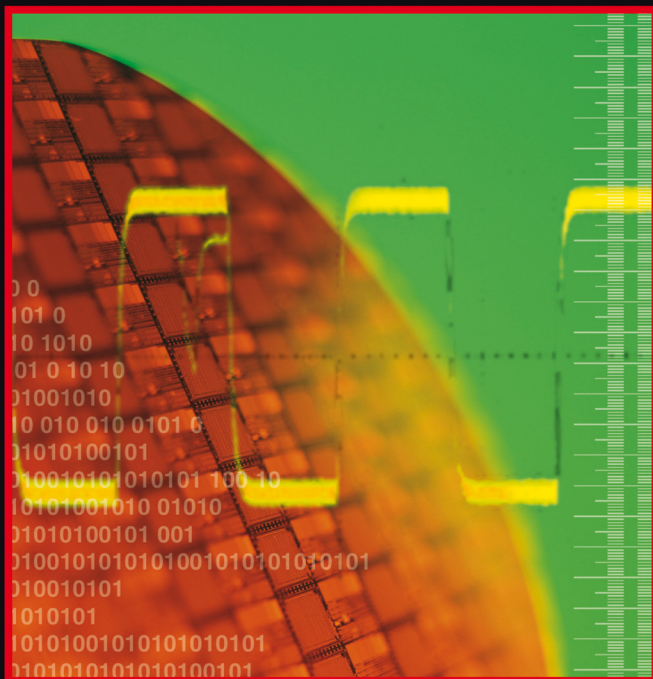


# ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ И В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ



**Афонский А. А.  
Дьяконов В. П.**

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.

ISBN 978-5-94074-626-3

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

# 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 ПИЛЛАР-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&SCHWARTZ .....	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 LeCroy высшего класса Agilent Technologies .....	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 аттенуаторы, 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 рефлектометрия 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 четырехполосников .....	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 RPA2A 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 испытуемому устройству .....	572
8.5.1. Логические пробники общего назначения .....	572
8.5.2. Высокоплотные многоканальные пробники .....	573



## 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

# 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 – изображение 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 микрона – 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 микрон. 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-

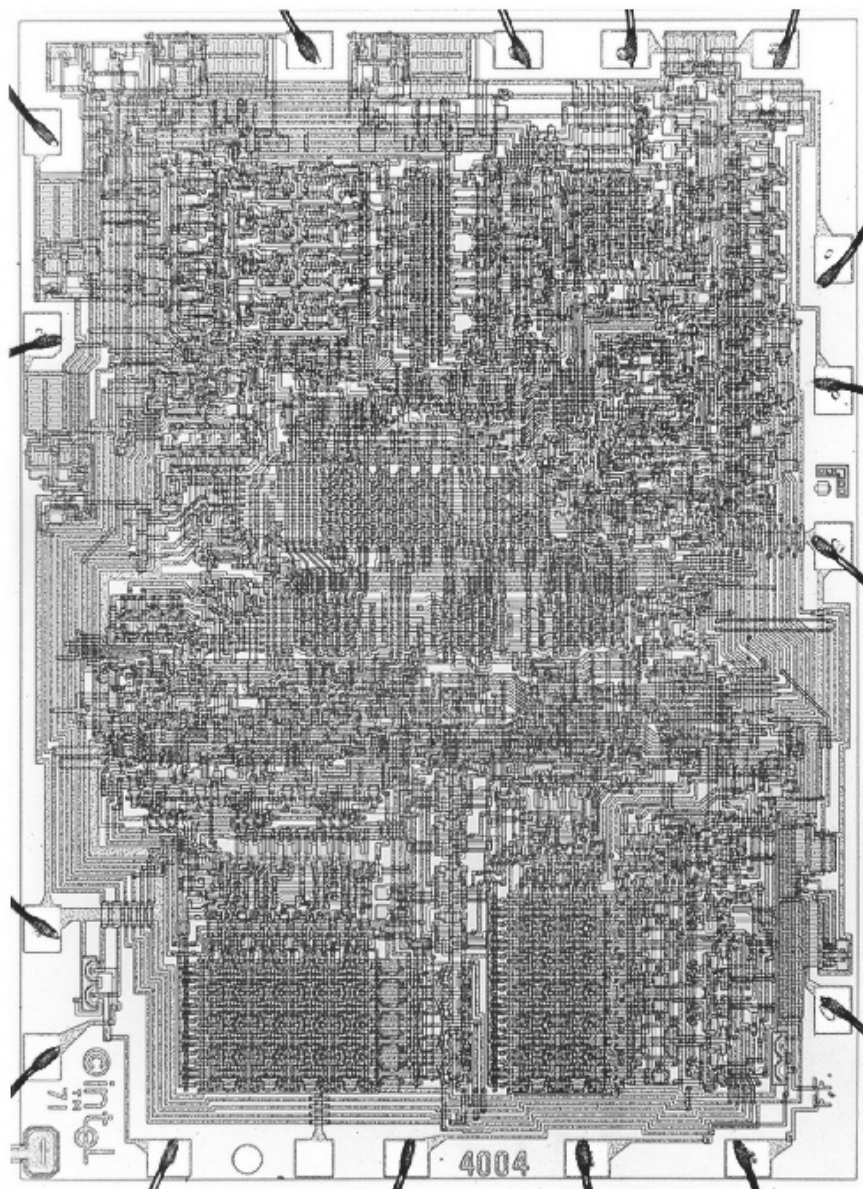


Рис. 1.1. Фотография поверхности первого микропроцессора 4004 корпорации Intel при увеличении оптическим микроскопом в десятки раз

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 нанозлектроникой. 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-



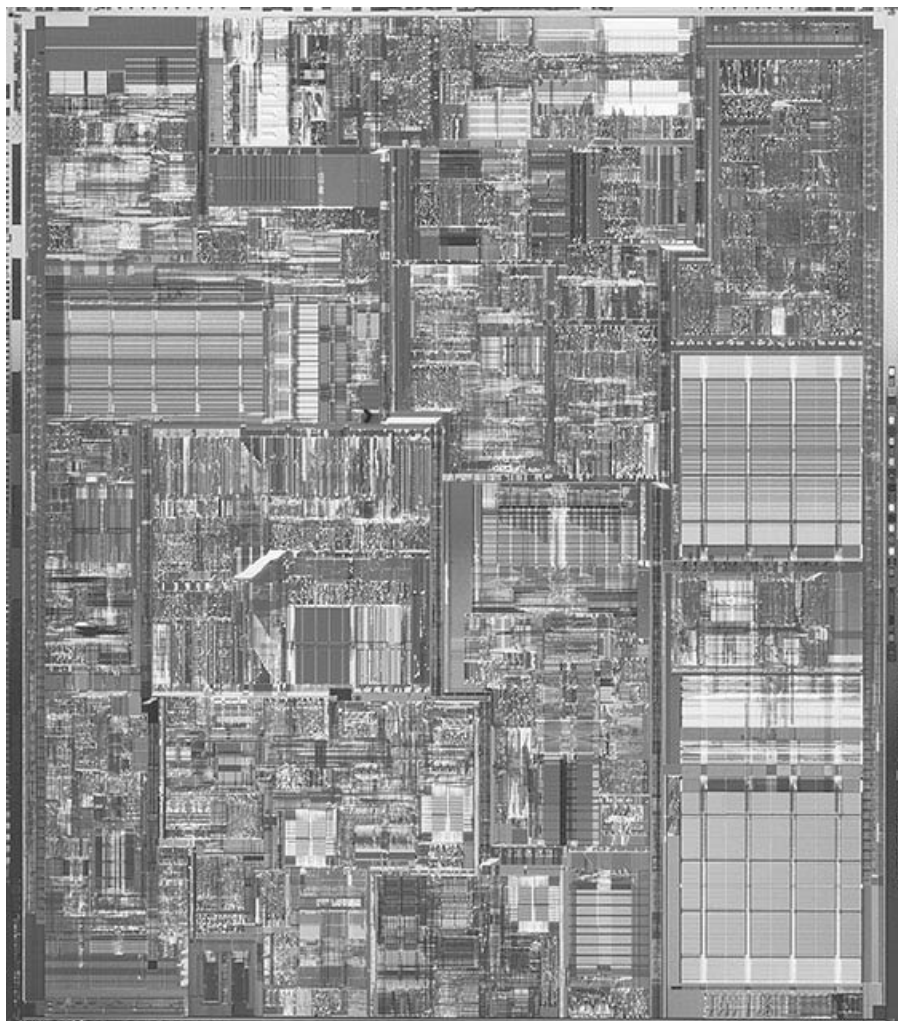


Рис. 1.2. Микрофотография микропроцессора Pentium IV

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. Кноль 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) изображении.

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;

- полнофункциональный сканирующий зондовый микроскоп.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ), строящий изображение как телевизор, был изобретен в 1952 году Чарльзом Отли. И лишь после ряда технических усовершенствований он был внедрен в производство в середине 1960-х годов.

Прибор с объемным изображением и электронным выходным сигналом нашел большое применение в науке и технике. В 1979 году в Цюрихе Г. Биннигом и Г. Рорером был изобретен сканирующий растровый туннельный микроскоп (РТМ). Этот простой по устройству прибор обеспечивает атомное разрешение поверхностей. За свою работу по созданию (РТМ) Бинниг и Рорер получили Нобелевскую премию по физике.

Обычный просвечивающий электронный микроскоп (рис. 1.3) во многом подобен световому микроскопу. В нем имеются электронный прожектор, ряд конденсорных электронных линз, электронная линза – объектив и проекционная система, которая соответствует окуляру, но проецирует действительное изображение на люминесцентный экран (рис. 1.4) или фотографическую пластинку.

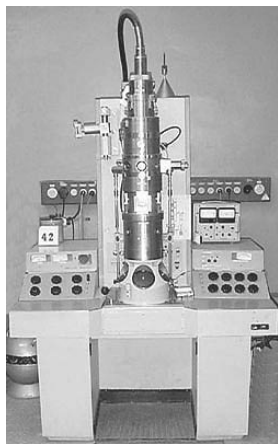


Рис. 1.3. Внешний вид электронного микроскопа ЭМВ-100Л



Рис. 1.4. Окно просмотра электронного микроскопа 100Л

Источником электронов обычно служит нагреваемый катод из вольфрама или гексаборида лантана. Катод электрически изолирован от остальной части прибора, и электроны ускоряются сильным электрическим полем. Для создания такого поля катод поддерживают под потенциалом порядка  $-100$  кВ относительно других электродов, фокусирующих электроны в узкий пучок. Эта часть прибора называется электронным прожектором (или электронной пушкой). Поскольку электроны сильно рассеиваются веществом, в колонне микроскопа, где движутся

электроны, должен быть вакуум. Здесь поддерживается давление, не превышающее одной миллиардной доли атмосферного давления.

Электронное изображение формируется электрическими и магнитными полями примерно так же, как световое – оптическими линзами. Они являются катушками специальной конструкции. Магнитное поле, создаваемое витками катушки, по которой проходит ток, действует как собирающая линза, фокусное расстояние которой можно изменять, изменяя ток. Поскольку оптическая сила такой линзы, то есть способность фокусировать электроны, зависит от напряженности магнитного поля вблизи оси, для ее увеличения желательно сконцентрировать магнитное поле в минимально возможном объеме. Практически это достигается тем, что катушку почти полностью закрывают магнитной «броней» из специального никель-кобальтового сплава, оставляя лишь узкий зазор в ее внутренней части. Создаваемое таким образом магнитное поле может быть в 10–100 тыс. раз более сильным, чем магнитное поле Земли на земной поверхности.

Электронная линза – объектив – дает увеличенное изображение объекта (обычно с увеличением порядка 100); дополнительное увеличение, вносимое промежуточными и проекционной линзами, лежит в пределах величин от несколько меньшей 10 до несколько большей 1000. Таким образом, увеличение, которое можно получить в современных электронных микроскопах, составляет от менее 1000 до ~1 000 000. Исследуемый объект обычно помещают на очень мелкую сетку, вкладываемую в специальный держатель. Держатель можно механическим или электрическим способом плавно перемещать вверх-вниз и вправо-влево.

Разрешающая способность электронного микроскопа определяется эффективной длиной волны электронов. Длина волны зависит от скорости электронов, а следовательно, от ускоряющего напряжения: чем больше ускоряющее напряжение, тем больше скорость электронов и тем меньше длина волны, а значит, выше разрешение. Столь значительное преимущество электронного микроскопа в разрешающей способности объясняется тем, что длина волны электронов намного меньше длины волны света. Но поскольку электронные линзы не так хорошо фокусируют, как оптические (числовая апертура хорошей электронной линзы составляет всего лишь 0,09, тогда как для хорошего оптического объектива эта величина достигает 0,95), разрешение электронного микроскопа равно 50–100 длинам волн электронов.

Даже со столь слабыми линзами в электронном микроскопе можно получить предел разрешения около 0,17 нм, что позволяет различать отдельные атомы в кристаллах. Но для достижения разрешения такого порядка необходима очень тщательная настройка прибора. В частности, требуются высокостабильные источники питания, а сам прибор (который может быть высотой около 2,5 м и иметь массу в несколько тонн) и его дополнительное оборудование требуют монтажа, исключающего вибрацию.

### 1.2.3. Сферы применения электронных микроскопов

Сферы применения электронных микроскопов в нанотехнологиях весьма обширны:

- полупроводники и хранение данных;

- корректировка микроэлектронных изделий в ходе их создания;
- метрология трехмерных (3D) объектов;
- дефектоскопия и анализ неисправностей сверхминиатюрных устройств;
- биология и биологические науки;
- криобиология;
- локализация белков;
- электронная томография;
- клеточная томография;
- криоэлектронная микроскопия;
- токсикология;
- биологическое производство и мониторинг загрузки вирусов;
- анализ частиц микродисперсионных материалов и порошков;
- фармацевтический контроль качества;
- трехмерные изображения тканей;
- вирусология;
- стеклование.

В области научных исследований электронные микроскопы применяются для:

- квалификации материалов;
- подготовки материалов и образцов;
- создания нанопрототипов;
- нанометрологии;
- тестирования и снятия характеристик устройств.

Отметим и применение в промышленности:

- создание изображений высокого разрешения;
- снятие микрохарактеристик 2D и 3D;
- изучение макрообразцов для нанометрической метрологии;
- обнаружение и снятие параметров частиц;
- конструирование прямого пучка;
- эксперименты с динамическими материалами;
- подготовка образцов;
- добыча и анализ полезных ископаемых;
- химия/нефтехимия.

О качестве изображения (кстати, в оригинале оно цветное) дает представление рис. 1.5, на котором показана реконструкция рельефа кристаллизованного белка *Bacillus sphaericus* ССМ2177 с помощью сканирующего электронного микроскопа. Нетрудно заметить, что структура белка отчетливо видна.

Несомненно, появление электронного микроскопа в решающей мере способствовало зарождению нанотехнологии. Но электронный микроскоп – не массовый и дорогой прибор, и далеко не каждая фирма или научно-исследовательский институт имеет такой прибор. Основные мировые производители электронных микроскопов: Delong Group, FEI Company – США (слилась с Philips Electron Optics), FOCUS GmbH – Германия, Hitachi – Япония, Nion Company – США, JEOL – Япония (Japan Electro Optics Laboratory), TESCAN – Евросоюз, Carl Zeiss NTS GmbH – Германия и др.

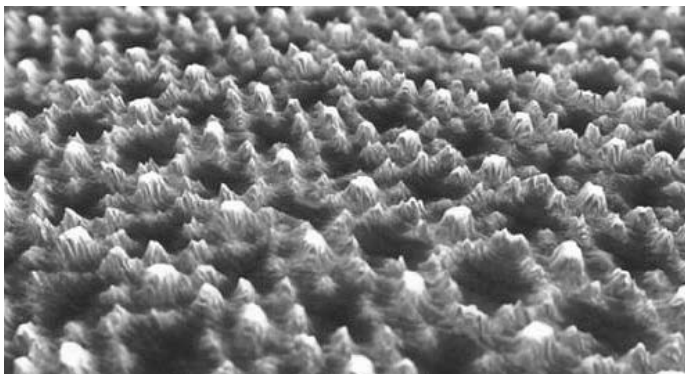


Рис. 1.5. Изображение рельефа белка с помощью электронного микроскопа (расстояние между центрами решетки – 13,1 нм)

Сравнительно умеренной стоимостью (порядка миллиона рублей) отличается полнофункциональный сканирующий зондовый микроскоп Фемто-Скан, который может управляться из Интернета. Это позволяет работать с ним в дистанционном режиме. Например, на химическом факультете МГУ на таком микроскопе выполняются даже лабораторные работы студентами. Микроскоп позволяет исследовать объекты и измерять их характеристики на воздухе и в жидких средах. Имеются 50 режимов работы, в том числе: туннельный, атомно-силовой, электростатический, магнитно-силовой, резистивный, нанолитографии и силового картирования поверхности. Прибор обеспечивает измерение магнитного или электрического поля вокруг образца и определяет (с точностью до атомов) проводимость поверхности. Это очень важно для реализации нанотехнологий.

#### **1.2.4. Рентгеноскопия интегральных микросхем**

Для выявления брака в готовой продукции и повышения качества будущих изделий недавно корпорация Intel взяла на вооружение рентгеноскопическую технологию. Новая рентгеновская установка, созданная в Великобритании специалистами компании X-Тек\* при непосредственном участии инженеров Intel, создает четкое трехмерное рентгеновское изображение (рис. 1.6), которое помогает выявлять изъяны опытных образцов новой продукции и оптимизировать взаимодействие различных деталей исследуемого устройства.

Принцип действия установки, внешний вид которой показан на рис. 1.7, аналогичен тому, на чем основаны медицинские томографы, используемые для сканирования человеческого мозга, – исследуемый объект сканируется тонким пучком рентгеновских лучей. Новинка уже отлично зарекомендовала себя в качестве эффективного средства выявления таких дефектов, как разломы пайки и изъяны

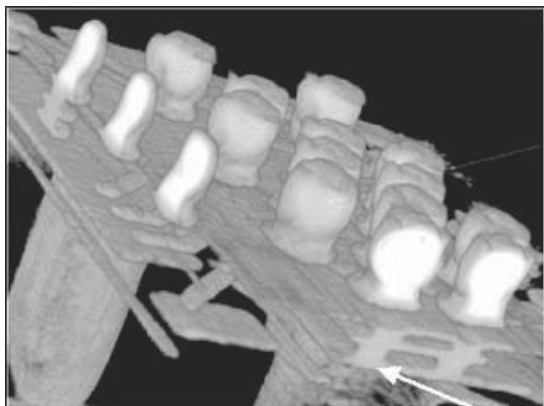


Рис. 1.6. Рентгенограмма участка интегральной микросхемы



Рис. 1.7. Внешний вид рентгеновской установки

корпусов микросхем. Метод рентгеноскопического моделирования должен будет дополнить или даже полностью заменить метод поперечного секционирования, практикуемый в настоящее время в целях выявления дефектов.

«Прежде, чтобы выявить дефект в том или ином изделии или просто узнать, как оно устроено, изделие приходилось разрезать, из-за чего опытный образец разрушался, – говорит сотрудник ATD Q&R Джеффри Томас (Jeffrey Thomas). – С новой же технологией разрушать ничего не нужно: мы получаем рентгеновскую модель опытного образца изделия, “рассматриваем” ее со всех сторон и видим все, что нам нужно

увидеть». По мнению Дж. Томаса, технология трехмерного рентгеноскопического моделирования является уникальной для всей полупроводниковой отрасли, но имеет шанс стать стандартом уже в ближайшие годы. Этот прогноз подтвердился.

## 1.3. Компоненты интегральных микросхем

### 1.3.1. Компоненты микросхем – пассивные и активные

Принципиально современные интегральные микросхемы ничем не отличаются от обычных электронных схем или радиосхем. Они состоят из различных устройств, построенных на активных и пассивных компонентах. К *пассивным компонентам* относятся резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, различные типы диодов, линии задержки и передачи сигналов, трансформаторы и т. д. Пассивные компоненты не способны усиливать и генерировать сигналы.

Для усиления и генерации сигналов используются *активные компоненты* – различные типы транзисторов, приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением или проводимостью (негатроны: лавинные транзисторы, однопереходные транзисторы, динисторы, тиристоры и др. [1–11]). Наиболее распространенными компонентами интегральных микросхем стали полевые транзисторы, особенности физической структуры которых позволяют легко изготавливать их методами современной интегральной технологии.

Первые типы микросхем были построены на биполярных транзисторах, имеющих структуру *p-n-p* или *n-p-n*. Эти приборы, как интегральные, так и дискретные, широко применяются и поныне. Однако технологически для интегральной технологии лучше оказались приспособлены полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [3–5, 144, 145].

Главное отличие интегральных микросхем от обычных электронных схем (точнее сказать, устройств) заключается в одновременном (на каждой из ряда стадий) изготовлении всех активных и пассивных компонентов и соединений между ними на одной полупроводниковой подложке (кристалле или чипе). Для этого используются процессы фотолитографии, нанесения на подложку слоев различных материалов (в том числе путем напыления и диффузии), их травления и т. д. Хотя число стадий изготовления микросхем достигает десятков, иногда и сотен, таким образом создаются микросхемы с числом компонентов на них в сотни тысяч миллионов и даже в несколько миллиардов.

### 1.3.2. Полевые транзисторы – кирпичики интегральных микросхем

*Полевые транзисторы* – активные полупроводниковые приборы, управляемые электрическим полем. Они имеют тонкую область полупроводника (*канал*) с



контактами истока и стока, покрытую *затвором*, расположенным очень близко от канала. Поперечное поле затвора управляет проводимостью канала. Физические основы работы полевых транзисторов и устройства на них детально описаны в ряде книг, например в [3–5]. Ныне полевые транзисторы – самые массовые компоненты микросхем. Их число в современных однокристальных микропроцессорах составляет сотни миллионов и уже превысило за миллиард в некоторых микросхемах наиболее мощных микропроцессоров и в микросхемах динамической памяти большой емкости. При этом полевые транзисторы используются не только как активные приборы, но и как источники почти неизменного тока и резисторы.

Если затвор с каналом образуют *p-n*-переход, то приборы называются *полевыми транзисторами с управляющим p-n-переходом*. При нулевом напряжении на затворе (относительно истока) эти приборы открыты. При изменении напряжения на *p-n*-переходе меняются его ширина, толщина и проводимость канала. Последняя максимальна, когда напряжение на *p-n*-переходе равно нулю или смещает его в прямом направлении. Это, однако, ведет к резкому росту тока затвора, поэтому у обычных ПТ нежелательно. Обычно приборы используются при обратной полярности напряжения на затворе. Приборы могут быть с каналом *n*- или *p*-типа.

Другой, ныне наиболее распространенный класс приборов – *МДП*-транзисторы. За рубежом эти приборы именуют как *MOS*-транзисторы (*Metal – Oxid – Semiconductor*). Они имеют металлический или поликристаллический затвор, отделенный от канала очень тонким слоем диэлектрика. Нормально они закрыты и открываются, если напряжение затвор-исток превышает некоторый пороговый уровень  $U_0$ . Поле затвора индуцирует основные носители в канале. Поэтому такие приборы называют *МДП-транзисторами с индуцированным каналом*. Появление канала ведет к уменьшению сопротивления (резистивности) области транзистора между истоком и стоком. Если к стоку подключен относительно истока источник напряжения, то в цепи стока начнет протекать ток – тем больший, чем больше напряжение на затворе. По существу, в импульсных устройствах эти приборы являются простейшими переключателями с нормально закрытым состоянием.

Современная технология изготовления *МДП*-транзисторов позволяет создать канал *p*- или *n*-типа, заведомо проводящий ток при нулевом напряжении на затворе. Приборы этого типа называются *МДП-транзисторами со встроенным каналом*. Они нормально открыты и управляются (ток стока увеличивается или уменьшается) напряжением на затворе различной полярности. Эти приборы могут служить в качестве переключателя, нормально открытого. Они могут использоваться также в качестве нелинейных резисторов, занимая при этом на подложке микросхем место намного меньшее, чем занимает резистор в виде тонкой пленки проводящего материала – металла или полупроводника.

В зависимости от типа проводимости канальной области ПТ могут быть *n*- или *p*-канальными. Это находит отражение в обозначениях полевых транзисторов (рис. 1.8), которые как бы копируют структуру приборов того или иного класса. Напряжение на стоке *n*-канальных ПТ положительное, а *p*-канальных – отрицательное. Далее выводы затвора, стока и истока мы будем обозначать соответственно как «З», «С» и «И».

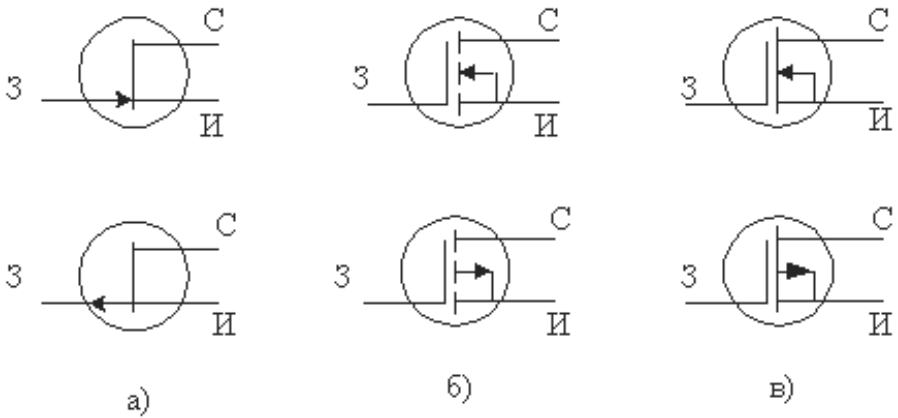


Рис. 1.8. Обозначение полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (а), индуцированным (б) и встроеным (в) каналами

Будучи трехэлектродными приборами, ПТ характеризуются прежде всего семейством выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ), то есть зависимостью тока стока  $I_{C\text{И}}$  от напряжений сток-исток  $U_{C\text{И}}$  и затвор-исток  $U_{ЗИ}$ :  $I_C = f(U_{C\text{И}}, U_{ЗИ})$ . Вид характеристик в рабочих областях напоминает вид аналогичных характеристик электронных ламп.

### 1.3.3. Интегральные микромощные полевые транзисторы

В интегральных микросхемах, например в микропроцессорах или устройствах памяти, используется огромное число полевых транзисторов. Оценить мощность отдельного прибора можно грубо из следующего примера: пусть микропроцессор с числом транзисторов около 40 миллионов (Pentium IV изначально) потребляет мощность около 40 Вт. Это значит, что средняя потребляемая мощность одного транзистора составляет всего одну миллионную долю ватта! И это является главной специфической особенностью интегральных полевых транзисторов. Они являются *микромощными* приборами!

Конструкция обычного *полевого транзистора* упрощенно представлена на рис. 1.9. В полупроводниковой пластине из чистейшего кремния (Silicon) создаются области истока (Source) и стока (Drain) с повышенной концентрацией донорной примеси. Из стока истекают носители электрического заряда, а в сток они втекают, создавая ток стока. Между ними образуется канал. Поверх его расположен слой тончайшего диэлектрика, и на нем – «толстый» слой металла или иного проводящего материала – затвор (Gate).

Интегральные полевые транзисторы отличаются от обычных малыми размерами и более оптимальной для изготовления по интегральной технологии струк-

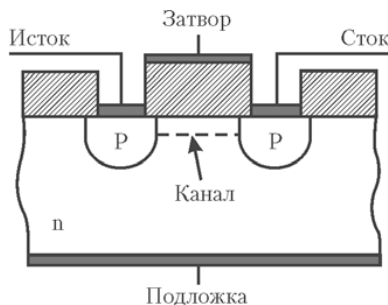


Рис. 1.9. Структура полевого транзистора со структурой МДП

турой. Рабочие токи микромощных интегральных транзисторов очень малы, хотя микропроцессоры с десятками миллионов транзисторов потребляют большой ток – единицы-десятки ампер. Более того, токи открытых интегральных полевых транзисторов становятся сравнимыми с токами утечки, которые в первую очередь зависят от качества подзатворного диэлектрика, которым служит двуокись кремния  $\text{SiO}_2$  (диоксид кремния).

В работе интегральных полевых транзисторов есть свои плюсы и минусы. Главным плюсом является практически полное отсутствие внешних емкостей, которые у обычных приборов обычно намного превышают емкости структуры. Поэтому от логических и других устройств на интегральных полевых транзисторах можно получить теоретически предельное быстродействие. Этому способствует и малая длина канала  $L$ , и малая толщина подзатворного диэлектрика, которая уже у транзисторов микросхем Intel с разрешением в 90 нм уменьшилась до пяти атомных слоев! Это привело к заметному возрастанию нежелательного тока утечки затвора.

Проблема снижения потребляемой мощности у МДП-транзисторов особенно существенна при разработке мобильных и карманных телефонов и компьютеров, например [126, 151–154]. Помимо физического уменьшения потребляемой микропроцессорами мощности, важное значение приобретают совершенствование их архитектуры и введение специальных мер по уменьшению потребляемой мощности, например путем отключения от источника питания не работающих в данный момент узлов микропроцессора. Для мобильных компьютеров (ноутбуков), к примеру, есть специальная технология Centrino [1, 151], обеспечивающая уменьшение потребляемой микропроцессорами стандартных ПК мощности с десятков до нескольких ватт, то есть на порядок.

### 1.3.4. Терагерцовые полевые транзисторы

К 30-летию создания первого в мире микропроцессора 4004 подлинную сенсацию вызвало сообщение о создании в корпорации Intel нового переключающего и поистине сверхминиатюрного транзистора, получившего название *терагерцо-*

вого транзистора (TeraHertz) (рис. 1.10) [1, 149]. Приборы способны работать с фантастически высокими частотами переключения – более 1000 ГГц (или выше 1 ТГц).

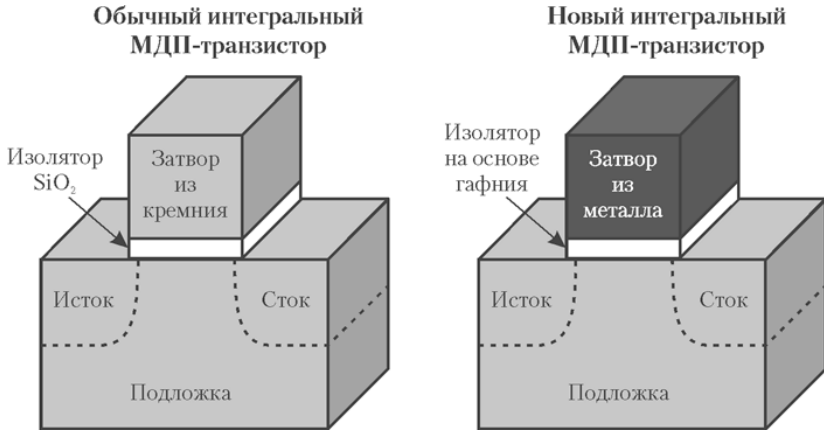


Рис. 1.10. Обычный и новый микротранзисторы структуры МДП

Уже в «старых» МДП-микротранзисторах специалистам Intel удалось создать слой диэлектрика толщиной всего 1,2 нм, или в 5 атомных слоев. Уменьшить толщину диэлектрика хотя бы еще на один атомный слой уже не удалось. Но в этом и не было необходимости – созданный сверхтонкий слой диэлектрика обладал большой утечкой, токи которой оказались сравнимы с рабочими токами транзистора. А это означает существенное увеличение потребляемой мощности у микросхем на полевых микротранзисторах. Это стало особенно существенным при начавшемся переходе к технологии изготовления микросхем с разрешением 45 нм.

В связи с этим (кстати, впервые в микроэлектронике) Intel была вынуждена провести длительные и дорогие исследования по замене двуокиси кремния SiO<sub>2</sub> в качестве диэлектрика другим материалом. Трудности были связаны с тем, что только двуокись кремния обеспечивала хорошую технологическую совместимость с кремнием. Тем не менее был найден новый материал на основе солей редкоземельного материала – гафния, и была разработана технология создания на его основе нового, так называемого High-K диэлектрика, имеющего повышенную диэлектрическую проницаемость. Это позволило несколько увеличить толщину подзатворного диэлектрика без потери управляющих свойств и уменьшить на порядок и более токи утечки.

Пленка из диэлектрика создается методом атомарного напыления, причем материал наносится последовательными слоями толщиной всего в один атом. Это типичный прием реальных нанотехнологий, использующих принципы самоорганизации структур пленок очень малой толщины.