А. С. Глинченко, Н. М. Егоров,
В. А. Комаров, А. В. Сарафанов

Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий

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 210300 «Радиотехника»

Москва

УДК 621.38
ББК 32.973.26-108.2

Рецензенты:
Шайдуров В. В., директор Института вычислительного моделирования СО РАН, член-корреспондент РАН;
Быков Д. В., ректор Московского государственного института электроники и математики, доктор технических наук, профессор.

Глинченко А. С., Егоров Н. М., Комаров В. А., Сарафанов А. В.
Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий: учеб. пособие. – М.: ДМК Пресс. – 352 с.

ISBN 5-94074-416-8

В книге рассмотрены задачи, методы и особенности автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом (АЛП УД) по исследованию полупроводниковых приборов, приведено описание реализующей его системы АЛП УД «Электроника», в том числе входящего в ее состав аппаратно-программного комплекса (АПК) «Электроника», разработанного на основе технологии корпорации National Instruments в региональном инновационном центре «Центр технологий National Instruments» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Приведены задания и методические указания к лабораторным работам по экспериментальному исследованию и моделированию полупроводниковых диодов, стабилитронов, полевых и биполярных транзисторов, включающие измерение их вольтамперных характеристик и параметров, исследование технологического разброса и работы на переменном токе.

Издание предназначено для студентов и учащихся технических специальностей вузов, колледжей, профессиональных училищ и лицеев для использования в лабораторном практикуме дисциплины «Электроника» и других родственных дисциплин, выполняемом на базе сетевой лаборатории Сибирского федерального округа с помощью АПК УД «Электроника».

Учебное пособие подготовлено в рамках выполнения инновационной образовательной программы по направлению «Информатизация и автоматизированные системы управления», реализуемой в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

На прилагаемом к книге DVD-ROM находятся интерактивное электронное техническое руководство к АПК УД «Электроника»; демо-версия системы OrCAD 9.1; файлы проектов для математического моделирования полупроводниковых приборов; система компьютерной проверки знаний тестированием с примерами тестовых заданий; 30-дневная версия LabVIEW 8.5; примеры виртуальных приборов.

Considered are some tasks, methods, and specific features of automated remote-access laboratory-based practicum (ARALP) for the research of semiconductor-based devices. The description covers its realizing system «Electronics» ARALP, including its incorporated hardware-and-software complex «Electronics». That was developed on the base of National Instruments technologies at the Regional Center «National Instruments Technology Center» [http://sfu-kras.ru/studies/sdo/ni], affiliated with Federal State Education Institution of Higher Professional Education (FSE IHP) «Siberian Federal University». Assignments and methodical guides for laboratory-based exercises in experimental research and simulation of semiconductor-based diodes, stabilitrons, unipolar FETs and bipolar transistors, as well as diode characteristic measurements; investigation of parameter spread and AC-based operations, are given.

The learning complex is designed for students of technical areas at universities, colleges, vocational training institutions, and lyceums for applications in laboratory-based practicum studying «Electronics» or other related subjects, on the base of the Network Laboratory in the Siberian Federal District [www.alpsib.ru], through «Electronics» ARALP.

© ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
ISBN 5-94074-416-8
© Оформление, издание, ДМК Пресс

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 10

▼1

Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом на базе технологий National Instruments 14

1.1. Обобщенная схема построения АЛП УД 14

1.2. Компьютерные измерительные технологии National Instruments 16

1.3. Обобщенная схема построения систем АЛП УД с применением технологий National Instruments 22

1.4. Система АЛП УД «Электроника» 24

1.4.1. Функциональные характеристики АПК УД «Электроника» 24

1.4.2. Исследования, выполняемые с помощью моделирования на ПЭВМ 28

1.4.3. Интерактивное электронное техническое руководство 29

1.4.4. Электронная система тестирования 30

1.4.5. Организация лабораторного практикума на базе сетевой лаборатории 31

▼2

Методы и средства измерения вольт-амперных характеристик и параметров полупроводниковых приборов 34

2.1. Измерение ВАХ полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра 34

2.2. Определение параметров полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра 36

2.3. Схемы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов, основанные на измерении напряжений 37

2.4. Способы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов 41

2.5. Средства, используемые для измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов 42

2.6. Традиционные средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов 42

2.7. Средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов на базе ПЭВМ 44

▼ 3

Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электроника» 48

3.1. Конфигурация АПК «Электроника» и его инструментальное обеспечение 48

3.2. Автоматизированный лабораторный макет АПК «Электроника» 50

3.3. Клиентское программное обеспечение АПК «Электроника» 55

3.4. Виртуальные стенды для лабораторных исследований ВАХ и параметров полупроводниковых приборов 58

3.4.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров выпрямительных диодов 58

3.4.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров стабилитронов 62

3.4.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров полевых транзисторов 66

3.4.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров биполярных транзисторов 73

3.5. Виртуальные стенды для лабораторных исследований технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых приборов 82

3.5.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов 82

3.5.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров стабилитронов 85

3.5.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов 89

3.5.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров биполярных транзисторов 94

3.6. Виртуальные стенды для лабораторных исследований полупроводниковых приборов на переменном токе 98

3.6.1. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе выпрямительных диодов 98

3.6.2. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе стабилитронов 101

3.6.3. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе полевых транзисторов 104

3.6.4. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе биполярных транзисторов 108

▼ 4

Исследование полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ 113

4.1. Модели, средства и технология исследования полупроводниковых приборов с помощью моделирования на ПЭВМ 113

4.2. Исследование на ПЭВМ выпрямительных диодов 117

4.2.1. Исследование ВАХ и параметров выпрямительного диода 117

4.2.1.1. Методика исследования прямой ветви ВАХ выпрямительного диода 118

4.2.1.2. Методика исследования обратной ветви ВАХ выпрямительного диода 120

4.2.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов 121

4.2.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода 122

4.2.3. Исследование работы выпрямительного диода на переменном токе ... 124

4.2.3.1. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме однополупериодного выпрямителя 124

4.2.3.2. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме двухполупериодного выпрямителя 127

4.3. Исследование на ПЭВМ стабилитронов 130

4.3.1. Исследование ВАХ и параметров стабилитрона 130

4.3.1.1. Методика исследования прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона 130
4.3.1.2. Методика исследования характеристик стабилизации $U_{ст} = f(E)$ при различных сопротивлениях нагрузки стабилитрона 132
4.3.1.3. Методика исследования нагрузочных характеристик стабилитрона $U_{ст} = f(I_н)$ 133
4.3.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона 137
4.3.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона 137
4.3.3. Исследования работы стабилитрона на переменном токе 139
4.3.3.1. Методика исследования работы стабилитрона на переменном токе 139
4.4. Исследование на ПЭВМ полевых транзисторов 141
4.4.1. Исследование ВАХ и параметров полевого транзистора 141
4.4.1.1. Методика исследования статических передаточных ВАХ полевого транзистора 142
4.4.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ полевого транзистора 144
4.4.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов 146
4.4.2.1. Методика исследования технологического разброса статических передаточных ВАХ полевого транзистора 147
4.4.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ полевого транзистора 148
4.4.3. Исследование работы полевого транзистора на переменном токе 150
4.4.3.1. Методика исследования работы полевого транзистора на переменном токе 151
4.4.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров полевого транзистора 153
4.4.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических передаточных ВАХ полевого транзистора 154
4.4.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ полевого транзистора 156
4.4.4.3. Методика исследования температурной зависимости крутизны полевого транзистора 158
4.4.5. Исследование частотных свойств полевого транзистора 159
4.5. Исследование на ПЭВМ биполярных транзисторов 162

4.5.1. Исследование ВАХ и параметров биполярного транзистора 162
4.5.1.1. Методика исследования статических входных ВАХ биполярного транзистора 162
4.5.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ биполярного транзистора 164
4.5.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров биполярного транзистора 166
4.5.2.1. Методика исследования технологического разброса статических входных ВАХ биполярного транзистора 167
4.5.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ биполярного транзистора 169
4.5.3. Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе 171
4.5.3.1. Методика исследования работы биполярного транзистора на переменном токе 171
4.5.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров биполярного транзистора 173
4.5.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических входных ВАХ биполярного транзистора 173
4.5.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ биполярного транзистора 174
4.5.4.3. Методика исследования температурной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора 176
4.5.5. Исследование частотных свойств биполярного транзистора 178

▼ 5

Описание лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов 182

Лабораторная работа № 1
Измерение и исследование ВАХ и параметров выпрямительных диодов 182

Лабораторная работа № 2
Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов 192

Лабораторная работа № 3
Исследование работы выпрямительных диодов на переменном токе 199

Лабораторная работа № 4
Измерение и исследование ВАХ и параметров стабилитронов 207

Лабораторная работа № 5
Исследование технологического разброса ВАХ
и параметров стабилитронов 216

Лабораторная работа № 6
Исследование работы стабилитрона на переменном токе 223

Лабораторная работа № 7
Измерение и исследование ВАХ и параметров полевых транзисторов ... 231

Лабораторная работа № 8
Исследование технологического разброса ВАХ
и параметров полевых транзисторов 247

Лабораторная работа № 9
Исследование работы полевого транзистора на переменном токе 256

Лабораторная работа № 10
Измерение и исследование ВАХ
и параметров биполярных транзисторов 269

Лабораторная работа № 11
Исследование технологического разброса вольт-амперных
характеристик и параметров биполярных транзисторов 282

Лабораторная работа № 12
Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе 291

▼6

Выполнение лабораторных исследований на базе сетевой лаборатории 306

6.1. Основные функциональные характеристики 306

6.2. Методика проведения лабораторных исследований 311

6.2.1. Экспериментальные исследования 311

6.2.2. Исследования, проводимые средствами математического моделирования 313

6.2.3. Дополнительные возможности 314

Заключение 316

Список литературы 317

Приложение 1

Список используемых сокращений 319

Приложение 2

Описание моделей радиокомпонентов и их параметров 321

Приложение 3

Предельные эксплуатационные данные исследуемых полупроводниковых приборов 340

Приложение 4

Варианты заданий 342

Введение

Современная электроника охватывает практически все сферы бытовой и профессиональной деятельности человека. Изучение ее основ предусмотрено большинством образовательных программ систем высшего, среднего и начального профессионального образования. Базовыми компонентами современной электроники являются полупроводниковые приборы и создаваемые на их основе полупроводниковые интегральные микросхемы. Теоретическое и практическое изучение полупроводниковых приборов [1–3] осуществляется в рамках учебных дисциплин «Электроника», «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электронная техника», «Электроника и микроэлектроника», «Полупроводниковые приборы», «Введение в микропроцессоры и цифровые схемы», «Системы автоматического управления и обработки данных» и др. Лабораторные практикумы этих дисциплин включают исследование наиболее широко применяемых (базовых) видов полупроводниковых приборов: выпрямительных диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов. Данные виды полупроводниковых приборов являются объектами исследования и в автоматизированном лабораторном практикуме (АЛП[1]), описанию которого посвящено данное учебное пособие.

Лабораторный практикум реализуется с применением системы АЛП с удаленным доступом (АЛП УД) «Электроника», в состав которой входит аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом (АПК УД) «Электроника». АПК УД разработан в региональном инновационном центре «Центр технологий *National Instruments*» [http://sfu-kras.ru/studies/sdo/ni] при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» на основе технологии, инструментальных и программных средств *National Instruments* (*NI*) – *LabVIEW* [4, 5]. Сетевая лаборатория Сибирского федерального округа [www.alpsib.ru], на базе которой организуется учебный процесс с применением систем АЛП УД (в том числе и АЛП УД «Электроника»), обеспечивает: авторизованный, регламентированный доступ АПК УД методическому и информационному обеспечению лабораторных практикумов, к программному обеспечению, позволяющему выполнять лабораторные исследования

[1] Список используемых сокращений приведен в приложении 1.