

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



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 ПИМЛАР-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 АК ИП 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 АКТАКОМ-IWATSU с обычной ЭЛТ	291
5.1.5. Широкополосные аналоговые осциллографы АКТАКОМ-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 C1-24	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. Токковые 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 2020N/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 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 3Э	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 RÖHDE&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



Исследование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

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-галмиевых 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
------------------	-----

Предисловие

Нанотехнологии – это технологии, в ходе изготовления устройств которых приходится оперировать объектами, размеры которых не превышают 100 нм (1 нм = 10^{-9} м). Это очень малая величина, сравнимая с размерами молекул и даже атомов. Материалы, создаваемые с помощью нанотехнологий, нередко отличаются особыми, подчас уникальными свойствами, которые могут найти широкое применение в нашей повседневной жизни. Их нужно измерять и контролировать.

Многие думают, что сидящий за электронным микроскопом человек, ухитряющийся из атомов собрать молекулу неизвестного вещества или робот из отдельных атомов, – это и есть «нанотехнолог». Увы, это наивное заблуждение. Скорее всего, этот человек – ученый и исследователь, и надо очень многое сделать, чтобы нанотехнологии были массовыми и на месте ученого оказался технолог, инженер или рабочий. Надо научиться создавать самоорганизующиеся или искусственно организованные процессы, происходящие на атомно-молекулярном уровне, позволяющие готовить объекты нанотехнологий в промышленных, а не единичных масштабах. При этом исключительно велика роль нужного инструментария, в том числе измерительного.

Между тем оказывается, что мы уже свыше десятка лет широко пользуемся вполне реальными достижениями нанотехнологий. Они находятся в сфере производства полупроводниковых приборов и *микроэлектроники*, которая в последние годы стала наноэлектроникой [1–14]. Вот уже несколько лет, как в микроэлектронике используется технология с разрешением менее 100 нм, а микросхемы с таким разрешением (микропроцессоры, видеопроцессоры, устройства памяти и др.) выпускаются в массовых количествах. Они используются в настольных, мобильных и карманных компьютерах, сотовых телефонах, системах беспроводной связи, плеерах и рекордерах и т. д. Многие из этих массовых изделий построены на монолитных интегральных *микросхемах высокой степени интеграции* (СБИС), геометрическое разрешение производственных процессов у которых уже в наши дни составляет 30–45 нм.

Чем меньше размеры изделий нанотехнологий, тем выше требования к диапазону измеряемых параметров таких изделий. Нужно измерять меньшие токи и напряжения, распознавать слабые сигналы, излучаемые нередко отдельными молекулами и атомами различных материалов, оценивать их спектры и т. д. Эти

сигналы и спектры охватывают уже диапазоны миллиметровых волн и частоты в десятки и сотни гигагерц. Все это требует разработки нового измерительного оборудования, новых измерительных приборов и новых измерительных систем.

Итак, чтобы нанотехнологии и их достижения были реализованы в наиболее короткие сроки и были максимально эффективны, необходимо обеспечить нанотехнологии и создаваемые с их помощью объекты, системы и устройства современной метрологической и инструментальной базой. Разумеется, в ее создании уже сделано очень много, и в современном микро- и нанoeлектронном производстве используется весь арсенал как давно известных [15–18, 119], так и самых современных [19–20, 31–118] электро- и радиоизмерительных приборов. Но их так много, что инженеры, преподаватели, студенты университетов и научные работники испытывают острую нехватку в литературе по этому арсеналу приборов, тем более в связи с его ориентацией на такую новейшую область науки и техники, как нанотехнологии и микроэлектроника.

Эта книга продолжает серию книг авторов [19–22] по современным электро- и радиоизмерительным приборам. Но, в отличие от уже вышедших книг, в ней:

- дано достаточно подробное описание продукции компании Keithley, производящей множество приборов для микроэлектроники и нанотехнологий;
- детально описаны методы измерения поверхностного и объемного сопротивлений полупроводниковых и иных материалов и методики определения типа их проводимости;
- описана современная техника измерения сверхмалых (вплоть до фемтоампер) токов и напряжений (до пиковольт) и современные приборы для их измерений;
- детально описана техника высокоточного измерения параметров компонентов R , L и C , иммитанса и импеданса цепей, причем особое внимание уделено приборам, измеряющим экстремальные значения этих параметров, например сверхмалые и сверхбольшие сопротивления, сверхмалые емкости и индуктивности;
- дано описание новейших измерителей импеданса и иммитанса, а также нового поколения измерительных приборов – анализаторов цепей, сигналов и источников питания;
- дан достаточно полный обзор продукции таких крупных фирм, как Tektronix, LeCroy, Agilent Technologies, R&S, и их новейших разработок в области цифровых осциллографов, генераторов различного типа, анализаторов спектра реального времени и скоростных цифровых генераторов произвольных сигналов;
- особое внимание уделено технике эксперимента со сверхмалыми по размерам объектами, такими как нанотрубки, интегральные микродиоды и микротранзисторы, интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы;
- достаточно подробно описана техника генерации импульсов нано-, субнано- и даже пикосекундных импульсов с рекордными параметрами по минимальной длительности и максимальной амплитуде импульсов;

- описана современная рефлектометрия, в том числе оптическая, а также цифровые рефлектометры и оптические мини-рефлекторы;
- большое внимание уделено описанию измерительных приборов, используемых в современном производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, в частности приборов и систем, лидирующих в этом секторе рынка;
- описана новейшая техника компьютерного анализа тонких особенностей временных зависимостей реальных осциллограмм с применением расширенных методов спектрального и вейвлет-анализа с помощью систем компьютерной математики;
- описаны особенности тестирования объектов малой электроэнергетики: первичных источников электропитания, вторичных источников с импульсным и резонансным методами преобразования электрической энергии, электронных балластов для люминесцентных ламп и корректоров мощности.

Теоретическая часть книги дана в минимально необходимом объеме, но достаточном для понимания сути описываемых в книге принципов функционирования измерительных приборов. Книга сопровождается более чем 770 иллюстрациями, многие из которых, естественно, взяты из технической документации, обзоров, каталогов и фирменных CD-ROM по описанным в книге измерительным приборам. Некоторые из таких материалов даны «как они есть», с тем чтобы сохранить фирменную специфику обозначений и облегчить понимание иллюстраций и спецификаций из упомянутых источников, которые не вошли в данную книгу.

Разумеется, большинство описанных в книге приборов и методов измерений применимо не только для измерений в области нанотехнологий и микроэлектроники, но и во многих других областях науки, техники и образования. Поэтому книга наверняка заинтересует очень многих читателей в различных областях науки, техники и образования.

Будучи монографией, книга является самым крупным обзором современных зарубежных и отечественных электронных измерительных приборов, имеющих на рынке России и мира. Она может служить кратким справочником по таким приборам. Книга предназначена для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.

Благодарности и адреса для переписки

Авторы благодарят фирмы Intel, Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, R&S и др., а также их представительства в России за любезно предоставленную (в том числе в Интернете и на CD-ROM) информацию по их продукции, которая легла в основу материала данной книги.

Авторы признательны читателям за их отзывы по данной книге и пожелания по ее улучшению. Отзывы по книге можно направлять по адресам электронной почты авторов (aa-afonski@mail.ru и vpdyak@yandex.ru), а также по адресу издательства, выпустившего книгу.

Средства и объекты нанотехнологий



Нанотехнологии – это средства, позволяющие получать в массовом количестве объекты, имеющие характеристические размеры менее 0,1 мкм (или 100 нм), а также создавать различные материалы и приборы на основе таких объектов. Одними из первых массовых устройств на основе нанотехнологий стали интегральные микросхемы, создаваемые с геометрическим разрешением менее 100 нм, такие как микросхемы памяти и микропроцессоры. В этой главе описаны основные средства и объекты нанотехнологий. Особое внимание уделено средствам, относящимся к микроэлектронике и позволяющим оценить параметры электро- и радиоизмерительных приборов, нужных для исследования и тестирования объектов нанотехнологий.

1.1. Переход от микротехнологии к нанотехнологии

1.1.1. От механических часов к микропроцессору

В жизни людей одними из первых миниатюрных устройств широкого применения стали механические часы. В первых таких часах некоторые механические детали имели размеры порядка долей миллиметра ($1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), а точность их обработки достигала нескольких десятков микрон ($1 \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$). Детали часов были настолько миниатюрны, что для работы с ними человек был вынужден обратиться к простейшим оптическим приборам – изображению часового мастера с закрепленной перед глазом лупой стало характерным для представителей этого класса ремесленников.

Микротехнологии нашли широкое применение в химической промышленности, например для создания мелкодисперсионных порошковых материалов, фильтров для очистки растворов и воды, композитных материалов и т. д. Чем меньше размеры частичек порошковых материалов, тем большим числом уникальных физических свойств они обладают. Композитные материалы на основе таких порош-

ков могут иметь вес в несколько раз меньше, чем у изделий из высококачественной стали, и в несколько раз большую прочность. Это обуславливает перспективы их применения в автомобильной и авиационной промышленности, в космосе и в конечном счете в быту.

Огромные средства, затрачиваемые промышленно развитыми странами на развитие нанотехнологий, говорят о том, что на эти технологии возлагаются очень большие надежды. В том числе на их применение в практике. При этом до сих пор нет точного определения того, что это за технологии и чем они отличаются от обычных технологий создания миниатюрных объектов, например таких, как интегральные микросхемы (чипы) и тонкодисперсные порошковые материалы.

Единственное, что мы точно знаем, – то, что объекты нанотехнологий должны иметь малые геометрические размеры. Напомним, что 1 нанометр (нм) равен $1 \cdot 10^{-9}$ м, или $1 \cdot 10^{-3}$ мкм. Тысячная доля от микрометра – это очень малая величина, а потому практически к нанотехнологиям относят такие технологии, которые позволяют создавать объекты, хотя бы один из характеристических размеров которых меньше 100 нм. Технологии, позволяющие создавать объекты с несколько большими размерами, правомерно называть микротехнологиями. Нанотехнологии позволяют создавать объекты с субмикронными размерами.

Существует мнение (в определенной степени верное) о том, что к нанотехнологиям следует относить и устройства, работа которых во временной области характеризуется временами порядка единиц-десятков наносекунд ($1 \text{ нс} = 1 \cdot 10^{-9}$ с) и меньше. В частотной области это соответствует устройствам, генерирующим колебания с частотами примерно от 1 ГГц ($1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9$ Гц) и выше – до сотен гигагерц. Для разработок таких устройств нужны генераторы и электронные осциллографы, работающие в этом диапазоне времен и частот.

Выдающуюся роль в познании тайн материи и в создании миниатюрных устройств сыграли оптические *микроскопы*. Они обеспечили увеличение разрешения (и уменьшение видимых размеров наблюдаемых объектов) примерно до 1000 раз и несколько выше. Впрочем, увеличение свыше 1000 раз уже не позволяет наблюдать новые особенности объектов, поскольку с ростом увеличения наблюдается характерное ухудшение фокусировки изображения – извечная проблема неопределенности в квантовой механике. Глаз человека имеет разрешение в 0,1 мм (10^{-4} м), а хороший оптический микроскоп увеличивает его до 0,1 мкм (100 нм). Вот почему это разрешение считается предельным для обычной фотолитографии, широко применяемой в микроэлектронике [1].

Пожалуй, наиболее известными массовыми изделиями микротехнологий являются технологии современной *микроэлектроники*. У первых микросхем разрешение составляло несколько микрометров. На фотографии поверхности первого микропроцессора 4004 корпорации Intel при увеличении оптическим микроскопом в десятки раз (рис. 1.1) можно отчетливо наблюдать отдельные проводники и группы отдельных компонентов. На кристалле размером с ноготь размещено около 2400 транзисторов.

Однако субмикронными размерами характеризуются и многие вполне обычные полупроводниковые приборы. К примеру, толщина базы у обычного СВЧ-

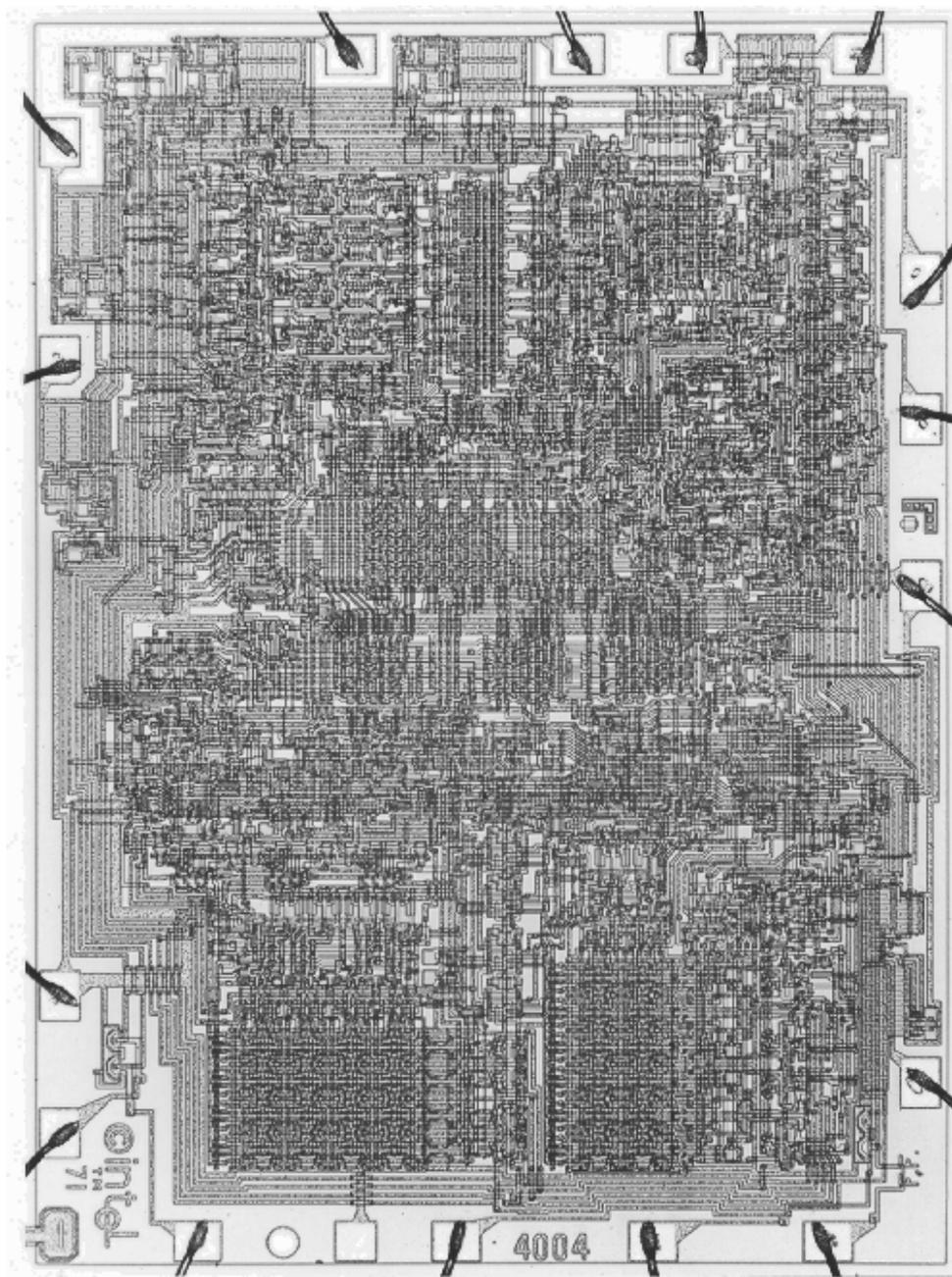


Рис. 1.1. Фотография поверхности первого микропроцессора 4004 корпорации Intel при увеличении оптическим микроскопом в десятки раз

биполярного транзистора составляет доли микрометра. Еще меньше толщина диэлектрика у полевых транзисторов с изолированным затвором.

1.1.2. Закон Мура и падение 100-нм барьера

Успехи в технологии производства интегральных микросхем компании Intel (это ведущая компания в области микроэлектроники [1]) привели к тому, что примерно каждые 1,5 года число транзисторов на кристалле возрастало вдвое. Эту простую и эмпирическую закономерность подметил один из основателей корпорации Intel Гордон Мур, и вот уже свыше четырех десятилетий Intel старается придерживаться «закона Мура» [141–148]. В основном это достигается постоянным ростом разрешения технологии интегральных микросхем – разрешение выросло от единиц микрон до десятков нанометров. На микрофотографии вполне современного микропроцессора Pentium IV уже невозможно разглядеть ни отдельных проводников, ни отдельных транзисторов (рис. 1.2). Еще бы – их число выросло примерно до 100 миллионов, а разрешение достигло 110 нм и даже 90 нм.

Разрешение оптических средств, использовавшихся в производстве интегральных микросхем, уже давно составляет около 100 нм и менее. Оно характерно и для оптических микроскопов, дающих увеличение до 1000 раз. Вот почему вплоть до конца ушедшего века было много разговоров о кризисе в микроэлектронике из-за наличия «фундаментального» барьера в разрешении фотолитографии.

Но недавно, уже в начавшемся XXI веке, разрешение интегральных микросхем достигло заветной границы в 100 нм и довольно спокойно преодолело ее. Это стало возможным после перехода на фотолитографию в жестких (коротких) лучах, например рентгеновских, что передвинуло эту границу разрешения на порядок. Нынешние интегральные микросхемы, например корпорации Intel, уже делаются по технологии с разрешением 45 и 35 нм, а опытные образцы микросхем есть с разрешением в 15–18 нм. Таким образом, микроэлектроника по существу стала наноэлектроникой. И первой по-настоящему массовой областью применения нанотехнологий.

1.2. Электронная и рентгеновская микроскопия

1.2.1. Отличия электронной микроскопии от оптической

Как уже отмечалось, обычные оптические микроскопы имеют барьер геометрического разрешения около 100 нм, то есть имеют ограниченное применение в части исследования структуры материалов в объектах нанотехнологии. Они позволяют просматривать многие виды молекул различных веществ и материалов и детали их молекулярного строения. Очень широко применяются оптические микроскопы в биологии, например для наблюдения микробов, бактерий, вирусов и про-

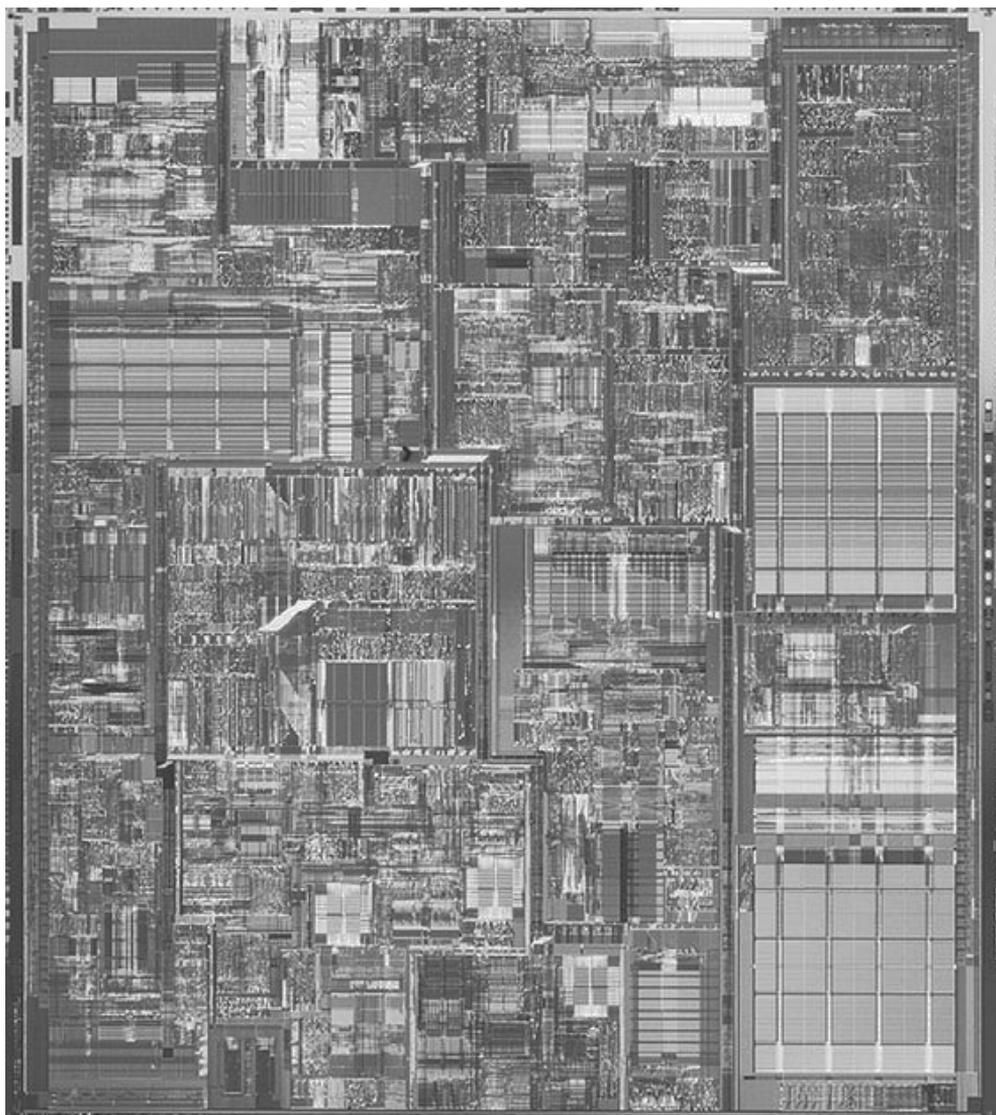


Рис. 1.2. Микрофотография микропроцессора Pentium IV

чих микроскопических живых существ, а также строения организмов и растений. Важным их достоинством является возможность наблюдения живых микроорганизмов в обычных для них условиях.

Новым успехам в области теоретической и экспериментальной физики мы обязаны открытию электрона и его свойств. Это привело к созданию основ электронной оптики (ЭОП). Прямым намеком на такую возможность явилась гипотеза

волновой природы электрона, выдвинутая в 1924 году Луи де Бройлем и экспериментально подтвержденная в 1927 году К. Дэвиссоном и Л. Джермером в США и Дж. Томсоном в Англии. Главным приложением ЭОП являлось изобретение и создание *электронного микроскопа* (ЭМ) в 30-х годах XX века, построенного по аналогии с принципами волновой оптики, но с применением электрических и магнитных полей для фокусировки электронных лучей.

В 1931 году Р. Руденберг получил патент на просвечивающий электронный микроскоп, а в 1932 году М. Кнолль и Э. Руска построили первый просвечивающий микроскоп, применив магнитные линзы для фокусировки электронов. (Руска – лауреат Нобелевской премии по физике за 1986 год.)

1.2.2. Типы электронных микроскопов

Итак, для наблюдения атомарного и молекулярного строений различных веществ были созданы электронные микроскопы, работа которых основана на применении вместо частичек света (фотонов) электронов, которые имеют как корпускулярные, так и волновые свойства. Не вдаваясь в тонкости строения этих сложных приборов (как и обычных микроскопов), поскольку это не относится прямо к тематике данной книги, отметим, что структура электронного микроскопа в общих чертах подобна строению оптического микроскопа. Только вместо оптических линз используются электронные линзы, основанные на том факте, что заряженные отрицательно электроны, двигаясь в вакууме, могут отклоняться и фокусироваться магнитным и электрическим полями.

Итак, электронный микроскоп (ЭМ) – это прибор, позволяющий получать сильно увеличенное изображение объектов, используя для их освещения поток электронов. В отличие от оптического микроскопа, в ЭМ используются магнитные или электростатические линзы. Некоторые электронные микроскопы позволяют увеличивать изображение в 2 миллиона раз, в то время как максимальное увеличение лучших оптических микроскопов достигает 1000–2000 раз. Как электронные, так и оптические микроскопы имеют ограничения в разрешающей способности в зависимости от длины волн частиц, освещающих исследуемые объекты.

В ЭМ используются электростатические или электромагнитные линзы для формирования изображения путем управления пучком электронов и концентрации его на отдельных участках изображения подобно тому, как оптический микроскоп использует стеклянные линзы для фокусирования света на (или сквозь) изображение.

Электронные микроскопы могут быть следующих видов:

- просвечивающий электронный микроскоп;
- растровый электронный микроскоп;
- сканирующий туннельный микроскоп;
- сканирующий атомно-силовой микроскоп;
- отражательный электронный микроскоп;
- растровый просвечивающий электронный микроскоп;
- фотоэмиссионный электронный микроскоп;

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru