А. А. Афонский, В. П. Дьяконов

Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике

Под редакцией проф. В. П. Дьяконова

Москва, 2011

УДК 621.38
ББК 32.973.26-108.2
А94

Афонский А. А., Дьяконов В. П.
А94 Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.

ISBN 978-5-94074-626-3

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 621.38
ББК 32.973.26-108.2

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.

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

ISBN 978-5-94074-626-3

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

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 ПИЛЛАР-1У ... 100
2.3.5. Комплекс измерения больших удельных сопротивлений Keithley 65 ... 101
2.3.6. Электрометр 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
3.2.3. 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 Е7-20 161
3.4.4. Малогабаритный измеритель иммитанса Е7-25 165
3.4.5. Работа с измерителем иммитанса Е7-20 166
3.4.6. Широкодиапазонные RLC-измерители АКТАКОМ АМ-3001, АМ-3018 и АМ-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

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 рефлетометрия 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 анализа 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 АКИП-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 RTPA2A 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