{1}{p^N},$$

где $\bar{T}_{\text{ГИ}}$ — суммарное время работы ГИ с учетом повторного изготовления фрагментных ПФО; \bar{Q} — число израсходованных пластин. В приведенных формулах под \bar{T} подразумевается любое из значений $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3$ в зависимости от имеющегося оборудования.

Заключительная задача, решаемая в процессе подготовки данных для ГИ в автоматизированной системе проектирования и изготовления фототаблонов БИС, формулируется следующим образом; настройка исходных данных на оптимальный по выбранным критериям маршрут изготовления ФШ. Этапами, предшествующими настройке данных на оптимальный процесс, являются минимизация холостого хода ГИ и прогнозирования времени работы ГИ, т.е. определение $T_{\Sigma}[1]$.

Зная состав и параметры парка имеющегося оборудования и используя полученные зависимости, можно решить задачу оптимизации требуемой величины, т.е. определить N_{opt} и n_{opt} . Выходная информация системы проектирования должна быть "настроена" на полученные данные, т.е. реализованы требуемое число фрагментных ПФО и требуемый период контроля.

Поставленная задача решена в системе проектирования ФШ БИС для ЭВМ БЭСМ-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. С тем п ков с к и й А. Л. Основные задачи математического обеспечения генераторов изображения. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9, М., "Сов. радио", 1976.
2. Р у б ц о в В. П. Реализация топологии БИС прямоугольниками. — "Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника", 1976, вып. 6.
3. К а з е н н о в Г. Г., О с и п о в Л. В., Ш е м е л и н и н В. М., С тем п ков с к и й А. Л. Алгоритм подготовки данных для микрофотонаборных установок. — "Электронная промышленность", 1974, вып. 6.
4. Ш е п е л е в В. А., С тем п ков с к и й А. Л., С тем п ч е н к о в В. Г. Комплексный контроль топологии и фототаблонов. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9, М., "Сов. радио", 1976.

Статья поступила 10 июня 1978 г.

В. М. Курейчик

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Использование базовых алгоритмов технического проектирования БИС вычислительных структур дает возможность сократить сроки создания микропроцессоров, снизить их стоимость, повысить эффективность и качество проектирования устройств.

УДК 621.3.049.77.002:681.32.51

Одно из основных требований, предъявляемых к новым средствам вычислительной техники, — высокая производительность, связанная с увеличением числа и быстродействия элементов, а также с распараллеливанием процесса вычислений.

Для реализации этих требований используют замену неоднородной арифметико-логической части ЭВМ однородными блоками, выполненными в виде БИС, т.е. однородную вычислительную структуру (ОВС). ОВС — это набор одинаковых микропроцессоров, окруженных полем коммутирующих элементов, соединенных между собой одинаковым образом, способных настраиваться на решение задач управления и моделирования [1].

При создании ОВС используются специализированные микропроцессоры, основанные на принципах структурного программирования, позволяющих избавить конструкторов от сложного этапа программирования алгоритмов, который в этом случае выполняется аппаратно.

Процесс разработки БИС микропроцессора (МП) ОВС состоит в основном из четырех этапов: разработка принципиальной электрической (СхЭ) и топологической (СхТ) схем, а также изготовление комплекта фотошаблонов и БИС МП на основе СхЭ, СхТ и этого комплекта на современном технологическом оборудовании.

Повышение степени интеграции в одном кристалле при однородности и однообразии СхЭ приводит к все более сложной СхТ, получить которую без использования формальных алгоритмов и ЭВМ невозможно.

Исходными данными для проектирования топологии БИС служат СхЭ, заданная на уровне соединений отдельных компонентов или на уровне соединений типовых элементов, класс БИС (МДП, КМДП или инжекционные), описание технологического процесса изготовления БИС.

Выходные данные (конфигурацию фотошаблонов) получают в виде комплекта конструкторской документации, состоящей из послойных чертежей и таблиц координат или в виде информации на перфокартах и магнитной ленте для управления координатографами и микрофотонаборными установками.

При разработке алгоритмов топологического (технического) проектирования БИС МП и других дискретных устройств предлагается использовать формальные математические методы, обобщенный критерий качества и абстрактные модели схем, адекватно с допустимой погрешностью задающие коммутационные свойства принципиальных и топологических схем.

Основные этапы автоматизированного технического проектирования БИС МП

Из всего многообразия способов проектирования топологии можно условно выделить два основных: проектирование на основе стандартных унифицированных ячеек и последовательное проектирование.

В первом случае каждая ячейка представляет собой логическую схему или комбинацию логических схем, реализующих заданный функционал. Проектирование топологии осуществляется упорядоченным перебором ячеек, унифицированных по высоте и ширине, их размещением на кристалле, трассировкой соединений и контролем цифровых массивов. Этот способ наиболее эффективен при реализации схем вычислительных структур с регулярной структурой.

Последовательное проектирование применяется для нерегулярных схем. СхЭ условно разбивается на ряд зон. Размещение этих зон в пределах кристалла определяется структурой и сложностью СхЭ. Зоны проектируются на основе готовых топологических решений. Затем формируется топология регулярных структур, и методом построения геометрии отдельных ячеек с одновременной трассировкой строится топология нерегулярной части схемы.

После получения топологии всей схемы рассчитывают паразитные емкости, работоспособность, помехоустойчивость, проводят электрические расчеты для оптимизации каскадов и корректировки топологических решений. При необходимости вно-

Практически осуществить полную оптимизацию топологии БИС затруднительно из-за большого числа частных критериев, переменных и ограничений. Так как этапы проектирования следуют один за другим в определенной последовательности, то каждый из них можно спроектировать в соответствии со своими показателями качества.

Математические модели схем. В качестве формальной модели для описания коммутационных свойств функциональной или принципиальной схем будем использовать графы, гиперграфы, расплывчатые графы, преобразованные структурные числа.

Коммутационную модель СхЭ БИС можно рассматривать как некоторое множество элементов X , соединенных между собой заданным образом электрическими цепями, которые определяются как конечное множество цепей [2]. Каждый элемент имеет некоторое множество выводов $Z_i = \{z_1, z_2, \dots, z_L\}$, где i – индекс рассматриваемого элемента; L – число выводов, в СхЭ. Кроме того имеются внешние выводы, которые относят к условному элементу. Два или несколько элементов считаются связанными, если они объединяются одной электрической цепью. На рис. 2 показан фрагмент СхЭ, состоящей из шести элементов и четырех цепей. В этом случае СхЭ можно задать в виде специального гиперграфа $H=(x, E)$, где x – множество вершин гиперграфа, соответствующее множеству элементов; E – множество ребер, соответствующее множеству цепей. Каждое ребро состоит из подмножества вершин, которые можно произвольно соединить между собой, и каждой вершине сопоставить внешний вывод элемента схемы. Гиперграф для фрагмента схемы, показанной на рис. 2, представлен на рис. 3.

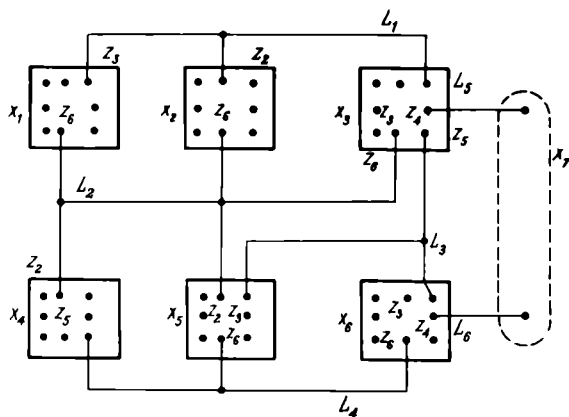


Рис. 2. Фрагмент электрической схемы, состоящей из шести элементов и четырех цепей

Для каждой вершины гиперграфа $x_i \in X$ определяется множество, задающее связность вершин внутри ребер гиперграфа. Это множество, обозначаемое Γx_i , расплывчато в X и характеризуется функцией принадлежности $\mu \Gamma x_i$, принимающей значения из отрезка $[0,1]$. Чем ближе $\mu \Gamma x_i(x_j)$ к единице, тем выше степень принадлежности x_j к x_i ; $\mu \Gamma x_i(x_j) = 0$ или 1 соответствует несвязности или связности элементов x_i и x_j [3]. Если принять $\mu \Gamma x_i(x_j) = f/v$ (где v – число точек цепи-ребра гиперграфа, $x_j \in X, j=1, 2, \dots, v$), то для гиперграфа получим модель расплывчатого гиперграфа в виде графа с весами на ребрах.

Каждый элемент гиперграфа представим в виде строки списка, который назовем преобразованным структурным числом (ПСЧ) [4]

$$A = P_1 P_2 \dots P_{n-1}; \quad n = |X|;$$

$$P_i = [x_i] [(j_1^a, j_2^b, \dots, j_q^c)^k, \dots, (\delta_1^a, \delta_2^b, \dots, \delta_r^c)^L],$$

где x_i – вершина; j_q^c – номер элемента принадлежащего ребру, включающему x_i и x_j и подсоединенному к выводу c элемента x_j и выводу q элемента x_i .

Такая модель, по мнению автора, позволяет адекватно задавать "расплывчатую" информацию о коммутационных связях схемы, не содержит избыточной информации и вместе с тем компактней матричной.

Элемент ПСЧ можно рассматривать как элемент некоторой алгебры преобразованных струк-

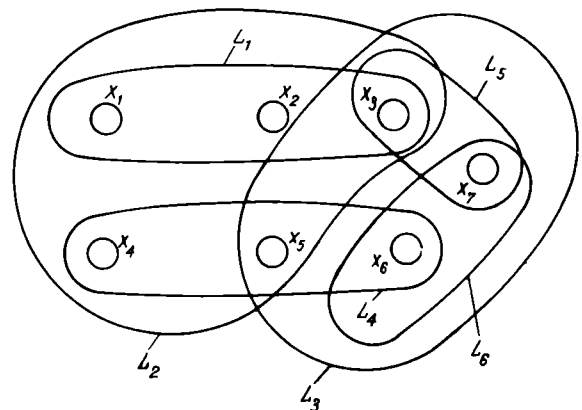


Рис. 3. Гиперграф для фрагмента электрической схемы, состоящей из шести элементов и четырех цепей.

турных чисел, которую можно характеризовать тройкой множеств $\langle A, \Omega, F \rangle$, где A – множество ПСЧ; Ω – множество операторов ω_1, ω_2 , определяющих сумму и произведение ПСЧ; F – результат применения $\omega_1, \omega_2 \in \Omega$. Дополним множество Ω операторами расширенной ω_3 , прямой ω_4 и обратной ω_5 производными.

Прямой производной ПСЧ A по элементу x_i назовем ПСЧ A'_i вида $A'_i = \partial A / \partial P_i$, в котором исключена строка P_i , а также элементы с индексом i из P_j частей оставшихся строк A . Эта операция соответствует выделению из схемы звездного подграфа с центральной вершиной x_i . Результат операции запишем в виде $C_i = (x_i + x_k x_l \dots)$, где x_k, x_l – элементы, смежные x_i .

Расширенной производной ПСЧ A по элементу x_i будет ПСЧ A'_p вида $A'_p = \partial A / \partial P_i$, в котором исключена строка P_i , а также все ее элементы из P_j частей оставшихся строк A . Операция соответствует выделению в схеме звездного подграфа, а также дуг, соединяющих элементы этого подграфа. Результат операции записывается аналогично предыдущему.

Обратной производной ПСЧ A по элементу x_i назовем ПСЧ A'_δ вида

$$A'_\delta = \frac{\delta A}{\delta P_i},$$

в котором исключена строка P_i . Результат этой операции: $C_i = (x_i + x_k + \dots + x_l)$, где x_k, \dots, x_l – элементы, смежные x_i .

Данные операции дополняют действия над структурными числами [5], но относятся к преобразованным структурным числам.

Задачи технического проектирования в основном решаются с использованием различных методов, не связанных между собой общностью математических преобразований. Целесообразно строить комплекс алгоритмов на основе базовых подалгоритмов, а взаимодействие между ними организовать в виде иерархической структуры без обратных связей. Алгоритмы технического проектирования носят комбинаторный характер и основаны на выделении в схеме экстремальных частей. В этой связи в основу подалгоритмов можно положить алгоритмы построения независимых, доминирующих и полных подмножеств, а также выделения изоморфных частей графа и гиперграфа схемы.

Подмножество $L_i \subset x$ называется полным подграфом (кликкой), если все вершины L_i смежны; L_i – называется максимальной кликой, если не содержится полностью ни в какой другой клике. Если для H или G построить инверсный гиперграф (граф) $\bar{H}(G)$, в котором вершинами являются вершины $H(G)$, ребрами – отсутствующие ребра $H(G)$, и выделить в $H(G)$ семейство клик, то для $\bar{H}(G)$ – это семейство максимальных независимых подмножеств (МНП) и наоборот.

Подмножество $\psi_i \subset x$ называется доминирующим, если любая вершина $x_j \notin \psi_i$ связана по крайней мере с одной вершиной из ψ_i ребром, начало которого лежит в $x \setminus \psi_i$, т.е. $(\forall x_j \in \psi_i)(\psi_i \cap \Gamma x_j = \phi)$.

Подмножество ψ_i называется минимальным, если после удаления из него произвольной вершины x_j оно становится не доминирующим.

Два графа $G_1 = (x_1 U_1)$ и $G_2 = (x_2 U_2)$ называются изоморфными, если существует подстановка t , сохраняющая инцидентность вершин и ребер, для которой $t(x_1) = x_2$; $t(U_1) = U_2$.

Построение семейства клик для $H(G)$ или МНП для $\bar{H}(G)$ заключается в следующем. В ПСЧ выделяется строка P_i , у которой $|P_i| = \max$. Затем из $H(G)$ удаляется звездный подграф с вершиной x_i и записывается $C_i = (x_i + x_k x_l \dots x_p)$, где вершины x_k, x_l, \dots, x_p смежны x_i . Процесс продолжается аналогично, пока в ПСЧ для оставшихся строк P_q, \dots, P_r части P_q, \dots, P_r не будут содержать ни одного элемента, т.е. он заключается в последовательном применении прямой производной. Далее составляется произведение $\Pi = C_1 C_2 \dots C_t$, в котором раскрываются скобки и выполняется минимизация пока не получится выражение вида

$$\Pi = K_1 + K_2 + \dots + K_t,$$

где K_i – конъюнктивный элемент, состоящий из последовательно записанных вершин, например $K_i = x_a x_b \dots x_c$.

При определении семейства L для каждого $K_i = x_a x_b \dots x_c$ находится подмножество $x \setminus K_i$, элементы которого образуют одну из максимальных клик $G[4]$.

Основная идея построения семейства доминирующих подмножеств заключается в следующем. В ПСЧ выделяется строка P_i , для которой $|P_i|$

наибольшая. Если таких строк несколько, то выбирается любая. Далее определяется и удаляется звездный подграф с вершиной x_i , а также ребра, смежные x_i . Записывается подмножество $x' = \{x_i, x_k, x_L, \dots, x_q\}$, где вершины x_k, x_L, \dots, x_q — соответствуют элементам P_i^1 . Если $x = x'$, то x_i образует МДП M_1 . В противном случае в ПСЧ снова выделяется строка $P_q \subset |P_q^1|$ и процесс повторяется аналогично, пока на некотором шаге не получим $x^{1 \dots l} = x$, т.е. процесс заключается в последовательном применении расширенной и обратной производной.

Опишем кратко идею использования базовых алгоритмов в процессе технического проектирования.

Этапы покрытия и компоновки описываются семейством клик и распределением его элементов по блокам на основе модифицированной "раскраски". Операция модифицированной "раскраски" основана на анализе произведения, полученного после дифференцирования ПСЧ, и заключается в следующем. Для каждой вершины графа определяются конъюнктивные элементы произведения Π , в которые она не входит, например $x_i \notin k_i, k_j, \dots; x_j \notin k_p, k_t \dots$. Далее составляется выражение $\Pi = (k_i + k_j + \dots)(k_p + k_t + \dots)$, в котором раскрываются скобки и проводится минимизация.

В выражении $\Pi_i = k_i k_p \dots + k_j k_t \dots$ инверсия элементов \bar{k}_i определит подмножество вершин, окрашиваемых первым цветом. Элементы $\bar{k}_i \setminus \bar{k}_p$ окрашиваются вторым цветом и т.д., пока не будет получено оптимальное распределение элементов по блокам с минимизацией внешних связей.

Размещение элементов сводится к разбиению площади на линейки на основе метода ветвей и границ. Множество всех размещений цепей схемы разбивается на последовательно уменьшающиеся подмножества, а процесс ветвления сопровождается нахождением нижних оценок. Сумма длин звездных подграфов, полученная при дифференцировании ПСЧ, определяет нижнюю оценку минимальной суммарной длины. Ветвление заключается в фиксации в определенных позициях линеек цепей схемы. Упорядочение линеек выполняется путем факторизации и сведения к линейно расположенному мультиграфу с последующим применением линейного алгоритма.

После этого решается задача определения планарности. Для этого модель модифицируется следующим образом. Множеством вершин графа G являются подмножества элементов, цепей, узловых точек и контактных площадок. Две вершины смежны, если в схеме элемент и цепь инцидентны. Проведение фрагментов цепей под компонентами схемы не допускается и порядок подключения цепей произвольный. Далее по полученному графу строится граф пересечений G^1 , у которого множество вершин соответствует ребрам G . Две вершины G^1 смежны, если соответствующие им ребра в G пересекаются.

Тогда, если G^1 — двудольный, то G — планарный. Получение двудольности основано на использовании базового алгоритма определения независимых подмножеств. Если G не планарен, то проводится минимизация пересечений одним из методов, описанных в работе [5]. Далее в G^1 выделяется система независимых подмножеств и на основе раскраски выполняется разбиение на плоские суграфы. Затем в каждом суграфе выполняется трассировка соединений.

Для схем ОВС на МОП БИС наибольшее применение находит двухслойная трассировка, заключающаяся в выборе связанных контактов из условия минимума суммарной длины соединений и построении трасс с помощью модифицированных волновых и канальных алгоритмов [6]. Граф трассировки задается в виде расплывчатого гиперграфа. На основе анализа функции принадлежности его ребер цепи распределяются по каналам. Затем определяется предварительная конфигурация цепей без закрепления их в магистралях, для каждой цепи строится кратчайшее связывающее дерево и осуществляется равномерное распространение фрагментов цепей по каналам с минимизацией непроведенных соединений. Далее, учитывая свойство инвариантности некоторых групп контактов, осуществляется закрепление цепей за контактами топологических ячеек. После этого выполняется минимизация пересечений, упаковка и размещение фрагментов цепей по магистралям.

Для установления очередности проведения фрагментов трасс при распределении их по магистралям для каждого фрагмента устанавливается степень его принадлежности к каналам. Это позволяет параллельно рассматривать несколько вариантов цепей и выбирать обеспечивающий максимальный процент реализованных цепей. На последнем этапе выполняется размещение и минимизация переходных отверстий, а также рассчитываются координаты фрагментов цепей и информация выводится на координатограф.

Для проверки соответствия исходной электрической схемы ее топологическому эквиваленту строятся моделирующие графы и на основе базовых алгоритмов сравниваются на изоморфизм [8].

После этого автоматизированными методами также на основе базовых алгоритмов выполняется процесс получения фотшаблонов, который состоит из синтаксического контроля входной информации, расчета послышной геометрии, контроля емкостного баланса, контроля технологических ограничений и получения управляющей ленты.

Основные алгоритмы технического проектирования реализованы на ЭВМ ЕС 1020 (2) на языке ФОРТРАН IV.

По мнению автора, использование формальных моделей схем и базовых алгоритмов позволяет унифицировать и стандартизировать комплекс алгоритмов технического проектирования и повысить качество создаваемых устройств. Перспективными исследованиями в этом направлении являются универсализация всех алгоритмов технологического проектирования, разработка совместных контролепригодных алгоритмов компоновки и трассировки, построение адекватных методов восстановления принципиальных схем по полученной топологии, построение точных методов на основе последовательных процедур для реализации на ЭВМ алгоритмов, проектирующих ИМС с высокой степенью интеграции, разработка специализированных приставок для быстрой реализации наиболее трудоемких методов, построение обобщенного критерия проектирования БИС, а также разработка формальных математических моделей проектируемых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каляев А. В. Однородные коммутационные регистровые структуры. М., "Сов. радио", 1978.
2. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных узлов. М., "Сов. радио", 1977.
3. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. - В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М., "Мир", 1975.
4. Курейчик В. М. Применение структурных чисел для построения независимых подмножеств. - "Известия АН СССР. Техническая кибернетика", 1977, № 6.
5. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. М., "Наука", 1974.
6. Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем. Под редакцией М. Брейера. М., "Мир", 1977.
7. Курейчик В. М., Королев А. Г. Применение алгоритма изоморфизма графов для контроля схем БИС. - "Микроэлектроника", 1976, № 5 (АН СССР)

Статья поступила 23 августа 1978 г.

•ЭП•



РЕКЛАМА

НОВЫЕ КНИГИ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Л. А. Растрин

М., "Советское радио", 1979, 13 л., 12000 экз.

Описаны все этапы разработки и реализации системы управления сложным объектом, включая формулировку целей управления, выделение объекта из среды, синтез моделей объекта и системы управления и их реализацию, коррекцию системы управления на базе информации, полученной в процессе ее функционирования. Показано применение на каждом этапе формальных (математических) и неформальных (экспертных) методов, взаимодействие которых позволяет решать сложные задачи управления.

ДИСПЛЕИ В СИСТЕМАХ С ЭВМ

И. Е. Соловейчик

М. "Сов. радио", 1979, 16 л., 12000 экз.

Подробно излагаются принципы действия и технические особенности наиболее перспективных дисплейных систем, основанных на цифровом управлении телевизионным растром. Особое внимание уделяется структурам этих систем и вопросам получения их оптимальных характеристик, а также использования в них графики и цвета для расширения информационных возможностей. Описывается работа и процедура взаимодействия дисплеев с местными и удаленными ЭВМ через каналы связи.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман

Пер. с англ. М., "Мир", 1979, 28 л., 15000 экз.

В монографии излагаются результаты теоретических и прикладных исследований по построению быстрых алгоритмов и доказательству их отсутствия. Рассмотрены задачи перебора, упорядочения массивов данных, умножения чисел и матриц; обсуждаются алгоритмы на графах.

**ОБМЕН
ОПЫТОМ**

**ПРИКЛАДНОЕ
ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМ
АВТОМАТИЗИРОВАННО-
ГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ***

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ИМС

Программа расчета двумерных распределений легирующих примесей в элементах интегральных схем

УДК 621.3.049.77.001.24

Программа предназначена для расчета двумерного распределения легирующих примесей в полупроводниковой структуре, сформированной в результате многоэтапного термического процесса. Математическая модель, реализованная в программе, распространяется на структуры, изготовленные на кремниевой подложке по планарно-эпитаксиальной технологии и содержащие слои окисла, эпитаксиальные слои, а также области, легированные примесями различного типа проводимости. Первоначально кремниевая подложка, помимо однородно-легированных слоев, может содержать и неоднородно-легированные, но с заданным законом распределения атомов примесей.

Программа учитывает как диффузию, так и термическую эволюцию распределения атомов примесей в процессе следующих высокотемпера-

турных операций: диффузия примесей из внешнего источника через окно в маскирующем слое (одностадийная диффузия); двухстадийное формирование начального состояния диффузионного слоя; легирование и автолегирование эпитаксиальных слоев с учетом динамики их роста; перераспределение примесей в процессе проведения операций отжига, окисления, эпитаксии и высокотемпературной обработки.

В программе учитывается воздействие всех термических процессов на каждую примесь. Модель распределения отдельной примеси в готовой структуре получается в результате решения последовательности краевых задач для уравнения диффузии с соответствующими краевыми и начальными условиями [1]. В основу алгоритма решения краевых задач положен метод конечных разностей [2]. Результирующее распределение концентрации примесей вычисляется как алгебраическая сумма распределений отдельных примесей.

Математическая задача, решаемая программой, поставлена для некоторой прямоугольной области вертикального сечения, примыкающей к поверхности структуры. Рассчитываемая диффузионная структура должна иметь ось симметрии, параллельную одной из сторон прямоугольника. В противном случае расчет проводится последовательно для отдельных фрагментов, обладающих симметрией, с последующим синтезом полной структуры.

В результате расчета получают таблицы значений результирующего распределения атомов примесей,

* Все приведенные программы находятся в составе отраслевого фонда алгоритмов и программ.

вычисленных на равномерной прямоугольной сетке для законченного и промежуточных состояний структуры, и графическое изображение линий равной концентрации с учетом типа проводимости (качественный результат). В программе предусмотрен вывод на печать таблицы с исходной информацией, в которой содержатся все режимы термических процессов, оказывающих воздействие на каждую примесь.

Текст программы написан на алгоритмическом языке ФОРТРАН и имеет длину около 1000 условных операторов. Оформление пакета задачи ориентировано на ОС ДИСПАК и мониторную систему "Дубна" для ЭВМ БЭСМ-6. Время расчета типового варианта составляет 10–20 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чеботаев Е.В., Руденко А.А., Кокина Г.Е. Численный анализ диффузионных процессов с учетом динамики роста эпитаксиальной пленки. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.

2. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М., "Наука", 1971.

Г. Е. Кокина, Е. В. Чеботаев

Программа расчета входных вольт-амперных характеристик многоэмиттерных транзисторов ИС

УДК 621.382.311.8

Многоэмиттерные транзисторы нашли широкое применение при разработке БИС памяти (ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ). Для построения запоминающей матрицы и дешифраторов БИС памяти удобно использовать транзисторы с конструкцией, характеризующейся последовательным расположением эмиттеров по одну или обе стороны от базового контакта.

Задача расчета входных вольт-амперных характеристик таких транзисторов по каждому из эмиттеров сводится к следующему:

— задается аппроксимация вольт-амперной характеристики i -го $p-n$ перехода эмиттер-база;

— в пассивной области базы решается уравнение Лапласа, в активной (под i -м эмиттером) — уравнение Пуассона для учета эффекта оттеснения эмиттерного тока;

— выражение для плотности тока через $p-n$ переход интегрируется по площади каждого из эмиттеров, и вычисляются значения полных токов через эмиттеры.

При решении задачи применена аппроксимация уравнений Лапласа и Пуассона для электростатического потенциала по схеме переменных направлений, а также метод установления, который используется на первом этапе решения системы нелинейных алгебраических уравнений. На втором этапе после выполнения заданного числа шагов по времени применяется специальный итерационный метод.

Как известно, основной недостаток многоэмиттерных транзисторов состоит в неидентичности входных вольт-амперных характеристик i -го $p-n$ перехода эмиттер-база из-за неодинаковых условий работы эмиттеров (различное расстояние до базового контакта, влияние электрического режима работы соседних эмиттеров и др.).

Для выравнивания амплитуд эмиттерных токов потенциал на базовом контакте повышают в 2–3 раза в зависимости от числа эмиттеров, а в цепь каждого эмиттера включают выравнивающие резисторы, номиналы которых определяются в основном степенью удаления эмиттеров от базового контакта.

Для получения номиналов резисторов в предлагаемой программе МЭТ66К решается задача, обратная сформулированной выше задаче, когда потенциалы на i -х эмиттерах являются неизвестными величинами для некоторых значений индекса i , а известны величины токов эмиттеров. Предполагается, что резисторы включены между контактами к i -м эмиттерам и точкой с нулевым потенциалом. Третий этап работы программы МЭТ66К состоит в расчете токов через эмиттеры при заданных значениях номиналов резисторов и фиксированном значении потенциала на базовом контакте.

Программа МЭТ 66К написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6, используются диспетчер ДИСПАК, мониторная система "Дубна", библиотека LIBRARY 1. Длина программы 400 условных операторов, время расчета тестового варианта 30 мин для МЭТ с восемью эмиттерами.

А. А. Руденко

Программа двумерного анализа стационарного состояния МДП-конденсатора

УДК 621.319.4.049.774

Расчет вольт-фарадной характеристики МДП-конденсатора связан с необходимостью определения электростатического потенциала и распределения носителей заряда. Программа МДП12К предназначена для расчета стационарных распределений потенциала и носителей заряда в одномерной и двумерной структурах металл-диэлектрик-полупроводник (планарная и копланарная конструкции).

Постановка задачи заключается в следующем. Диэлектрик предполагается идеальным. Напряжение плоских зон приравнивается нулю. Считается, что в диэлектрике потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа, а в полупроводнике – уравнению Пуассона. На границе раздела диэлектрик-полупроводник полагаются справедливыми условия непрерывности электрической индукции. На контактах затвора и подложки задаются условия Дирихле.

Как показали результаты численных экспериментов, толщина диэлектрика и величина потенциала на затворе таковы, что математическая модель МДП-конденсатора должна учитывать вырождение газа свободных носителей заряда. В программе МДП12К учитывается вырождение электронного (p -подложка) газа. Считается, что концентрация дырок и электростатический потенциал связаны между собой соотношением Больцмана. Соответствующие поправки к распределению Больцмана для электронов вычислены из условия равновесия: градиент давления слабо вырожденного газа должен уравновешивать поток носителей в электрическом поле.

Таким образом, первоначально поставленная задача сводится к решению смешанной граничной задачи для системы нелинейных уравнений. Для решения полученных в результате аппроксимации разностных уравнений использовался итерационный алгоритм, основанный на квазилинеаризации, и метод прогонки.

При расчете равновесных распределений потенциала и носителей заряда в двумерном приближении решаются уравнения Лапласа и Пуассона в новых переменных: ϕ – электростатический потен-

циал, ψ_n, ψ_p – квазипотенциалы Ферми для электронов и дырок. В равновесном случае квазипотенциалы ψ_n, ψ_p являются константами и находятся из граничных условий. На части внешней границы поперечного сечения МДП-конденсатора, исключая границу раздела диэлектрик-полупроводник, считается выполненным условие Неймана.

Задача расчета распределения потенциала в окисле решается с помощью разложения по малому параметру

$$\delta = (d/L_d)^2,$$

где d – толщина диэлектрика; L_d – ширина затвора.

В этом случае распределение потенциала по оси x , направленной перпендикулярно плоскости затвора, представляет собой линейную функцию с точностью до членов первого порядка δ в разложении для потенциала. Следовательно, на границе раздела диэлектрик-полупроводник можно поставить такое же, как и для случая одномерной задачи, граничное условие.

Для решения уравнения Пуассона с экспоненциально-нелинейной правой частью в программе МДП12К использовался метод квазилинеаризации, сущность которого заключается в следующем.

Пусть для решения уравнения

$$\Delta \phi = f(\phi)$$

на s -й итерации имеется соответствующее приближение ϕ^s . Следующее приближение ϕ^{s+1} находится из линейного уравнения

$$\Delta \phi^{s+1} = f(\phi^s) + f'_{\phi}(\phi^s) (\phi^{s+1} - \phi^s).$$

После проведения квазилинеаризации уравнение Пуассона приводится к виду

$$-\epsilon^2 \Delta \phi^{s+1} + f_1(\phi^s) \phi^{s+1} = f_2(\phi^s),$$

где ϵ^2 – отношение длины Дебая к характерному линейному размеру МДП-структуры.

Полученное уравнение решается с помощью итерационного метода, основанного на продольно-поперечных прогонках. С целью ускорения сходимости использовался метод верхней релаксации.

В программе МДП12К предусмотрена возможность постановки граничного условия на части

внешней границы поперечного сечения МДП-конденсатора, исключая границу раздела диэлектрик-полупроводник, более точно отражающего физическую картину распределения потенциалов, чем условие Неймана:

$$\frac{d\phi}{dx} = f(y - L_d/2) \left(\frac{1}{d} \frac{\epsilon_d}{\epsilon_s} \phi - \frac{1}{d} \frac{\epsilon_d}{\epsilon_s} U_3 - \frac{Q_s}{\epsilon^2} \right),$$

$$\text{где } f(y) = 0,25 / \left[1 + \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_s} \cdot \frac{y}{d} \right)^2 \right];$$

y – пространственная координата; ϵ_d, ϵ_s – диэлектрические постоянные диэлектрика и полупроводника; U_3 – потенциал на затворе (потенциал подложки полагается равным нулю); Q_s – плотность поверхностного заряда).

Программа МДП12К написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6, используется диспетчер ДИСПАК, мониторная система "Дубна", библиотека LIBRARY 1. Длина программы – 400 условных операторов, время расчета тестового варианта для одномерного МДП-конденсатора составляет 2 мин, для двумерной структуры – 8.

А. А. Руденко

Программа расчета нестационарных распределений потенциала и носителей заряда в двумерной структуре МДП-конденсатора

УДК 621.382.01

Программа МДП2ДК предназначена для двумерного расчета нестационарных распределений потенциала и носителей заряда, необходимых для

определения динамической вольт-фарадной характеристики МДП-конденсатора.

Программа составлена с учетом следующих допущений относительно физической модели МДП-конденсатора. Диэлектрик считается идеальным. Напряжение "плоских зон" равно нулю. Для оксида решается уравнение Лапласа, для полупроводника – уравнение Пуассона и два уравнения непрерывности (для электронов и дырок). Учитывается ток смещения. Уравнения решаются в переменных: ϕ – электростатический потенциал; ψ_n, ψ_p – квазипотенциалы Ферми для электронов и дырок. На металлических контактах задаются граничные условия: на затворе – потенциал в функции от времени $\phi = U_3(t)$; на контакте к подложке (имеются в виду планарная и копланарная конструкции МДП-конденсатора) – потенциал подложки U_p (в данном случае $U_p \equiv 0$), а также условие, основанное на предположении о бесконечной скорости рекомбинации на границе раздела металл-полупроводник и квазинейтральности области полупроводника, прилегающей к металлическому контакту. На остальной части границы задаются нормальные составляющие плотностей потоков дырок и электронов

$$(j_p)_\eta = R_s, \quad (j_n)_\eta = R_s,$$

где η – внешняя нормаль к границе; R_s – скорость рекомбинации носителей на поверхности. Кроме того, на потенциал накладывается условие $\partial\phi/\partial\eta=0$.

В описании программы МДП12К уже рассматривался численный метод решения уравнений Лапласа и Пуассона в двумерной структуре МДП-конденсатора в равновесном состоянии, поэтому здесь рассмотрим методику решения уравнений непрерывности для дырок и электронов.

Для решения уравнения непрерывности для дырок использовалась идея расщепления по физическим факторам. При этом процесс переноса заряда в течение времени $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ расчленяется на три составляющие. Первая составляющая описывается уравнением

$$\frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{R}{p}$$

и учитывает изменение квазипотенциала ψ_p за

счет процессов генерации-рекомбинации со скоростью R и изменение электростатического потенциала ϕ . Вторая составляющая учитывает изменение квазипотенциала Ферми при переносе дырок в направлении оси x :

$$\frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial x} \mu_p p \frac{\partial \psi_p}{\partial x},$$

где μ_p – подвижность дырок; p – концентрация дырок.

Третья составляющая

$$\frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial y} \mu_p p \frac{\partial \psi_p}{\partial y}$$

учитывает изменение квазипотенциала Ферми в результате переноса дырок в направлении оси y . Таким образом, решение полного уравнения непрерывности для дырок

$$\frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{R}{p} + \frac{1}{p} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu_p p \frac{\partial \psi_p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_p p \frac{\partial \psi_p}{\partial y} \right)$$

сводится к последовательному решению более простых уравнений, полученных в результате расщепления.

Приведем алгоритм вычисления значений функций ϕ , ψ_n , ψ_p в момент времени t_{k+1} , если известны их значения в моменты времени t_{k-1} и t_k . Нулевое приближение для ϕ , ψ_n , ψ_p в момент времени t_{k+1} зададим в виде:

$$\phi_{k+1}^{(0)} = \phi_k + \frac{t_{k+1} - t_k}{t_k - t_{k-1}} (\phi_k - \phi_{k-1}).$$

Аналогичным образом задаются значения для $\psi_{pk+1}^{(0)}$, $\psi_{nk+1}^{(0)}$. Тогда первое приближение ψ_{pk+1} находится последовательным решением уравнений для первой, второй и третьей составляющей, причем необходимые в этом случае значения функций p , R , ϕ в момент времени $t = t_{k+1}$ бер-

утся из нулевого приближения. Аналогично вычисляется $\psi_{nk+1}^{(1)}$, затем решается уравнение Пуассона и находится $\phi_{k+1}^{(1)}$. Процесс определения новых приближений повторяется до достижения заданной точности вычислений. Если после некоторого определенного числа итераций заданная точность не достигается, то шаг по времени уменьшается и процесс вычислений повторяется снова.

Программа МДП2ДК написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6, используется диспетчер ДИСПАК, мониторинговая система "Дубна", библиотека LIBRARY1. Длина программы – 500 условных операторов, время расчета тестового варианта с числом узлов 30×20 составило 30 мин.

А.А.Руденко

Программа расчета динамики заряда в ячейке ПЗС с поверхностным каналом

УДК 621.3.049.779.001.24

Многотактные ПЗС с поверхностным переносом заряда нашли самое широкое применение при разработке экономичных микроэлектронных цифровых и аналоговых устройств. Поэтому интерес к моделированию физических процессов в таких структурах постоянно растет. Трудности, связанные с численной реализацией на ЭВМ известных физических моделей [1], приводят к тому, что задачи количественной оценки характеристик элементарных ячеек ПЗС сводятся или к исследованию распределения поверхностного потенциала, или к решению отдельно взятого уравнения непрерывности для подвижных носителей заряда в предположении, что поверхностный потенциал является известной функцией потенциалов на электродах (затворах) прибора. Кроме того, анализируется, как правило, квазистатический режим работы ПЗС.

Предлагаемая программа реализует математи-

ческую модель и метод расчета характеристик ячейки трехтактного ПЗС с учетом реального временного тактирования и динамики процесса перезарядки поверхностных состояний, позволяющих в пределах общепринятых допущений относительно физической модели прибора осуществить объединение указанных подходов [2].

Основу математической модели ячейки ПЗС составляет следующая система уравнений: уравнение Пуассона для электростатического потенциала, которое в каждый расчетный момент времени решается методом функций Грина в двумерном поперечном сечении ячейки ПЗС с учетом зарядов в канале прибора и на его электродах; уравнение непрерывности для подвижных носителей заряда в одномерном канале; кинетическое уравнение, описывающее процессы перезарядки ловушечных центров. Уравнение непрерывности и кинетическое уравнение решаются с помощью методов конечных разностей, использующих прогонку, с автоматическим выбором временного шага. Ширина канала определяется из решения задачи об одномерном МДП-конденсаторе.

В состав исходной информации для программы входят геометрические и физические характеристики ячейки ПЗС, параметры тактовых импульсов, характеристики разностной сетки, число ячеек в регистре. В результате расчета определяется динамика изменения полного заряда в ячейке (или регистре) ПЗС, а также строятся графики распределения плотности заряда и потенциала в моменты времени, определяемые характерными параметрами тактовых импульсов.

Программа ППЗСДК составлена на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Длина программы — 550 условных операторов. Объем ОЗУ — 32 листа. Время расчета тестового варианта (одна ячейка, длительность импульса ~ 400 нс) составляет ~ 20 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Приборы с зарядовой связью — новое направление микроэлектроники. — "Зарубежная электронная техника", 1972, № 13.
2. Авдеев Е.В., Миргородский Ю.Н., Потапова В.И., Руденко А.А. Моделирование на ЭВМ характеристик ячейки трехтактного ПЗС с поверхностным переносом заряда. — В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Вып. 3. М., "Сов. радио", 1978.

**Е. В. Авдеев, Ю. Н. Миргородский,
В. И. Потапова, А. А. Руденко**

Комплекс программ расчета параметров статических моделей интегральных диодов и транзисторов по вольт-амперным характеристикам

УДК 621.382.2/3.049.77

В системе автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем имеется ряд задач, связанных с идентификацией параметров моделей активных элементов, которые используются при расчете принципиальных электрических схем, статистическом анализе и оптимизации. Задача расчета неизвестных параметров моделей формулируется в общем случае как задача нелинейного программирования [1], состоящая в минимизации склонений синтезированных по модели элемента электрических характеристик от заданных.

В предлагаемом комплексе используются модели типа Эберса—Молла, формально модифицированные с целью учета зависимости нормального коэффициента усиления от режима работы транзистора. Характеристики диодов и двух- или трехпереходных транзисторов с изоляцией окислом или *p-n* переходом получают по специальной методике на основе измерения тестовых образцов или с помощью численного решения задач физического моделирования в режимах отсечки, нормальном, инверсном и насыщения для основного *n-p-n* и паразитного *p-n-p* транзисторов.

В пакете исходных данных содержится паспорт образца: описание технологии, топологии, условий изготовления и измерения; величины токов и напряжений в различных режимах; специальные параметры, управляющие режимом обработки и формированием выходных документов. Кроме параметров моделей диодов, а также трех- и четырехслойных транзисторов, рассчитываются параметры аппроксимации зависимости коэффициента усиления от тока эмиттера и некоторые вторичные параметры, характеризующие токовые и усилительные свойства прибора.

Начальные приближения по каждому параметру модели в задаче нелинейного программирования определяются автоматически с использованием априорных и асимптотических оценок. Ограничения используются только для исключения аварийных ситуаций в процессе поиска решения на ЭВМ. Используются целевые функции, минимаксные по отношению к некоторым спрямляющим нелиней-

ным преобразованиям токов. Необходимость в преобразованиях токов объясняется большим диапазоном (более десяти порядков) изменений токов для различных типов приборов и для различных режимов одного и того же прибора. Комплекс ориентирован на использование программного пакета оптимизации MINEBK и использует методы логической оптимизации SIMMIK и ROZMIK [2].

Для контроля результатов по всем типам обрабатываемых приборов синтезируются для сравнения вольт-амперные характеристики, как для нормальных и инверсных режимов, так и для режима насыщения. В программах статистического анализа используется режим накопления результатов через общие блоки с отключением печати отдельных выходных документов.

Программный комплекс написан на языке ФОРТРАН и ориентирован на мониторную систему "Дубна" для ЭВМ БЭСМ-6 и диспетчер ДИСПАК. Длина комплекса около 1000 операторов. Среднее время работы на один прибор 20 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврашков П.П., Баталов Б.В., Соколов А.Г. Определение параметров модели транзистора. — "Микроэлектроника", 1974, вып. 4.
2. Розеброк Х., Стори С. Вычислительные методы для инженеров-химиков. М., "Мир", 1972.

Е. В. Авдеев

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИМС

Программа детерминированной оптимизации логических биполярных ИС

УДК 621.382.8.001.2

Программа предназначена для оптимизации переключательных интегральных схем, содержащих биполярные транзисторы, диоды и линейные эле-

менты. Критерии оптимизации и ограничения на электрические параметры схемы определяются пользователем и записываются на входном языке программы. Допускается как максимизация одного электрического параметра схемы, так и оптимизация по максимумному критерию (максимизация запасов работоспособности) [1]. В качестве электрических параметров схемы могут быть выбраны напряжения и токи любой ветви, задержки и фронты выходных импульсов, а также арифметические выражения, составленные из переменных величин, параметров элементов схемы и констант.

К параметрам оптимизации можно отнести сопротивления, емкости, площади эмиттерных переходов транзисторов и площади переходов диодов. Максимальное число параметров оптимизации — 20, узлов принципиальной схемы — 80.

Основные вычислительные алгоритмы, используемые в программе, описаны в работе [2]. Программа написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6 и входит в состав математического обеспечения системы расчета ИС САМРИС-2. Входная информация о моделях элементов, принципиальной схеме и задания на расчет записываются на специализированном входном языке системы САМРИС-2. Время расчета зависит от размера схемы, числа параметров оптимизации и числа шагов поиска экстремума.

Для схем с числом элементов 40—80 время оптимизации составляет 20—60 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И.П., Иванов С.Р., Мулярчик С.Г. Оптимизация параметров электронных схем по критерию запаса работоспособности. — "Вестник БГУ. Сер. 1", 1970, № 3.
2. Баталов Б.В., Егоров Ю.Б., Соколов А.Г. Алгоритм расчета оптимальных параметров фрагмента БИС. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1975.

Ю.З. Горбунов, Ю.Б. Егоров,
А.В. Федьинский

Программа анализа ИС

УДК 621.381.2

Предназначена для статического и динамического анализа элементов ИС: резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников тока, источни-

ков напряжения (постоянные, импульсные и синусоидальные), двух- и трех-переходных транзисторов, многоэмиттерных транзисторов, транзисторов Шоттки, МДП-транзисторов, полевых транзисторов, диодов. Кроме того, в программе предусмотрена возможность моделирования статических и динамических характеристик элементов, эквивалентные схемы которых составлены из резисторов, конденсаторов, индуктивностей, диодов и зависимых источников тока. Для удобства эксплуатации в программе предусмотрена возможность пофрагментного ввода частей схемы, их ассоциативное описание и редактирование.

Математическая модель схемы формируется методом узловых потенциалов. Ее решение в статическом режиме может быть найдено модифицированным методом Ньютона [1] с использованием нелинейных моделей активных элементов или модифицированным методом Кацнельсона [2] с применением кусочно-линейных аппроксимаций вольт-амперных характеристик нелинейных элементов. В динамическом режиме модель решается неявными методами интегрирования.

Системы линейных уравнений решаются с учетом разреженности матриц. В зависимости от структуры заполнения матрицы реализуется метод почти ленточных матриц или метод циклической индексации при произвольном заполнении матрицы. Исходная информация для анализа задается на специализированном входном языке, ориентированном на разработчика электронных схем. Максимальное число узлов анализируемой схемы зависит от набора используемых моделей и лежит в пределах от 50 до 300.

Текст программы написан на алгоритмическом языке ФОРТРАН для БЭСМ-6. Время анализа схемы, содержащей 189 узлов и 155 элементов, составило 9 мин. для статического режима и 22 мин для динамического.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврашков П.П., Немудров В.Г. Моделирование на ЭВМ статических характеристик элементов малосигнальной транзисторной логики. — "Микроэлектроника". Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
2. Chien M.G., Kuk E.S. Solving piecewiselinear equations for resistive networks. — In: Circuit Theory and Applications, 1976, vol. 4, N 1.

П. П. Аврашков, Ю. Н. Беляков,
Ю. Б. Егоров, А. В. Федьинский

Программа детерминированного анализа и оптимизации ИС в статическом режиме

УДК 621.382.8.001.2:681.3.004

Предназначена для проведения детерминированного анализа и оптимизации в статическом режиме принципиальных схем ИС операционных усилителей, компараторов напряжения и других типов ИС, состоящих из биполярных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, независимых и управляемых источников тока и напряжения. Сложность моделируемых схем ограничена 170 узлами и 80 транзисторами. При разработке программы использовались результаты работ [1,2]. Для описания транзистора применяется модифицированная модель Эберса-Молла [3,4], учитывающая зависимость коэффициентов передачи тока от уровня инжекции и влияние эффекта Эрли.

Программа входит составной частью в разрабатываемую автоматизированную подсистему моделирования ИС на ЭВМ серии ЕС, в которой предусматривается проведение детерминированного и статистического расчетов и оптимизации в статическом, динамическом и частотно-шумовом режимах анализа. Составлена программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН IV ОС ЕС (версия 4.0), предназначена для реализации на ЭВМ ЕС-1022 с объемом ОЗУ не менее 256 кбайт.

Описание анализируемой ИС осуществляется с помощью форматного входного языка, аналогичного описанному в работе [2]. В программе предусмотрена развитая система диагностики ошибок в информации о схеме, виде расчета, выводе результатов, осуществляющая проверку всей исходной информации.

При обнаружении любой ошибки осуществляет распечатку сообщения, облегчающего ее поиск и устранение.

Система схемных уравнений при проведении анализа в статическом режиме формируется методом переменных состояния. Полученная система схемных уравнений решается методом минимизации по запросу. Минимизируется функционал

$$F = \sum_{i=1}^{MEZG} I_{ci}^2,$$

где I_{ci} — токи через емкости открытых $p-n$ переходов моделей транзисторов и диодов схемы; $MEZG$ — число независимых переменных.

Решение системы схемных уравнений, т.е. определение токов в ветвях анализируемой ИС и потенциалов в ее узлах, является промежуточным результатом работы программы. При задании режима анализа пользователь описывает состав и порядок вывода окончательных результатов.

Существуют два уровня обработки промежуточных результатов анализа: функции (операнды и действия над ними); функционалы (функции и действия над ними).

К операндам относятся потенциалы в любых узлах схемы, падения напряжения на любых двухполюсниках и токи через любые двухполюсники схемы, ранее описанные функции. Допускается умножение операнда на коэффициент. К допустимым действиям над операндами можно отнести сложение, вычитание, умножение, деление, вычисление десятичного и натурального логарифмов, взятие экспоненты.

Примерами функционалов могут служить максимум и минимум функции, значение функции при заданном значении аргумента и т.д. При необходимости библиотеки функционалов можно легко расширить. Окончательные результаты выводятся в виде таблиц и (или) графиков.

Для оптимизации принципиальной схемы ИС в статическом режиме принята максиминная постановка задачи [5, 6], когда требуется максимизировать минимальный из запасов работоспособности функциональных параметров ИС, т.е. определить максимум функции

$$z(\omega) = \min_{i \in [1:n]} \{ z_i(\omega) \},$$

где $z_i(\omega)$ — запас работоспособности i -го функционального параметра ИС; ω — вектор изменяемых номиналов компонентов ИС. Составляющие этого вектора $\omega^{(j)}$ должны удовлетворять ограничениям

$$a_j \leq \omega^{(j)} \leq b_j, \quad j \in [1:m].$$

Вектор ω формируется из номиналов (числом не более 20) любого компонента (компонентов) рассматриваемой ИС. Запасы $z_i(\omega)$, максимальное число которых не должно превышать 30, рассчитываются по формулам, приведенным в работах [5, 6]. В качестве оптимизируемых параметров используются описанные выше функционалы. Решение задачи оптимизации осуществляется по оригинальным алгоритмам, разработанным с использованием результатов работ [5, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аринь Э. И., Гринберг Э. Я., Кацнельсон Л. З. Автоматизированная система анализа моделей схем на языке ФОРТРАН (АСАМС-Ф). Ч. 1–3, Рига, ЛГУ им. П. Стучки, 1972.
2. Гринберг Э. Я., Кацнельсон Л. З. Моделирование интегральных схем на ЭВМ. — "Лат. мат. ежегодник", 1977, №21.
3. Малахов В. Ф., Мамонтов В. В., Рожукалнс П. П., Розе Р. Ф., Стренге Д. Ф. Моделирование биполярного транзистора для программ анализа линейных МИС. — В кн.: Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры. Вып. 1, Рига, 1974 (РПИ).
4. Кацнельсон Л. З., Мамонтов В. В., Малахов В. Ф., Рожукалнс П. П., Стренге Д. Ф. Применение модели переноса биполярного транзистора в программе анализа интегральных схем. — В кн.: "Радиотехника и электросвязь". Вып. 4, Рига, 1977.
5. Норенков И. П., Мулярчик С. Г., Иванов С. Р. Экстремальные задачи при схемотехническом проектировании в электронике". Минск, БГУ им. В. И. Ленина, 1976.
6. Анисимов Б. В., Белов Б. И., Норенков И. П. Машинный расчет элементов ЭВМ. М., "Высшая школа", 1976.
7. Демьянов В. Ф., Малоземов В. Н. "Введение в минимакс". М., "Наука", 1972.

**А. А. Ванагас, Л. Э. Кацнельсон,
Е. С. Кельман, В. А. Кузьмин**

Программа статистического анализа интегральных схем

УДК 621.382.3.049.77

Предназначена для решения задачи статистического анализа интегральных схем методом Монте-Карло. В процессе работы программы вычисляются основные статистические характеристики электрических параметров схемы [1, 2]: математические ожидания, средние квадратичные отклонения и доверительные интервалы при требуемых уровнях значимости. Строятся гистограммы, определяются коэффициенты корреляций между электрическими параметрами и вероятности выхода годных по каждому параметру, а также результирующая вероятность выхода годных с доверительными интервалами при требуемых уровнях значимости.

К электрическим параметрам можно отнести напряжения и токи любой ветви, задержки и фронты выходных импульсов, а также арифметические

выражения, составленные из перечисленных выше величин, параметров элементов схемы и констант.

Исходные данные о номиналах параметров эквивалентных моделей элементов, принципиальной электрической схеме, задании на расчет и статистическая информация о распределениях параметров моделей элементов записываются на специализированном входном языке. Предусмотрено задание исходной статистической информации по параметрам элементов в виде таблиц исходных данных, получаемых, например, по результатам измерений параметров элементов на тестовых структурах; в форме гистограмм с одновременным заданием корреляционной матрицы; в комбинированном виде — таблицы, гистограммы и дополняющая корреляционная матрица [3].

Кроме того, можно задать математические ожидания и средние квадратичные отклонения параметров элементов в предположении, что последние распределены по нормальному закону.

Время расчета определяется общим числом статистических испытаний по методу Монте-Карло (порядка 100–200) и временем расчета программы анализа статического или динамического режимов работы схемы.

В программе статистического анализа можно учесть до 200 узлов электрической схемы, ~400–500 элементов в схеме и до 100 параметров элементов схемы, которые могут быть описаны как случайные.

Под элементами схемы понимаются резисторы, конденсаторы, индуктивности, источники тока, источники напряжения (постоянные, импульсные, синусоидальные), диоды, транзисторы (двух и трехпереходные, многоэмиттерные, с диодом Шоттки, МДП, многоэмиттерные с диодом Шоттки).

Программа составлена на языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6 и включена как подсистема в общую систему автоматизированного расчета интегральных схем САМРИС-2. Блок моделирования случайного вектора содержит 1400 условных операторов. Моделирование набора 50 случайных векторов с размерностью 20 составляет примерно 1,5 мин. Время статистического анализа схемы (полное время) определяется в основном подпрограммой статического или динамического анализа самой схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баталов Б.В., Казеннов Г.Г., Котко А.П., Руденко А.А. Алгоритм статистического анализа электронных схем. — "Сб. научных трудов по проблемам микроэлектроники. Физ. мат. серия", 1972, вып. 9.
2. Казеннов Г.Г., Баталов Б.В., Беляков Ю.Н., Соколов А.Г., Шемелинин В.М. Машинное проектирова-

ние интегральных полупроводниковых схем. — "Обзоры по электронной технике. Сер. "Микроэлектроника", 1972, вып. 5.

3. Баталов Б.В., Беляков Ю.Н., Котко А.П., Курмаев Ф.А. Моделирование зависимых случайных величин с реально существующим законом совместного распределения в задачах статистического анализа интегральных схем. — В кн.: Современные методы разработки РЗА. МДНТП им. Дзержинского, 1977.

Ю. Н. Беляков, Ф. А. Курмаев,
И. В. Москаленко

АНАЛИЗ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ИМС

Комплекс программ расчета и оптимизации частотной характеристики двухпроводного участка связанных линий

УДК 681.3.06:621.391.001.24

Предназначен для оптимизации конструктивных размеров двухпроводного участка связанных полосковых линий передачи по заданным электрическим характеристикам для монохроматического сигнала, а также для расчета частотных характеристик по заданным конструктивным и электрическим параметрам.

Расчет частотных характеристик ведется в линейном приближении с использованием матричных телеграфных уравнений [1]. Для оптимизации конструктивных параметров использован алгоритм Х. Розенброка, основанный на методе вращающихся координат [2]. С помощью программного комплекса рассчитываются параметры конструкции, имеющей вид симметричной или несимметричной полосковой линии передачи. Допускается учет экрана [3].

Комплекс позволяет учесть наличие потерь в проводниках и подложке, а также использование произвольных комплексных нагрузок. Комплекс программ написан на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Длина комплекса — около 1000 условных операторов. Время расчета одного варианта частотной характеристики ~2 мин. Время расчета с оптимизацией конструктивных параметров ~6 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Е.В., Вашакидзе Ю.Н., Шербаков В.Е. Расчет межсоединений многокристалльных БИС. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
2. Розенброк Х., Стори С. Вычислительные методы для инженеров-химиков. М., "Мир", 1972.
3. Авдеев Е.В., Потапова В.И. Расчет параметров открытых полосковых волноводов с двуслойным диэлектриком. — "Радиотехника", 1973, т. 28, № 1.

Ю. Н. Вашакидзе, В. В. Меняйленко

Программа расчета матрицы передачи участка многопроводных связанных линий

УДК 681.3.06:621.391

Предназначена для расчета матрицы передачи участка связанных многопроводных линий при распространении монохроматического сигнала. Входными параметрами служат: матрицы погонных индуктивностей, емкостей, проводимости и потерь в проводниках, длина участка связи и круговая частота. Матрица передачи вычисляется не более чем для десяти проводников.

Расчет матрицы передачи основан на вычислении собственных функций, описывающих распространение электромагнитных волн в многопроводной линии передачи с различными фазовыми скоростями [1–2].

Время расчета одного варианта зависит от числа проводников и составляет доли минуты. Если потери в проводниках и среде отсутствуют, время расчета уменьшается в 3–5 раз.

Результатом расчета является комплексная матрица размером $2N \times 2N$, где N — число проводников.

Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Длина ее составляет 220 условных операторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Е.В., Вашакидзе Ю.Н., Шербаков В.Е. Расчет межсоединений многокристалльных БИС. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.
2. Вашакидзе Ю.Н. Машинный анализ межсоединений интегральных и гибридных схем сверхбыстродействующей логики с учетом их взаимного влияния. — "Управляющие системы и машины", 1977, № 6.

Ю. Н. Вашакидзе, В. В. Меняйленко

Комплекс программ расчета перекрестных наводок в межсоединениях сверхбыстродействующих логических схем

УДК 621.3.049.776.001.24

Программный комплекс предназначен для расчета временных задержек, искажений и перекрестных наводок импульсных и монохроматических сигналов при распространении их по межсоединениям гибридных и полупроводниковых сверхбыстродействующих схем.

Комплекс обеспечивает расчет модуля коэффициента передачи по напряжению и коэффициента передачи по мощности в зависимости от частоты между произвольными выводами (полюсами) фрагмента межсоединений. Расчет погонных индуктивностей и емкостей межсоединений в виде многопроводных микрополосковых линий передачи осуществляется для произвольного взаимного расположения проводников в среде, состоящей не более чем из двух разных диэлектриков. Допускается учет экрана [1].

Комплекс позволяет учесть распределенный характер межсоединений, включение сосредоточенных элементов в произвольном сечении, произвольное расположение генераторов сигналов и линейных комплексных нагрузок в граничных сечениях, наличие потерь в материале подложки и проводниках.

Спектральные амплитуды монохроматического сигнала на полюсах рассчитываются в результате решения системы матричных телеграфных уравнений с линейными граничными условиями. Прохождение импульсного сигнала по межсоединениям рассчитывается методом гармонического анализа [2].

Комплекс не предусматривает возможности учета разветвлений (объединений) проводников, число проводников не должно превышать десяти.

Программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ БЭСМ-6. Длина комплекса около 1500 условных операторов.

Форма выдачи результатов — таблицы и графики зависимостей:

$$U = \phi_{t, HC} \quad \text{— для импульсного сигнала;}$$

$$\left. \begin{aligned} |U| = F(f, \text{МГц}) \\ K_p, \text{дБ} = \phi(f, \text{МГц}) \end{aligned} \right\} \text{— для частотной характеристики.}$$

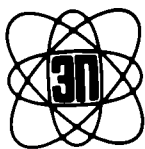
Время расчета одного варианта зависит от числа проводников и числа сечений с сосредоточенными элементами и составляет от долей до единиц минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Е.В., Потапова В.И. Расчет параметров открытых полосковых волноводов с двухслойным диэлектриком. — "Радиотехника", 1973, т. 28, № 1.

2. Авдеев Е.В., Вашакидзе Ю.Н., Шербаков В.Е. Расчет межсоединений многокристалльных БИС. — В кн.: Микроэлектроника. Вып. 9. М., "Сов. радио", 1976.

Ю.Н. Вашакидзе, В.И. Потапова



ЭП



РЕКЛАМА

НОВЫЕ КНИГИ

М., "Мир", 1979 г.

СТРУКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРОГРАММ

Э. Йодан

Пер. с англ. 28 л., 20000 экз.

Обсуждаются принципы и методы структурного программирования, позволяющие получать надежно работающие и хорошо документированные программы. Излагаются конструктивные стратегии разработки относительно просто выполняемых и обслуживаемых модульных программ, особенности и стиль модульного и структурного программирования, методы испытания программ и возможные пути их отладки. Подробно разбираются так называемый нисходящий подход к построению программ и его варианты.

ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ.

Т. Прагг

Пер. с англ. 34 л., 25000 экз.

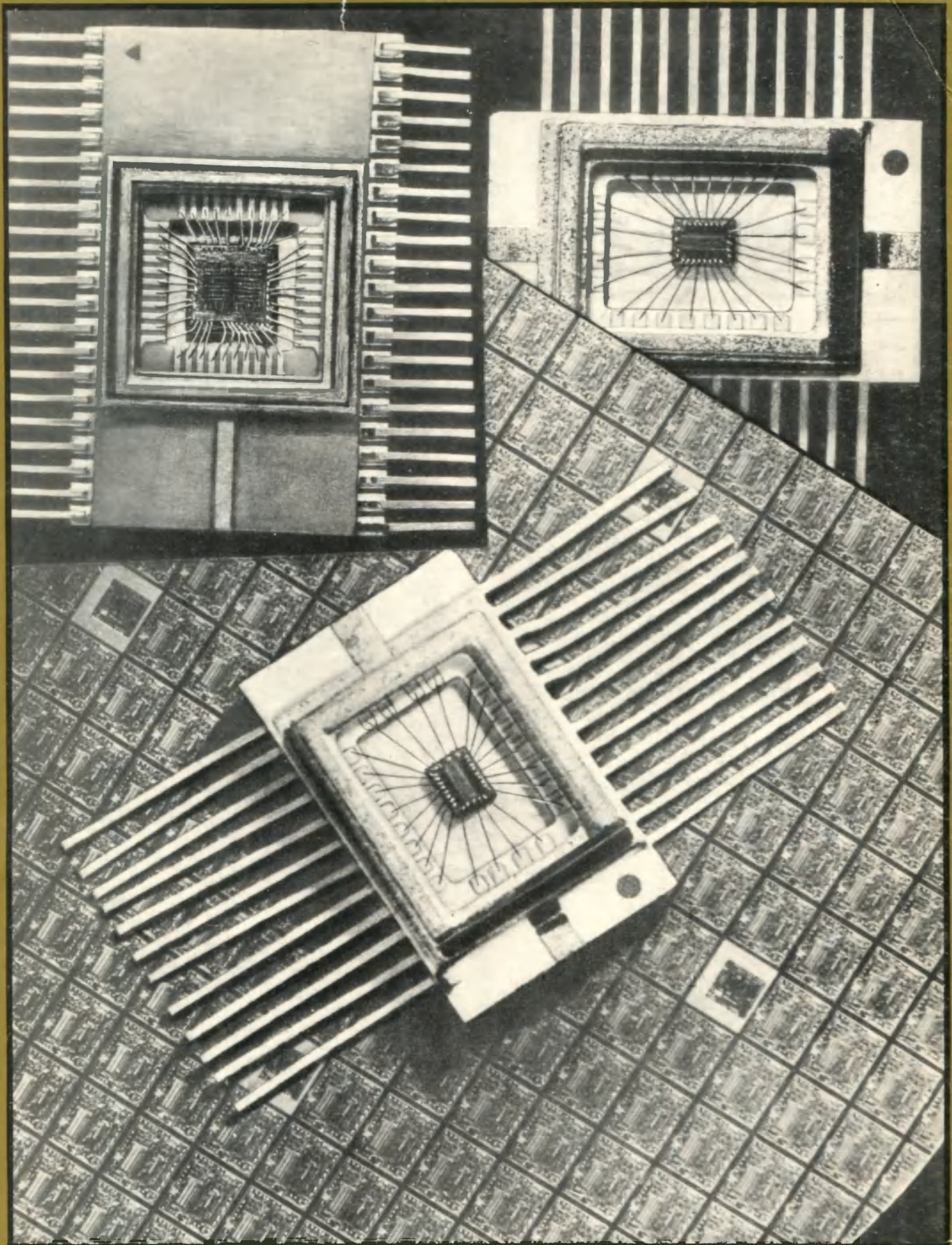
Дано систематическое изложение языков программирования. Вводится система понятий и критериев, позволяющих исследовать различные языки с единой точки зрения. Главное внимание уделяется семантике языков, т.е. структурам данных, операциям, структурам управления и организации памяти. Рассматриваются семь наиболее распространенных языков программирования: Фортран, Алгол-60, Кобол, ПЛ/1, Лисп, Снобол-4, АПЛ.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И ИХ АППРОКСИМАЦИИ

Ю. Люк

Пер. с англ. 32 л., 25000 экз.

В справочнике содержатся таблицы специальных математических функций, приспособленные для использования на ЭВМ и занимающие минимальный объем памяти. Для каждой функции приводится краткий перечень необходимых определений и формул, коэффициенты аппроксимаций. Представлены обобщенные гипергеометрические, гауссовские гипергеометрические функции, функции Бесселя, Ломмеля, Струве и др. Библиография содержит более 600 названий.



На первой и четвертой страницах обложки: фрагменты участка машинного проектирования интегральных микросхем (см. статью на с. 3).

Ответственные за выпуск *Е. А. Засядько, Л. В. Семенова*
 Художник *В. А. Чернецов* Технический редактор *Г. М. Корнеева*
 Цветные фото *Б. В. Борисевича*
 Корректоры *А. В. Смирнова, Л. П. Дашченкова*



Подписано в печать 26.11.1979 г.
 Т-07015 Формат 60x90/8 Объем 12,5 п. л.
 Уч-изд. л. 11,5 Индекс 3833 31 статья, 9 реф.
 Заказ 164 Тираж 3800 Цена 2 руб. 90 коп.

Г. Кузнецов

ЕС-1033

