

УДК 621.3.049.77:621.3.08  
ББК 32.844.1+31.221  
А94

А

**Афонский, Александр Алексеевич.**

А94 Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов ; под ред. В. П. Дьяконова. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 689 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-373-8

Первая в России монография по самым современным электронным электро- и радиоизмерениям и измерительным приборам, применяемым в научных исследованиях, тестировании и испытании устройств и систем микроэлектроники и нанотехнологий. Впервые подробно описаны средства измерений, применяемые в условиях крупносерийного микроэлектронного производства, и приборы ведущих в их разработке и производстве фирм: Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, LeCroy, R&S и др. Особое внимание уделено анализу и генерации тестовых сигналов, измерению их параметров в области малых и сверхмалых времен, измерению сверхмалых токов и напряжений, анализу импеданса и иммитанса цепей, измерениям статических и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и др. Является самым крупным обзором современных зарубежных и отечественных измерительных приборов на рынке России и мира. Для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.

УДК 621.3.049.77:621.3.08  
ББК 32.844.1+31.221

**Электронное издание на основе печатного издания:** Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов ; под ред. В. П. Дьяконова. — Москва : ДМК Пресс, 2011. — 688 с. — ISBN 978-5-94074-626-3. — Текст : непосредственный.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-373-8

© Афонский А. А. Дьяконов В. П., 2011  
© Оформление, ДМК Пресс, 2011

А

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	13
Благодарности и адреса для переписки .....	15

## ▼ 1

Средства и объекты нанотехнологий.....	16
1.1. Переход от микротехнологии к нанотехнологии .....	16
1.1.1. От механических часов к микропроцессору .....	16
1.1.2. Закон Мура и падение 100-нм барьера.....	19
1.2. Электронная и рентгеновская микроскопия.....	19
1.2.1. Отличия электронной микроскопии от оптической.....	19
1.2.2. Типы электронных микроскопов .....	21
1.2.3. Сферы применения электронных микроскопов.....	23
1.2.4. Рентгеноскопия интегральных микросхем .....	25
1.3. Компоненты интегральных микросхем .....	27
1.3.1. Компоненты микросхем – пассивные и активные .....	27
1.3.2. Полевые транзисторы – кирпичики интегральных микросхем .....	27
1.3.3. Интегральные микромощные полевые транзисторы .....	29
1.3.4. Терагерцовые полевые транзисторы.....	30
1.3.5. Сверхскоростные гетеропереходные Si-Ge биполярные транзисторы .....	33
1.3.6. Трехзатворные полевые транзисторы .....	35
1.3.7. Нужны ли мощные транзисторы?.....	38
1.4. Интегральные микросхемы.....	38
1.4.1. Типы интегральных микросхем.....	38
1.4.2. Процесс изготовления интегральных микросхем .....	40
1.4.3. Микропроцессоры – от одноядерных к многоядерным.....	46
1.4.4. Парадоксы микроэлектронной технологии.....	49
1.4.5. От алюминия к меди .....	52
1.4.6. Фотолитография с ультракороткими лучами – прорыв в будущее.....	53
1.4.7. Тестирование и отладка микросхем .....	55
1.4.8. Начало нанотехнологий в микроэлектронике .....	57
1.5. Чудеса нанотехнологий .....	58
1.5.1. Электромеханика на кремниевом кристалле (MEMS).....	58
1.5.2. Проекционный дисплей и гибкие экраны .....	59
1.5.3. Нанотрубки .....	61
1.5.4. Подключение нанотрубок к МДП-микротранзистору .....	63

## 4 Содержание

1.5.5. Галлиевый «градусник» на углеродной нанотрубке .....	63
1.5.6. Твердотельная память вместо жестких дисков .....	64
1.5.7. Нанотехнологии повышают мощность химических элементов .....	65
1.5.8. Нанороботы и наноавтомобили.....	66
1.5.9. Нанотехнологии в производстве новых материалов .....	69
1.5.10. Полупроводниковые микролазеры .....	70
1.6. От фантастики к практике .....	72

## ▼ 2

Измерения на постоянном токе .....	73
2.1. Основные компоненты электронных схем .....	73
2.1.1. Пассивные и активные компоненты (обзор).....	73
2.1.2. Источники напряжения и тока .....	74
2.1.3. Погрешность измерения постоянного напряжения .....	75
2.1.4. Измерения в произвольных цепях постоянного тока .....	76
2.1.5. Резистивные компоненты (резисторы).....	77
2.1.6. Комплекс приборов для измерений в микроэлектронике и в нанотехнологиях.....	78
2.2. Источники электропитания и их имитаторы .....	80
2.2.1. Первичные и вторичные источники электропитания .....	80
2.2.2. Имитаторы батарей.....	81
2.2.3. Высоковольтные источники питания .....	83
2.2.4. Высоковольтные источники питания/измерители .....	85
2.2.5. Электронные нагрузки.....	88
2.2.6. Калибраторы измерителей напряжения и тока.....	91
2.3. Измерение параметров резистивных компонентов.....	92
2.3.1. Измерение резистивности и проводимости .....	92
2.3.2. Измерители больших и малых сопротивлений .....	95
2.3.3. Методы измерения удельного сопротивления и типа полупроводников .....	98
2.3.4. Измеритель удельного сопротивления полупроводников ПИММАР-1У.....	100
2.3.5. Комплекс измерения больших удельных сопротивлений Keithley 65 .....	101
2.3.6. Электронметр и измеритель высокоомных сопротивлений Keithley 6517A.....	102
2.3.7. Измерения экстремальных (высоких и низких) сопротивлений.....	104
2.3.8. Определение типа проводимости полупроводников .....	106
2.4. Измерение сверхмалых постоянных токов и напряжений .....	107
2.4.1. Физические эффекты, ведущие к генерации сверхмалых токов и напряжений.....	107
2.4.2. Методы измерения сверхмалых токов и напряжений .....	109
2.4.3. Мультиметры с расширенными пределами измерения .....	112
2.4.4. Микровольтметры и нановольтметры .....	123
2.4.5. Методы повышения точности измерений сверхмалых напряжений, токов и сопротивлений.....	126
2.4.6. Измерение температуры.....	128
2.5. Аксессуары, опции и средства интеграции приборов.....	129
2.5.1. Выбор аксессуаров для измерительных приборов .....	129
2.5.2. Опции для измерительных приборов.....	130
2.5.3. Средства интеграции измерительных приборов .....	132
2.6. Анализатор/источник постоянных напряжений Agilent N6705A.....	134
2.6.1. Назначение и конструкция прибора .....	134
2.6.2. Отображаемая дисплеем информация .....	135
2.6.3. Генератор испытательных сигналов .....	136
2.6.4. Применение прибора .....	137

### ▼ 3

Измерения на переменном токе .....	138
3.1. Основные параметры переменного напряжения и тока .....	138
3.1.1. Параметры синусоидального напряжения и тока .....	138
3.1.2. Истинное среднеквадратическое значение (True RMS) .....	140
3.1.3. Коэффициент нелинейных искажений (гармоник) .....	142
3.2. Измерение параметров переменного напряжения и тока .....	142
3.2.1. Принципы построения измерителей переменных токов и напряжений .....	142
3.2.2. Принципы построения измерителей с истинным среднеквадратическим значением .....	143
3.2.3. Измерение переменных токов и напряжений мультиметрами .....	146
3.2.4. Измерители коэффициента гармоник .....	148
3.2.5. Измерители частоты, периода и фазы .....	150
3.2.6. Профессиональные цифровые частотомеры фирмы Pendulum .....	152
3.2.7. Измерители мощности ВЧ- и СВЧ-сигналов .....	154
3.3. Параметры реактивных компонентов и цепей с ними .....	155
3.3.1. Идеальная индуктивность .....	155
3.3.2. Идеальная емкость .....	156
3.3.3. Иммитанс, адмитанс и импеданс цепей .....	157
3.4. Измерение параметров реактивных компонентов .....	158
3.4.1. Измерение емкости и индуктивности .....	158
3.4.2. Общий обзор цифровых измерителей иммитанса и импеданса .....	160
3.4.3. Цифровой измеритель иммитанса E7-20 .....	161
3.4.4. Малогабаритный измеритель иммитанса E7-25 .....	165
3.4.5. Работа с измерителем иммитанса E7-20 .....	166
3.4.6. Широкодиапазонные RLC-измерители АКТАКОМ AM-3001, AM-3018 и AM-3026 .....	168
3.4.7. Лабораторные LCR-измерители компании Good Will .....	171
3.4.8. Лабораторные LCR-измерители АКИП серии 61** .....	173
3.4.9. Высокочастотные LCR-измерители фирмы WK .....	174

### ▼ 4

Измерительные генераторы сигналов .....	178
4.1. Аналоговые генераторы синусоидальных сигналов .....	178
4.1.1. Основные типы аналоговых генераторов синусоидального напряжения .....	178
4.1.2. Обобщенная схема аналогового генератора синусоидального напряжения .....	179
4.1.3. RC-генераторы .....	181
4.1.4. LC-генераторы синусоидального напряжения .....	182
4.1.5. Кварцевые резонаторы и генераторы .....	183
4.1.6. Эталонные генераторы синусоидального напряжения .....	186
4.1.7. LC-генераторы стандартных сигналов (ГСС) .....	187
4.2. Основы цифрового синтеза частоты и формы сигналов .....	188
4.2.1. Основные методы цифрового синтеза синусоидальных сигналов .....	188
4.2.2. Цифровой частотный синтез .....	188
4.2.3. Генераторы произвольных функций (AFG) .....	189
4.2.4. Генераторы сигналов произвольной формы (AWG) .....	190
4.2.5. Шум квантования у генераторов с цифровым синтезом формы сигналов .....	191
4.2.6. Фазовый шум генераторов .....	193

## 6 Содержание

4.3. ГСС с цифровым синтезом умеренной сложности .....	194
4.3.1. Простые ВЧ- и СВЧ-генераторы с цифровым синтезом .....	194
4.3.2. ГСС с цифровым синтезом фирмы Agilent Technologies.....	196
4.3.3. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы ROHDE&SCHWARE .....	199
4.4. Векторные генераторы синусоидальных сигналов .....	202
4.4.1. Векторное представление сигналов и цифровая модуляция.....	202
4.4.2. Векторные генераторы фирмы Agilent Technologies.....	203
4.4.3. Векторные генераторы фирмы R&S .....	204
4.4.4. Векторные генераторы фирмы Keithley.....	206
4.5. Импульсные сигналы и принципы их генерации .....	208
4.5.1. Формы и параметры импульсов.....	208
4.5.2. Спектр импульсных сигналов .....	210
4.5.3. Схемотехника импульсных генераторов .....	212
4.5.4. Типичная функциональная схема генератора импульсов .....	216
4.5.5. Отечественные серийные генераторы импульсов.....	217
4.5.6. Зарубежные промышленные генераторы импульсов .....	222
4.6. Генераторы импульсов сверхмалой длительности .....	223
4.6.1. Принципы генерации импульсов с субнаносекундным временем нарастания .....	223
4.6.2. Генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами .....	224
4.6.3. Генераторы пикосекундных импульсов фирмы Picosecond Pulse Lab .....	226
4.7. Аналоговые функциональные генераторы .....	228
4.7.1. Основные типы функциональных генераторов .....	228
4.7.2. Функциональные генераторы с интегратором на интегральном операционном усилителе .....	229
4.7.3. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током.....	230
4.7.4. Микросхемы для аналоговых функциональных генераторов .....	231
4.7.5. Отечественные аналоговые функциональные генераторы.....	232
4.7.6. Функциональные генераторы зарубежных фирм.....	234
4.8. Функциональные генераторы с цифровым синтезом выходных сигналов.....	237
4.8.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов .....	237
4.8.2. Цифровые функциональные генераторы зарубежных фирм.....	238
4.9. Генераторы серии AFG3000 компании Tektronix .....	243
4.9.1. Внешний вид и работа с генераторами серии AFG3000.....	243
4.9.2. Технические характеристики генераторов AFG3000 .....	245
4.9.3. Работа с генератором AFG3000 .....	246
4.9.4. Основные возможности генераторов AFG3000 .....	248
4.9.5. Применение AFG3000 в роли ГКЧ и Q-метра.....	252
4.9.6. Применение AFG3000 в роли импульсного генератора .....	254
4.10. Программное обеспечение генераторов AFG3000.....	258
4.10.1. Назначение программы ArbExpress и ее интерфейс .....	258
4.10.2. Создание сигналов стандартных форм .....	259
4.10.3. Настройка на типы приборов и работа с файлами.....	260
4.10.4. Программирование формы сигналов.....	262
4.10.5. Применение графического редактора формы сигналов .....	266
4.10.6. Математические операции с сигналами .....	267
4.10.7. Построение сигнала по осциллограмме .....	268
4.10.8. Управление генераторами от системы MATLAB.....	270
4.11. Программа NI Signal Express Tektronix Edition.....	272
4.11.1. Назначение программы.....	272
4.11.2. Выбор и запуск программы.....	272

4.11.3. Окно выбора инструмента (прибора) .....	274
4.11.4. Работа с генератором серии AFG3000.....	274
4.11.5. Дополнительные возможности программы.....	275
4.12. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG.....	276
4.12.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG.....	276
4.12.2. Генераторы серии AWG7000 .....	277
4.12.3. Генераторы серии AWG5000 .....	278
4.13. Генераторы цифровых сигналов произвольной формы (паттернов) .....	279
4.13.1. Функциональная схема генератора паттернов данных .....	279
4.13.2. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG2020A.....	280
4.13.3. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG5078/5274/DTG5334 .....	281
4.13.4. Генератор импульсов/паттернов серии 3400 фирмы Keithley .....	282

## ▼ 5

Современные электронные осциллографы .....	284
5.1. Закат аналоговой осциллографии.....	284
5.1.1. Основные типы электронных осциллографов .....	284
5.1.2. Достоинства и недостатки аналоговых осциллографов.....	285
5.1.3. Требования к усилителям осциллографов .....	287
5.1.4. Широкополосные аналоговые осциллографы AKTAKOM-IWATSU с обычной ЭЛТ .....	291
5.1.5. Широкополосные аналоговые осциллографы AKTAKOM-IWATSU со сканирующей ЭЛТ.....	292
5.2. Основы построения и работы цифровых запоминающих осциллографов .....	295
5.2.1. Блок-схема цифрового запоминающего осциллографа .....	295
5.2.2. О выборе числа отсчетов, восстановлении и интерполяции сигналов.....	297
5.2.3. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов .....	299
5.3. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы .....	301
5.3.1. Какие из цифровых осциллографов можно отнести к бюджетным .....	301
5.3.2. Массовые цифровые осциллографы юго-восточных фирм .....	301
5.3.3. Массовые цифровые осциллографы фирмы RIGOL.....	305
5.4. Цифровые осциллографы компании Tektronix.....	306
5.4.1. Цифровые осциллографы фирмы Tektronix закрытой архитектуры .....	306
5.4.2. Цифровые осциллографы Tektronix с открытой архитектурой.....	313
5.4.3. Технические новинки в осциллографах фирмы Tektronix .....	319
5.5. Цифровые осциллографы фирмы LeCroy.....	325
5.5.1. Цифровые осциллографы LeCroy с полосой до 500 МГц .....	325
5.5.2. Цифровые осциллографы LeCroy среднего класса .....	328
5.5.3. Цифровые осциллографы LeCroy высшего класса .....	330
5.6. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies .....	336
5.6.1. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы Agilent.....	336
5.6.2. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies среднего класса.....	337
5.6.3. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies высшего класса .....	340
5.7. Стробоскопические осциллографы .....	345
5.7.1. Принципы построения стробоскопических осциллографов.....	345
5.7.2. Генераторы стробирующих импульсов.....	346
5.7.3. Устройства выборки сигналов .....	347
5.7.4. Отечественные стробоскопические осциллографы .....	348
5.7.5. Стробоскопический осциллограф ПК С1-24 .....	350
5.7.6. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц.....	352

▼ 6

Искусство осциллографии.....	354
6.1. Аксессуары осциллографов и их применение.....	354
6.1.1. Назначение пробников.....	354
6.1.2. Пробники на основе компенсированного делителя.....	355
6.1.3. Высоковольтные пробники.....	358
6.1.4. Пробники с коррекцией частотной характеристики.....	359
6.1.5. Учет параметров пробников.....	361
6.1.6. Подключение пробников к источникам сигналов.....	364
6.1.7. Эволюция конструкции осциллографических пробников.....	365
6.1.8. Пробники с оптической развязкой.....	366
6.1.9. Токовые пробники.....	367
6.1.10. Новейшие пробники Tektronix класса TekConnect™ и TekVPI™.....	369
6.2. Согласованные широкополосные устройства.....	371
6.2.1. Согласованные пассивные пробники и кабели.....	371
6.2.2. О выборе входного сопротивления у осциллографов.....	371
6.2.3. Коаксиальные аттенюаторы, переходники и тройники.....	374
6.3. Активные осциллографические пробники.....	375
6.3.1. Назначение современных активных пробников.....	375
6.3.2. Широкополосные активные пробники.....	377
6.3.3. Дифференциальные пробники.....	380
6.3.4. Конфигурация измерительной головки пробников.....	381
6.3.5. Сверхширокополосные дифференциальные пробники.....	383
6.4. Специальные устройства подключения и фиксации пробников.....	385
6.4.1. Применение для подключения пробников механических манипуляторов.....	385
6.4.2. Станция 2020H/V фирмы Probing Solution, Inc.....	385
6.5. Импульсная рефлектоскопия и рефлектометрия.....	386
6.5.1. Основные положения импульсной рефлектометрии.....	386
6.5.2. Расшифровка рефлектограмм.....	387
6.5.3. Цифровой осциллограф в роли рефлектометра.....	388
6.6. Спектральный анализ с помощью цифровых осциллографов.....	389
6.6.1. Основы оконного спектрального анализа.....	389
6.6.2. Выбор окна при спектральном анализе.....	391
6.6.3. Спектральный анализ у простых осциллографов.....	392
6.6.4. Спектральный анализ у осциллографов DPO 4000.....	395
6.6.5. Спектральный анализ у осциллографов TDS 5000.....	400
6.6.6. Спектральный анализ у осциллографов DPO 7000.....	401
6.6.7. Спектральный анализ у осциллографов других фирм.....	403
6.7. Другие возможности современных осциллографов.....	405
6.7.1. Режимы выборок и пик-детектор.....	405
6.7.2. Опорные осциллограммы.....	406
6.7.3. Расчетные осциллограммы и математический редактор.....	407
6.7.4. Глазковые диаграммы.....	408
6.8. Применение системы MATLAB.....	410
6.8.1. Компьютерная математика в измерительной технике.....	410
6.8.2. Подключение к ПК цифрового осциллографа.....	412
6.8.3. Стыковка цифрового осциллографа с системой MATLAB.....	412
6.8.4. Программа ввода в MATLAB осциллограмм двух каналов.....	418
6.9. Математические операции с сигналами.....	420
6.9.1. Математические операции с сигналами двух каналов.....	420

6.9.2. Очистка осциллограммы от шума .....	422
6.10. Спектральный анализ реальных осциллограмм в MATLAB .....	423
6.10.1. Фурье-преобразование и периодограммы для реальных осциллограмм .....	423
6.10.2. MATLAB-инструмент спектрального анализа SPTool .....	425
6.10.3. Построение спектра в MATLAB различными методами .....	426
6.10.4. Оценка в MATLAB спектра реальных сигналов в виде пачек .....	429
6.11. Вейвлет-анализ реальных осциллограмм в MATLAB .....	432
6.11.1. Вейвлеты против рядов Фурье .....	432
6.11.2. Вейвлет-анализ осциллограмм .....	433
6.11.3. GUI-средства для работы с вейвлетами .....	435

## ▼ 7

Анализаторы сигналов, спектра и цепей .....	438
7.1. Введение в осциллографические анализаторы .....	438
7.1.1. Обобщенная схема анализа электронных устройств .....	438
7.1.2. Основные типы осциллографических анализаторов .....	440
7.2. Гетеродинные и векторные анализаторы спектра .....	440
7.2.1. Принципы построения гетеродинных анализаторов спектра .....	440
7.2.2. Следящий (трекинг-) генератор .....	442
7.2.3. Основные типы детекторов в анализаторах спектра .....	443
7.2.4. Шум анализаторов спектра .....	445
7.2.5. Динамические искажения АЧХ УПЧ .....	446
7.2.6. Основные установки в анализаторах спектра .....	447
7.2.7. Гетеродинный анализатор спектра АКС-1100/1101 .....	449
7.2.8. Функциональная схема современного цифрового анализатора спектра .....	452
7.2.9. Векторные анализаторы спектра .....	453
7.3. Серийные цифровые анализаторы спектра .....	454
7.3.1. Анализаторы спектра СК-4 Белан .....	454
7.3.2. Анализатора спектра СК4-Белан 32 .....	455
7.3.3. Анализаторы спектра АКТАКОМ АКС-1301/1601 .....	458
7.3.4. Анализаторы спектра фирмы Nex1 .....	460
7.3.5. Анализаторы спектра фирмы LSA .....	461
7.3.6. Анализаторы спектра фирмы Agilent Technologies .....	462
7.3.7. Анализаторы спектра фирмы ROHDE&SCHWARZ .....	466
7.3.8. Анализаторы спектра фирмы Good Will GSP-810/827/9830 .....	473
7.3.9. Анализаторы спектра АК ИП-4201/4202 .....	478
7.3.10. Работа с цифровым анализатором спектра .....	480
7.4. Анализаторы спектра реального времени .....	486
7.4.1. Назначение анализаторов спектра реального времени .....	486
7.4.2. Функциональная схема и работа анализатора спектра реального времени .....	487
7.4.3. Цифровое преобразование сигналов в анализаторах спектра реального времени .....	490
7.4.4. Синхронизация анализаторов спектра реального времени .....	492
7.4.5. Основные способы представления результатов анализа .....	494
7.4.6. Анализаторы спектра реального времени RSA2200/3000 .....	499
7.4.7. Анализаторы спектра реального времени RSA3300B/3408B .....	500
7.4.8. Анализаторы радиочастотного спектра серии RSA6100 .....	502
7.5. Примеры работы с анализатором Tektronix RSA 6114A .....	508
7.5.1. Экран анализатора спектра Tektronix RSA 6114A .....	508
7.5.2. Применение маркеров .....	509



7.5.3. Контроль спектра близких к идеальным импульсных сигналов .....	510
7.5.4. Исследование спектров модулированных сигналов .....	513
7.5.5. Исследование спектра сигналов с частотной модуляцией (FM).....	515
7.5.6. Исследование спектра сигналов с фазовой модуляцией (ФМ).....	516
7.5.7. Исследование спектра УКВ-диапазона.....	516
7.6. Анализаторы сигналов и источников сигналов .....	519
7.6.1. Методы измерения фазового шума .....	519
7.6.2. Системы параметров для радиочастотных цепей .....	520
7.6.3. Измерительный приемник фирмы R&S FMSR.....	521
7.6.4. Анализатор источников сигналов фирмы R&S FSUP .....	522
7.6.5. Радиочастотные векторные анализаторы сигналов Keithley 2810/2820.....	523
7.7. Векторные и скалярные анализаторы цепей.....	525
7.7.1. Особенности анализаторов цепей.....	525
7.7.2. Анализаторы четырехполюсников.....	526
7.7.3. Многопортовые векторные анализаторы цепей.....	529
7.8. Аксессуары для анализаторов спектра.....	534
7.8.1. Антенны для анализаторов спектра и электромагнитного поля .....	534
7.8.2. Пробник-переходник RTRA2A для анализаторов спектра реального времени.....	534
7.8.3. Внешние смесители широкополосных анализаторов спектра.....	535

## ▼ 8

### Последовательные и логические анализаторы, осциллографы

смешанных сигналов .....	537
8.1. Последовательные анализаторы сигналов.....	537
8.1.1. Требования к последовательным анализаторам телекоммуникационных сигналов .....	537
8.1.2. Последовательные анализаторы Tektronix DSA70000 .....	538
8.1.3. Цифровой последовательный анализатор Tektronix DSA8200 .....	539
8.1.4. Последовательные анализаторы реального времени LeCroy SDA 18000/10000/9000 .....	540
8.1.5. Последовательные анализаторы реального времени LeCroy SDA 800Zi.....	544
8.1.6. Последовательные анализаторы фирмы Agilent .....	544
8.2. Анализ логических состояний.....	547
8.2.1. Назначение логических анализаторов.....	547
8.2.2. Функциональная схема логического анализатора .....	550
8.2.3. Этапы работы с логическим анализатором .....	550
8.2.4. Запуск логического анализатора и синхронизация .....	551
8.2.5. Синхронный и асинхронный режимы сбора данных .....	552
8.2.6. Глитчи в цифровой аппаратуре и проблема их обнаружения .....	552
8.3. Современные логические анализаторы .....	553
8.3.1. Логические анализаторы фирмы Agilent Technologies .....	553
8.3.2. Логические анализаторы фирмы Tektronix серий TLA 700 и 600.....	555
8.3.3. Логические анализаторы фирмы Tektronix серии TLA 5000.....	556
8.3.4. Логические анализаторы серии LA фирмы Leaptronix.....	558
8.3.5. Логические анализаторы фирмы Hewlett Packard .....	559
8.4. Осциллографы смешанных сигналов .....	560
8.4.1. Назначение осциллографов смешанных сигналов.....	560
8.4.2. Осциллографы смешанных сигналов фирмы Agilent Technologies.....	560
8.4.3. Осциллографы смешанных сигналов фирмы Tektronix.....	562

8.4.4. Осциллографы смешанных сигналов фирмы RIGOL .....	566
8.4.5. Применение осциллографов фирмы LeCroy с опциями логического анализатора .....	570
8.5. Подключение логических анализаторов к испытываемому устройству .....	572
8.5.1. Логические пробники общего назначения .....	572
8.5.2. Высокоплотные многоканальные пробники .....	573

## ▼ 9

### Исследование полупроводниковых приборов и интегральных

микросхем .....	577
9.1. Основы измерения статических параметров полупроводниковых приборов .....	577
9.1.1. Типы тестируемых полупроводниковых приборов .....	577
9.1.2. Измерительная схема тестирования диодов .....	578
9.1.3. Измерительная схема тестирования транзисторов и микросхем .....	579
9.1.4. Коммутация измерительных приборов .....	580
9.1.5. Типичный объект тестирования нанотехнологий – нанодиод .....	581
9.2. Источники/измерители фирмы Keithley для тестирования полупроводниковых приборов и микросхем .....	582
9.2.1. Линейные источники/измерители серии 2400 .....	582
9.2.2. Многоканальные системные источники/измерители серии 2600 .....	583
9.2.3. Контроль диодов с помощью источников/измерителей серии 2600 .....	585
9.2.4. Контроль микросхем с помощью источников/измерителей серии 2600 .....	586
9.2.5. Характериограф 4200-SCS .....	587
9.2.6. Примеры работы с характериографом 4200-SCS .....	590
9.3. Снятие характеристик полевых транзисторов .....	591
9.3.1. Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов .....	591
9.3.2. Дифференциальные параметры полевых транзисторов .....	593
9.3.4. Исследование полевых транзисторов с помощью характериографа .....	595
9.4. Анализатор/характериограф силовых полупроводниковых приборов Agilent B1501A .....	597
9.4.1. Назначение и внешний вид анализатора Agilent B1501A .....	597
9.4.2. Примеры снятия характеристик мощного высоковольтного МДП-транзистора .....	598
9.5. Измерение радиочастотных параметров полупроводниковых приборов и микросхем .....	598
9.5.1. Измерение радиочастотных параметров цифровыми осциллографами .....	598
9.5.2. Измерение радиочастотных параметров с помощью генераторов и анализаторов спектров, сигналов и цепей .....	600
9.5.3. Комплекс измерения радиочастотных параметров фирмы Keithley .....	600
9.5.4. Система параметрического контроля радиочастотных параметров микросхем S600 .....	602
9.6. Измерение дифференциальных параметров .....	603
9.6.1. Определение дифференциальных параметров .....	603
9.6.2. Негатроны – приборы с отрицательной проводимостью и сопротивлением .....	603
9.6.3. Методы измерения и построения N- и S-образных ВАХ .....	606
9.7. Измерения временных параметров полупроводниковых приборов .....	608
9.7.1. Физические процессы при переключении диодов .....	608
9.7.2. Платы расширения для измерения временных параметров фирмы Keithley .....	609
9.7.3. Измерение времен переключения биполярных транзисторов .....	612
9.7.4. Измерение параметров МДП-транзисторов во временной области .....	614

9.7.5. Измерение времен переключения арсенид-галлиевых транзисторов .....	617
9.7.6. Измерение времени переключения туннельных диодов .....	618
9.7.7. Измерение времени переключения лавинных транзисторов .....	622
9.8. Тестирование интегральных микросхем .....	627
9.8.1. Сверхскоростные интегральные микросхемы как объекты тестирования .....	627
9.8.2. Тестирование интегральных компараторов .....	632
9.8.3. Тестирование интегральных усилителей .....	634
9.8.4. Контроль индикаторной панели .....	634

## ▼ 10

Измерение параметров оптико-электронных приборов .....	636
10.1. Типы, конструктивные особенности и назначение оптико-электронных приборов .....	636
10.1.1. Типы полупроводниковых оптико-электронных приборов .....	636
10.1.2. Конструкция и характеристики обычных светодиодов .....	637
10.1.3. Конструкция и характеристики лазерных светодиодов .....	640
10.1.4. Лазерная головка для считывания информации с оптических дисков .....	641
10.1.5. Конструкция и характеристики фотоприемников .....	643
10.2. Тестирование излучателей светового излучения .....	644
10.2.1. Интегрирующая сфера 2500INT фирмы Keithley .....	644
10.2.2. Построение системы тестирования излучателей света .....	646
10.2.3. Источники/измерители серии 2400 для IV тестирования оптоэлектронных приборов .....	648
10.3. Тестирование импульсных лазерных излучателей .....	650
10.3.1. Интегрирующая сфера для импульсных лазерных излучателей 2520INT .....	650
10.3.2. Система тестирования импульсных лазерных излучателей 2520 .....	651
10.4. Тестирование фотодиодов и фототранзисторов .....	653
10.4.1. Снятие статических характеристик фотодиодов и фототранзисторов .....	653
10.4.2. Многоканальная I-V система тестирования 4500-MTS .....	654
10.4.3. Двухканальный пикоамперметр серии 2502 для фотодиодных измерений .....	655
10.4.4. Системные источники/измерители 2602/2612 для LIV тестирования .....	656
10.5. Исследование высокоскоростных излучателей и приемников света .....	657
10.5.1. Особенности динамики излучения высокоскоростных лазерных диодов .....	657
10.5.2. Установка для изучения динамики излучения высокоскоростных лазерных диодов .....	658
10.5.3. Наблюдение эффекта обострения фронта импульса лазерного излучения .....	659
10.5.4. Запуск мощных лазерных диодов и лазерных решеток .....	661
10.5.5. Импульсные генераторы и оптические модули фирмы DEI .....	664
10.5.6. Испытание сверхскоростных светодиодов и фотоприемников .....	666
10.6. Испытание световолоконных кабелей и линий передачи .....	668
10.6.1. Конструкция и параметры световодов световолоконных кабелей .....	668
10.6.2. Оптическая рефлектометрия .....	669
10.6.3. Оптические мини-рефлекторы .....	671
10.7. Основы электронно-лазерной осциллографии .....	673
10.7.1. Преобразования сверхкоротких импульсов лазерного излучения .....	673
10.7.2. Методы исследования импульсов лазерного излучения пико- и фемтосекундного диапазона .....	675
10.7.3. Оптоэлектронный стробоскопический осциллограф .....	677

ЛИТЕРАТУРА .....	679
------------------	-----