

Э. Н. ВОРОНКОВ

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ПРАКТИКУМ

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации
по образованию в области радиотехники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Электроника и микроэлектроника»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.85я73

В753

Рецензенты:

зав. кафедрой биомедицинской и полупроводниковой электроники
Рязанского государственного радиотехнического университета,
Заслуженный деятель науки РФ, проф., д-р физ.-мат. наук *С. П. Вихров*;
доц. кафедры микроэлектроники СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», канд. техн. наук
О. А. Изумрудов

Воронков Э. Н.

В753 Твердотельная электроника. Практикум : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Э. Н. Воронков. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 128 с.

ISBN 978-5-7695-4218-3

Практикум предназначен для закрепления теоретического материала по курсу «Твердотельная электроника». Расчетный раздел практикума посвящен применению моделей твердотельных элементов в расчетах и компьютерном эксперименте. В экспериментальном разделе рассмотрены лабораторные работы, в которых выполняются измерение характеристик полупроводниковых приборов, определение параметров их моделей, сравнение результатов расчета и эксперимента, оценка точности моделей.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.85я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Воронков Э. Н., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-4218-3

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Общие свойства моделей	9
1.1. Основные понятия	9
1.2. Математическое моделирование	10
1.3. Имитационное моделирование	12
Глава 2. Основные особенности современного эксперимента	15
2.1. Общие характеристики эксперимента	15
2.2. Планирование эксперимента, оценка его результата	17
Глава 3. Общие методические рекомендации	20
3.1. Организация практикума, рекомендации по его выполнению	20
3.2. Расчетные инструменты	22
3.3. Инструменты моделирования	26
3.4. Измерительные инструменты	39
3.5. Подготовка к работе и защита ее результатов	42
3.6. Отчеты	43
Глава 4. Расчетные упражнения. Компьютерный эксперимент	44
4.1. Свойства волновых функций. Электрон в потенциальной яме	44
4.2. Электрические свойства кристаллов	49
4.2.1. Электропроводность полупроводников	49
4.2.2. Тепловая обратная связь в полупроводниковом образце. Термистор	61
4.3. Моделирование характеристик полупроводниковых приборов	65
4.3.1. Расчет полупроводникового диода с $p-n$ -переходом. Физическое моделирование	65
4.3.2. Расчет характеристик диодов с $p-n$ -переходом. Схемотехническое моделирование	70
4.3.3. Расчет статических характеристик биполярного транзистора. Схемотехническое моделирование	74
4.3.4. Расчет статических характеристик полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом. Физическое моделирование	76
4.3.5. Расчет статических характеристик полевого транзистора со структурой металл—диэлектрик—полупроводник (МДП). Физическое моделирование	84

Глава 5. Экспериментальное изучение полупроводниковых приборов	92
5.1. Программно-аппаратный измерительный комплекс	92
5.2. Методика выполнения работ с использованием измерительного комплекса	98
5.3. Полупроводниковые диоды. Задание и методика выполнения работы «Изучение статических вольт-амперных характеристик диодов»	101
5.4. Биполярные транзисторы	109
5.4.1. Задание и методика выполнения работы «Изучение статических вольт-амперных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой»	109
5.4.2. Задание и методика выполнения работы «Изучение статических вольт-амперных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером» ..	112
5.5. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом. Задание и методика выполнения работы «Изучение статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом»	116
5.6. МДП-транзисторы. Задание и методика выполнения работы «Изучение статических вольт-амперных характеристик МДП-транзисторов»	118
Приложения	121
Список литературы	124
Интернет-ресурсы	126

Учебное издание

Воронков Эдуард Николаевич

Твердотельная электроника. Практикум

Учебное пособие

Редактор *Е. М. Зубкович*. Технический редактор *О. Н. Крайнова*.
Компьютерная верстка: *Е. Ю. Матвеева*. Корректор *И. В. Могилевец*

Изд. № 101112040. Подписано в печать 30.10.2009. Формат 60×90/16. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,0. Тираж 1 000 экз. Заказ №

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru

125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 26б.

Адрес для корреспонденции: 129085, г. Москва, пр-т Мира, д. 101в, стр. 1, а/я 48.

Тел. 8(495)648-05-07, факс 8(495)616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.60.953.Д.007831.07.09 от 06.07.2009.

Отпечатано в полном соответствии с качеством диапозитивов, представленных издательством в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат». www.sarpk.ru
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Твердотельная электроника» в рамках программы подготовки бакалавров по направлению «Электроника и микроэлектроника». Уровень излагаемого материала ориентирован на читателя, знакомого с основами математики, физики и электротехники в объеме первого и второго курсов технического университета. Одна из задач пособия заключается в демонстрации методов, позволяющих получать числовые результаты, пригодные для оценки функциональных возможностей различных твердотельных элементов. Цель выполняемых расчетов заключается не в том, чтобы заставить студента заучить конкретные формулы или последовательность операций при использовании программных средств, а в том, чтобы дать ему возможность ощутить могущество созданных человеком расчетных и экспериментальных методов. Именно восхищение перед мощью научной и инженерной мысли позволяет учащемуся сделать первый шаг на пути к освоению специальности.

Формирование современного специалиста немислимо без исследования реальных объектов и сравнения экспериментальных и расчетных результатов, полученных по описывающим объект моделям. Поэтому практикум по твердотельной электронике можно рассматривать как одну из важнейших составляющих подготовки специалиста по твердотельной электронике.

Учебное пособие в значительной степени опирается на применение компьютерных технологий, что требует адаптированной к ним методики обучения. Выработка такой методики на основе имеющегося опыта составляет одну из задач практикума.

Материал учебного пособия содержит следующие основные разделы: введение в моделирование и построение современных измерительных средств, расчетный практикум, экспериментальный практикум. Расчетный практикум посвящен применению изученных в теоретическом курсе моделей в расчетах и компьютерном эксперименте. В разделе экспериментального практикума рассмотрены лабораторные работы, в которых выполняются измерения характеристик полупроводниковых приборов, определение параметров их моделей, сравнение результатов расчета и экспе-

римента, оценка точности моделей. Этот раздел направлен на выработку навыков работы с современными измерительными средствами, оценки достоверности результатов измерения и использованных при их обработке моделей.

При подготовке практикума особое внимание было уделено выбору расчетных моделей и доступных измерительных средств. При выборе модели основными критериями были адекватность модели и подробность ее рассмотрения в теоретическом курсе. При выборе измерительных средств помимо стоимости и доступности аппаратуры принималась во внимание возможность ее использования при удаленном доступе, в том числе и через Интернет.

Автор выражает глубокую признательность Ю. В. Арбузову, С. И. Маслову и всем сотрудникам политехнической Интернет-лаборатории МЭИ, предоставившим в его полное распоряжение программно-аппаратный комплекс «PILab. Полупроводниковые диоды и транзисторы» и оказывавшим постоянную поддержку при модернизации и эксплуатации комплекса. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «Полупроводниковая электроника» МЭИ, принявшим активное участие в постановке практикума и отработке методики его применения в учебном процессе. Особую благодарность автор выражает бывшим аспирантам МЭИ А. Р. Файрушину и И. С. Савинову, участвовавшим в разработке аппаратной и программной части измерительного комплекса, а также Ю. В. Ануфриеву, выполнившему тестирование измерительного комплекса и использованных в нем моделей. Автор признателен преподавателям Е. В. Зеновой, В. Н. Макарову, И. Н. Мирошниковой, О. Б. Сарач, Н. А. Чарыкову, А. С. Шнитникову, которые первыми применили данный практикум, а также студентам, предоставившим свои отчеты для демонстрации примеров.

ВВЕДЕНИЕ

Современный специалист в области твердотельной электроники должен быть хорошо знаком с методами расчета и испытания полупроводниковых приборов. В настоящее время основные инструменты расчета и эксперимента базируются на применении компьютерных технологий. Работа с ними требует не только знаний, но и определенного стиля мышления, для выработки которого необходимы время и практический опыт. Приобретение последнего начинается с учебного практикума.

Современное электронное производство немислимо без широкого использования программно-аппаратных комплексов, основанных, с одной стороны, на современных измерительных средствах, с другой стороны — на описании объектов (моделях), в соответствии с которым строится программа той или иной операции, реализуемой при применении, испытании или разработке конкретного электронного изделия. Конечным результатом любой инженерной задачи на стадии разработки и испытания является обеспечение минимальных расхождений между поведением объекта и описывающей его модели.

Функционирование любой технической системы определяется процессами, приводящими к изменению состояния ее элементов. При этом элементы и процессы описываются собственными моделями. Существует вполне определенная иерархия моделей, на верхнем уровне которой находится описание поведения всей системы. Усложнение системы и появление новых типов коллективного взаимодействия при переходе с уровня на уровень делают невозможным описание высокоуровневого объекта в рамках моделей нижнего уровня либо делают такое описание чрезвычайно сложным. Вследствие этого модели верхнего уровня строятся на некоторых обобщенных функциональных переменных, являющихся результатом использования моделей нижнего уровня. В применении к твердотельной электронике иерархическая цепочка выглядит примерно так, как это показано на рис. В.1. В соответствии с указанной иерархией строится теоретический курс по твердотельной электронике. Для него начальным элементом иерархии является полупроводниковый кристалл, конечным — полупроводниковый прибор, поэтому

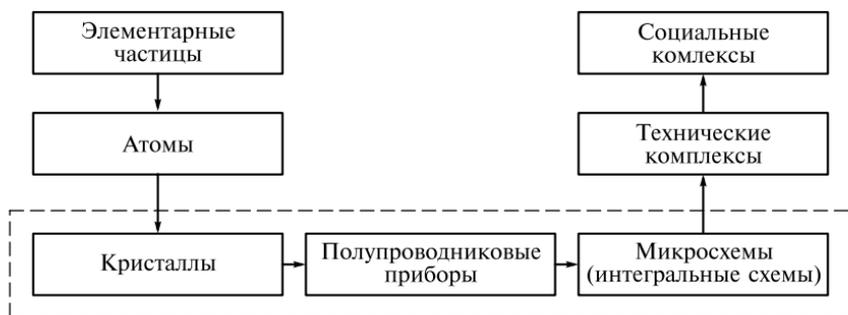


Рис. В.1. Иерархия объектов моделирования (штриховой рамкой выделены объекты, изучаемые в курсе твердотельной электроники и смежных курсах)

обобщенные характеристики полупроводниковых приборов являются входными параметрами модели следующего схемотехнического уровня.

Для описания модели каждого уровня используются свой аппарат и свой язык. Так, для объектов нижнего уровня (см. рис. В.1) основным аппаратом моделирования является квантовая механика, которая позволяет объяснить и рассчитать свойства атомов. Именно свойства атомов являются теми входными переменными, которые передаются в модели твердотельной электроники, начинающейся с описания свойств кристалла. Информация, полученная при теоретическом рассмотрении кристалла, передается на следующий уровень с помощью переменных, описывающих электронные свойства кристалла как объекта. Несмотря на то что описание этих свойств получается путем применения аппарата квантовой механики, для дальнейшего описания свойств полупроводниковых приборов и расчетов он не используется.

Входными параметрами для моделей, описывающих поведение электронов в полупроводниковых приборах, являются параметры модели более низкого уровня, описывающей поведение электронов в кристалле и влияние на них внешних воздействий¹. Создание полупроводниковых приборов основано на использовании различных способов управления электронными потоками в кристалле, обеспечивающих характеристики приборов, необходимые для построения твердотельных устройств² и схем с их применением. Поскольку основным языком при моделировании схем

¹ Именно с рассмотрения этих вопросов и начинается предмет «Твердотельная электроника».

² Под твердотельными устройствами понимают устройства, функции которых реализуются в результате схемотехнического соединения полупроводниковых приборов. Если твердотельное устройство выполнено в одном кристалле, оно называется интегральной схемой.

является язык электротехники (см. рис. В.1), выходные переменные моделей полупроводниковых приборов должны быть описаны этим языком. Именно поэтому при рассмотрении электронных процессов в полупроводниковых приборах используется в основном физический подход, в то время как основные полученные результаты представляются в виде электротехнических моделей, замещающих реальные приборы.

Цель любого эксперимента заключается в получении некоторых знаний об объекте. В конечном счете любой эксперимент сводится к определению реакции объекта на предусмотренные программой эксперимента внешние воздействия. Эта цель едина независимо от того, выполняется ли научный эксперимент по исследованию неизвестного ранее явления, проводятся ли испытания устройств, выпускаемых промышленностью, изучаются ли свойства некоторого полупроводникового материала или прибора в рамках учебного практикума. Во всех случаях основное требование к эксперименту — достоверность полученных результатов, т.е. экспериментальные результаты с заданной точностью должны описывать поведение объекта в условиях, определенных программой испытаний. При этом надо помнить, что никогда ни одно измерение не может быть выполнено с абсолютной точностью. Чем выше точность измерения, тем выше затраты на ее достижение [1]. Поэтому точность должна задаваться в соответствии с целями, которые ставятся при проведении эксперимента. Для любой измеренной величины должна быть известна точность ее измерения и достоверность этой точности. При указании точности измерения, как правило, приводится среднеквадратичная или среднеарифметическая ошибка измерения. Между истинной среднеквадратичной (σ) и истинной среднеарифметической (ρ) ошибками существует соотношение $\sigma = 1,25\rho$. Доверительная вероятность для среднеквадратичной ошибки составляет 0,68, для среднеарифметической — 0,57. Это справедливо в том случае, если ошибки подчиняются нормальному распределению случайных величин. Одной из причин того, что среднеквадратичная ошибка значительно чаще используется при оценке точности измерений, является ее большая доверительная вероятность [4, 5, 34].

Аналогичный подход применяется и при оценке точности расчетов. Точность расчетов определяют два основных фактора: точность вычислительной процедуры и точность используемой для расчетов модели. Поскольку применение компьютерной техники и совершенных вычислительных алгоритмов может обеспечить весьма высокую инструментальную точность вычислений, на первый план выходят точность расчетных моделей и точность использованных алгоритмов. Следует помнить, что абсолютно точных моделей нет. Любая из них имеет вполне определенную точность,

реализуемую в конкретном диапазоне ее параметров. Точность модели зависит от качества теории, положенной в основу ее реализации.

Как правило, конечной целью эксперимента является создание или проверка некоторой модели. Именно по результатам эксперимента делается заключение о свойствах объекта и, в случае необходимости, создается программа выполнения следующего эксперимента или коррекции модели.

Глава 1

ОБЩИЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ

1.1. Основные понятия

Для полного описания взаимодействующего множества объектов, которое принято называть системой, необходимо знать три категории, составляющие эту систему: элементы системы, их свойства и их взаимодействия. Любое описание системы в конечном счете сводится к формальному описанию ее свойств. *Модель* системы (объекта¹) является представлением, отличным от формы физического существования системы, позволяющим отображать ее основные свойства в абстрактном виде, удобном для исследования (моделирования).

Построение модели заключается в формализации изучаемого объекта. При этом могут быть использованы различные средства: семантические, графические, математические. Как правило, при построении модели решается задача описания некоторого процесса, а не операции², поэтому с помощью одной и той же модели могут изучаться разные операции.

Постановка задачи при создании модели заключается в формулировании цели операции. Применительно к моделированию систем это означает задание воздействующих на систему входных переменных и соответственно выходных переменных, которые должны быть получены в результате построения модели. Среди входных переменных выделяются управляющие переменные³, неконтролируемые переменные, обусловленные внешней средой воздействия, и переменные, которые являются результатом воздействий человека.

На рис. 1.1 показана схема обобщенного описания любого системного объекта вне зависимости от его типа. Внешние воздействия на объект и результаты их преобразования отображаются на рис. 1.1 стрелками. Сторона прямоугольника, к которой примыкает стрелка, имеет значение для программ автоматического построения моделей. Входные воздействия принято отображать стрелками, входящими в блок с левой стороны, влияние внешней сре-

¹ Любой объект можно представить в виде взаимодействующих объектов более низкого уровня.

² Под операцией обычно понимается действие, переводящее систему в новое состояние.

³ Их, как правило, называют сигналами.

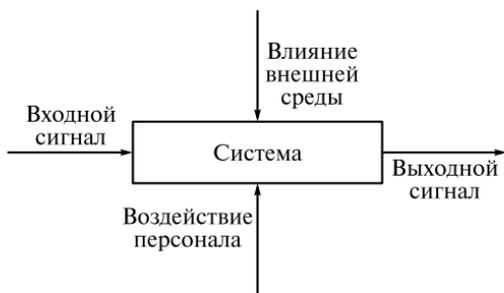


Рис. 1.1. Схема обобщенного описания системного объекта

ды — стрелками, входящими в блок сверху, воздействие персонала — стрелками, входящими в блок снизу. Стрелки, характеризующие результат преобразования внешних воздействий, выходят из блока с правой стороны. Эти правила лежат в основе диаграммной техники проектирования систем [17].

Одним из свойств создаваемых человеком объектов является целенаправленность. Обеспечение заданной целевой функции объекта является основным требованием, предъявляемым ко всем его элементам на всех этапах разработки, изготовления и эксплуатации. При этом имеет место строгая иерархия целей, которая заключается в том, что элемент нижнего уровня должен обеспечить функционирование элемента более высокого уровня. Применение этого принципа при проектировании и эксплуатации элементов твердотельной электроники проявляется в том, что работа с элементами твердотельной электроники начинается с установления характеристик связей элемента со всем его окружением (см. рис. 1.1). Следует иметь в виду, что любой элемент системы (в первую очередь мы имеем в виду элементы твердотельной электроники), как бы прост он ни был, является системой для элементов, из которых он состоит.

1.2. Математическое моделирование

При математическом моделировании реальный объект заменяется некоторой его математической моделью, т. е. приближенным описанием, выраженным с помощью математической символики. Это позволяет использовать для исследования объекта математические методы, которые могут быть как аналитическими, так и численными.

Построение математической модели включает в себя следующие основные этапы:

формулирование законов, связывающих элементы модели;

математическое исследование задачи, т. е. получение выходных данных в зависимости от входных данных;

применение полученных результатов к реальному объекту, следствием чего является либо прогнозирование поведения объекта и его модернизация в соответствии с результатами анализа, либо коррекция модели и повторный анализ.

Недостатком математического моделирования является то, что математическую модель удается построить и проанализировать только для простейших систем. К достоинствам математических моделей следует отнести их общность и возможность достижения высокой расчетной точности.

На рис. 1.2 показана схема, характеризующая простейшую математическую модель, задаваемую функцией $F[X(t)]$, где $X(t)$ — массив изменяющихся со временем входных значений; $Y(t)$ — массив изменяющихся со временем выходных значений; $F[X(t)]$ — оператор, преобразующий входные значения в выходные.

Создание моделей твердотельных устройств основывается на разрабатываемых в течение долгого времени концепциях, которые изучаются в рамках теоретических курсов [6—8, 10, 11, 13, 19, 24, 29, 30, 33]. Теоретические положения применяются непосредственно разработчиками при описании конкретных устройств. Этот процесс значительно облегчается, если при моделировании используются специализированные программные пакеты, в задачу которых входят описание сложившихся в данной области теоретических концепций, применение соответствующих алгоритмов и предоставление пользователю интерфейса для управления расчетами.

Расчетные программные пакеты проводят огромную и невидимую работу по использованию соответствующих баз данных, предоставлению численных методов и реализации их алгоритмов. При этом они значительно экономят время разработчиков и повышают точность расчетов, поэтому специализированные программные продукты в настоящее время стали основными инструментами специалистов-электронщиков. Вместе с тем недостаточное понимание неквалифицированными пользователями принципов функционирования программных пакетов может привести к получению ошибочных и бессмысленных результатов.

Специализированные программные продукты предоставляют модели нижнего уровня, которые разработчик использует для создания моделей объектов более высокой иерархии. Процесс работы с новой моделью включает в себя три основных стадии: концептуальную, логическую и физическую. На концептуальной стадии решается вопрос о конечных характеристиках ус-



Рис. 1.2. Схема простейшей математической модели

тройства, принципах его функционирования и их описании, формализации входных и выходных параметров. На логической стадии на основе составленных на предыдущей стадии сценариев определяется модель решения, устанавливаются необходимые связи между моделями нижнего уровня и создается необходимый интерфейс для управления моделью. На физической стадии задаются конкретные значения компонентов модели, проводятся уточнения модели по результатам ее тестирования. Реализация модели позволяет получить функциональные характеристики устройства при различных параметрах внешней среды.

1.3. Имитационное моделирование

Все имитационные модели представляют собой модели типа черного ящика, т.е. они обеспечивают выдачу выходного сигнала системы, если на ее взаимодействующие подсистемы поступает входной сигнал. К достоинствам имитационных моделей следует отнести то, что для их создания не обязательно знать внутреннюю структуру системы.

В отличие от математических моделей имитационные модели не решаются. Для них осуществляется «прогон», позволяющий на основе реакций всех подсистем на входное воздействие получить выходной результат. Имитационное моделирование — это не теория, а скорее методология решения проблем, с которыми сталкиваются разработчики.

Впервые термин «имитационное моделирование» (simulation) появился в начале 60-х годов XX в. в связи с использованием метода Монте-Карло, который широко применяется до сих пор для исследования процессов, зависящих от случайных параметров или функций.

Допустим, имеется некоторая система, описываемая уравнением

$$\partial x / \partial t = f(x, t, \xi),$$

где x — фазовая переменная; ξ — случайный параметр, закон распределения которого известен.

Необходимо определить траекторию системы, удовлетворяющую некоторому начальному условию

$$x(0) = \eta,$$

где η — случайная величина с известным законом распределения, описывающим состояния системы.

Фазовая траектория системы будет случайной функцией, а значение $x(t)$ в некоторый фиксированный момент времени — слу-

чайной величиной. Именно распределение этой случайной величины и будет характеризовать поведение системы. Как правило, описывающее систему уравнение настолько сложно, что методы его решения отсутствуют. В этом случае прибегают к вычислительной процедуре метода Монте-Карло, выполняемой с помощью ЭВМ.

Используя датчик случайных чисел, определяют последовательность пар чисел: $\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2; \dots, \xi_N, \eta_N$. Для каждой такой пары численным методом решают задачу и находят последовательность $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$.

Имитационный метод стал широко использоваться и для решения других классов задач, что в значительной степени стимулировалось развитием вычислительной техники, особенно появлением мощных компьютеров.

Имитационные эксперименты применяются не только при исследовании моделей, алгоритм решения которых неизвестен, но и для решения задач, которые требуют значительных ресурсов времени, например задач по составлению технологических маршрутов, программы испытания объекта и т.п. При этом широко используются эвристические методы.

Рассмотрим назначение основных элементов в схеме организации имитационного моделирования (рис. 1.3), которая типична для большинства программ моделирования. Язык оператора делает доступным применение программ для широкого пользователя. Он же позволяет получать информацию об устройстве информационной системы, работе с ней и способах ее совершенствования. Управляющая программа (внешняя операционная система) — это элемент информационной системы, ответственный за ее интерактивность, т.е. за диалог с пользователем. С управляющей про-



Рис. 1.3. Схема организации имитационного моделирования

граммой связан банк моделей и банк данных — информационный блок.

Имитационное моделирование, положенное в основу целого ряда систем автоматического проектирования, по существу дает возможность выполнять компьютерный эксперимент. Имитационный комплекс используется в качестве экспериментальной установки для создания и исследования модели некоторого процесса или устройства. При этом переход к новой технологии проектирования основан на использовании прежде всего новых моделей, а не новых данных. Разработка новых моделей ведется физиками и математиками. Наличие совершенных моделей и удобного интерфейса в конечном счете и определяет успех любых систем моделирования.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Общие характеристики эксперимента

В основе научного метода любой экспериментальной науки лежит триада гипотеза — эксперимент — теория. Схема реализации этой триады в экспериментальном исследовании показана на рис. 2.1. Качество изучения любого объекта в настоящее время значительно повышается при использовании компьютерных технологий.

Следует отметить, что введение компьютерных технологий не изменяет общей последовательности действий при проведении эксперимента, которая одинакова как при выполнении лабораторной работы в вузе, так и при проведении заводских испытаний или исследовательского эксперимента.

Каким бы сложным ни был эксперимент, представляемые результаты по структуре мало отличаются друг от друга и от отчетов по обычным лабораторным работам, хотя они могут существенно отличаться по качеству. Применение компьютерных технологий позволяет снизить эти отличия, резко поднимая качество эксперимента и представляемых результатов до некоторого общего уровня, определяемого использованными программно-аппаратными средствами.

Конечный результат любого эксперимента должен включать в себя формулировку выводов и предоставление рекомендаций.

Данные эксперимента могут представляться в виде таблиц, графиков, кривых, математических формул, номограмм, статистических данных и словесных описаний. Статистические показатели



Рис. 2.1. Схема экспериментального изучения объекта

могут давать информацию обо всей совокупности данных и изменчивости отдельных элементов совокупности

Испытательный комплекс включает в себя три составляющие: измерительные приборы, испытательную аппаратуру и образец для измерений. Измерительные приборы воспринимают, записывают, хранят, корректируют и затем показывают испытателю все параметры, которые он должен видеть. Испытательная аппаратура — это все, что необходимо для проведения эксперимента. Образец для испытаний — это объект, подвергаемый испытаниям, который при необходимости может быть заменен другим.

В основе любого эксперимента лежит его план, в котором указываются последовательность работ, характер и величина измеряемых переменных, даются указания по проведению повторных экспериментов. Важное значение имеет последовательность проведения эксперимента, т. е. порядок, в котором вносятся изменения в работу испытательной аппаратуры.

При выполнении эксперимента иногда приходится делать повторные измерения. Эксперимент, при котором происходит возвращение к начальным условиям, называют *репликацией*.

Физическую величину, варьируемую в процессе эксперимента, называют *переменной*. Если варьирование физической величины можно осуществлять независимо от других величин, то такая переменная является *независимой*. Если физическая величина изменяется в результате изменения одной или нескольких переменных, то она называется *зависимой*. Если некоторая величина оказывает влияние на эксперимент, но ее нельзя контролировать, то она называется *внешней* переменной. Обычно независимые переменные могут устанавливаться на выбранных уровнях в соответствии с планом эксперимента. В контролируемом эксперименте влияние внешних переменных должно быть исключено. Независимые переменные можно изменять точно по желанию экспериментатора. Проведение контролируемого эксперимента (изоляция его от окружающих условий) является одним из основных принципов любого исследования. Измерение независимых, зависимых, а часто и внешних переменных осуществляется с помощью приборов. Для каждой измеряемой величины рассматривается наилучшее или наиболее вероятное значение. Наилучшее значение всегда можно сделать еще лучшим, применяя более дорогие измерительные приборы. Таким образом, слово «наилучшее» можно употреблять только при сравнении с аналогичными результатами измерений.

Если при снятиях одних и тех же показаний отклонение от известного значения всегда является фиксированной величиной, то мы имеем систематическую ошибку. Если же отклонения всегда отличаются друг от друга, то мы имеем случайную величину.

Термин «данные» относится ко всем продуктам эксперимента. Данные позволяют установить функциональное соотношение между независимыми и зависимыми переменными.

2.2. Планирование эксперимента, оценка его результата

Планирование — важная и неотъемлемая часть любого эксперимента. Чем сложнее и дороже эксперимент, тем большее значение приобретает его планирование. Оно включает в себя следующие основные этапы:

организационный, заключающийся в планировании времени и места эксперимента, подготовке его участников и др.;

технический, включающий в себя подготовку измерительной аппаратуры и образцов;

методический, заключающийся в планировании методики измерений и методов обработки результатов.

При выполнении учебного практикума осуществление первых двух этапов берет на себя персонал вуза. Последний этап является обязательным для студента. При домашней подготовке к работе этот этап включает в себя не только знакомство с теорией и моделью, но и непосредственно планирование условий эксперимента. Например, основной задачей данного практикума является изучение статических характеристик различных полупроводниковых объектов. Основными задаваемыми и измеряемыми величинами являются электрические напряжения и токи. Вопросы о том, на какие электроды должны подаваться напряжения от внешних источников, в каких пределах они должны изменяться и в каких пределах могут происходить изменения ожидаемых величин, должны быть решены заранее. При этом следует исходить из функциональных характеристик измеряемого твердотельного элемента и его предельно допустимых параметров. На стадии планирования эксперимента важно знать параметры измерительной аппаратуры, поскольку они позволяют заранее оценить возможную точность результатов, составить сценарий эксперимента и наметить необходимое для его проведения время.

В данном практикуме планируется выполнение одной задачи в течение четырех часов. За это время нужно успеть сдать коллоквиум (получить допуск к работе), непосредственно ознакомиться с аппаратной частью измерительной установки, выполнить предварительные расчеты (там, где они предусмотрены), провести измерения, выполнить их предварительную обработку, преобразовать результаты в удобный для дальнейшей работы формат, сохранить их, составить предварительный отчет (протокол измерений), показать его преподавателю. Мнение о том, что автоматизи-