А.А. Барыбин
В.И. Томилин
В.И. Шаповалов

# ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАКРО-, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

А.А. Барыбин, В.И. Томилин, В.И. Шаповалов

# ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАКРО-, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

**Под общей редакцией профессора А.А. Барыбина**

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям
210100 «Электроника и наноэлектроника»,
211000 «Конструирование и технология электронных средств»,
222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

УДК 538.9
ББК 32.85
Б 26

Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И. **Физико-технологические основы макро-, микро- и наноэлектроники.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 784 с. — ISBN 978-5-9221-1321-2.

Книга посвящена основным физическим явлениям и закономерностям, лежащим в основе технологических методов и процессов современной электроники. Особое внимание уделено наноматериалам и перспективным направлениям нанотехнологии. Изложение построено так, чтобы дать читателю возможность самостоятельно сформировать общие физико-технологические представления, как правило, без обращения к другой литературе. Для изучения отдельных вопросов в конце книги приведен список рекомендуемой литературы.

Книга предназначена главным образом студентам как учебное пособие по физико-технологическим основам современной электроники в ее широком понимании, включающем макро-, микро- и нанотематику, но может оказаться полезной и специалистам в этих областях.

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника», 211000 «Конструирование и технология электронных средств», 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

ISBN 978-5-9221-1321-2

© ФИЗМАТЛИТ, 2011
© А. А. Барыбин, В. И. Томилин, В. И. Шаповалов, 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . . 8
Введение . . . . . 17

Глава 1. **Общие принципы термодинамического управления равновесными и неравновесными процессами** . . . . . 73
1.1. Статистическое определение энтропии . . . . . 76
1.2. Свойства энтропии. Статистический смысл температуры . . . 81
1.3. Закон сохранения энергии в открытых системах . . . . . 85
1.4. Типы термодинамических процессов . . . . . 88
1.5. Тепловой эффект изохорных и изобарных процессов . . . . . 90
1.6. Тепловой эффект и энтропия необратимых процессов. . . . . 95
1.7. Второе начало термодинамики и производство энтропии . . . 97
1.8. Равновесие, устойчивость и эволюция замкнутых и закрытых систем . . . . . 100
1.9. Стационарность, устойчивость и эволюция открытых систем 106
1.10. Термодинамические потенциалы и соотношения между ними 119
1.11. Химический потенциал и парциальные молярные величины 122
1.12. Термодинамические функции идеального газа . . . . . 127
1.13. Понятие о стандартном состоянии веществ и таблицах стандартных термодинамических величин . . . . . 132
1.14. Условия фазового и химического равновесия . . . . . 135
1.15. Правило фаз Гиббса . . . . . 138
1.16. Условия фазового и электрохимического равновесия в системах с заряженными частицами . . . . . 140
1.17. Флуктуационная устойчивость равновесного состояния . . . . 143
1.18. Нарушение условий фазового и химического равновесия . . . 148
1.19. Формализм теории Онсагера . . . . . 155
1.20. Теорема Пригожина о минимуме производства энтропии . . . 160
1.21. Локальное квазиравновесие и локальные термодинамические соотношения . . . . . 167
1.22. Локальные уравнения баланса числа частиц, внутренней энергии и энтропии . . . . . 175

1.23. Плотность потока энтропии и локальное производство энтропии . . . . . 184
1.24. Локальная устойчивость неравновесного состояния и универсальный принцип эволюции . . . . . 197
1.25. Контрольные вопросы . . . . . 201

Глава 2. **Управление фазовыми и химическими равновесиями в технологических задачах электроники** . . . . . 205
2.1. Фазовые превращения в однокомпонентных системах. . . . . 206
2.2. Давление насыщенного пара чистого вещества. . . . . 211
2.3. Термодинамика образования твердых и жидких растворов . . 215
2.4. Модели и термодинамические свойства растворов . . . . . 222
2.5. Давление насыщенных паров над растворами и смесями веществ в конденсированном состоянии . . . . . 230
2.6. Молекулярная и атомарная растворимость газов в конденсированных средах . . . . . 237
2.7. Равновесие жидкой и твердой фаз в однокомпонентных и бинарных системах . . . . . 242
2.8. Диаграмма плавкости бинарных систем без твердых растворов . . . . . 249
2.9. Диаграммы плавкости бинарных систем с неограниченным твердым раствором . . . . . 252
2.10. Диаграммы плавкости бинарных систем с ограниченными твердыми растворами . . . . . 256
2.11. Диаграммы плавкости бинарных систем с химическими соединениями в твердой фазе . . . . . 262
2.12. Закон действующих масс и константы химического равновесия . . . . . 269
2.13. Направление протекания химической реакции. Уравнение изотермы Вант-Гоффа . . . . . 275
2.14. Температурная зависимость констант химического равновесия. Уравнения изобары и изохоры Вант-Гоффа . . . . . 280
2.15. Управление химическими реакциями. Принцип Ле Шателье 284
2.16. Газотранспортные химические реакции . . . . . 288
2.17. Ионное равновесие и термодинамические свойства растворов электролитов. . . . . 293
2.18. Термодинамика электрохимических процессов . . . . . 298
2.19. Электродные процессы в электрохимических системах. . . . . 307
2.20. Управление ионными процессами в водных растворах электролитов . . . . . 317

2.21. Анализ процессов в гальваническом и электролитическом режимах работы элемента . . . . . 322
2.22. Контрольные вопросы . . . . . 329

Глава 3. **Управление структурными равновесиями и дефектообразованием в кристаллах** . . . . . 333
3.1. Химические связи в твердых телах . . . . . 334
3.2. Классификация пространственных решеток кристаллов . . . . 342
3.3. Пространственная упаковка и координация частиц в кристаллических структурах. . . . . 349
3.4. Классификация и свойства атомных дефектов кристаллической структуры . . . . . 369
3.5. Точечные дефекты и физические свойства кристаллов . . . . . 377
3.6. Квазихимический метод описания дефектов. . . . . 399
3.7. Электронно-дырочное равновесие в полупроводниках. . . . . 402
3.8. Растворимость примесей в полупроводниках с учетом ионизации примесных атомов . . . . . 406
3.9. Взаимодействие заряженных дефектов: компенсация и ассоциация . . . . . 411
3.10. Внутреннее равновесие собственных и примесных дефектов 418
3.11. Управление собственными дефектами путем отжига кристаллов в парогазовой среде. . . . . 424
3.12. Распределение амфотерной примеси в кристаллической решетке полупроводников. . . . . 428
3.13. Контрольные вопросы . . . . . 431

Глава 4. **Управление диффузионными и кинетическими процессами в технологических задачах электроники**. . . . . 434
4.1. Механизм кинетики химических реакций. Уравнение Аррениуса . . . . . 435
4.2. Механизмы диффузии атомов в твердом теле. . . . . 439
4.3. Законы Фика. Начальные и граничные условия в задачах диффузии . . . . . 442
4.4. Диффузионные задачи на удаление вещества из твердого тела . . . . . 445
4.5. Принципы вакуумного обезгаживания материалов . . . . . 454
4.6. Роль диффузии в газопроницаемости вакуумных оболочек. . 457
4.7. Диффузионные задачи на введение вещества в твердое тело 462
4.8. Принципы диффузионного легирования полупроводников. . . 468

4.9. Диффузионная и химическая кинетика гетерогенных процессов . . . . . 475
4.10. Маскирующие свойства слоев двуокиси кремния . . . . . 483
4.11. Кинетика термического окисления кремния . . . . . 487
4.12. Кинетика химического травления полупроводников . . . . . 495
4.13. Принципы выращивания монокристаллических слоев методами эпитаксии . . . . . 501
4.14. Кинетика химического транспорта веществ в проточных системах . . . . . 514
4.15. Кинетика химического транспорта веществ в сэндвич-системах . . . . . 519
4.16. Кинетика химического транспорта веществ при реактивном распылении . . . . . 527
4.17. Кинетика процессов в электрохимических системах . . . . . 540
4.18. Контрольные вопросы . . . . . 549

Глава 5. **Управление свойствами поверхности, межфазными взаимодействиями и формированием нанообъектов** . . . 552
5.1. Квантовые особенности нанообъектов пониженной размерности . . . . . 555
5.2. Структурно-геометрические особенности и квазикристаллическое состояние нанокластеров . . . . . 560
5.3. Атомная структура, релаксация и реконструкция поверхностей . . . . . 568
5.4. Структурные дефекты реальных поверхностей . . . . . 577
5.5. Термодинамика поверхностных слоев и межфазных границ 581
5.6. Поверхностно-активные вещества, термодинамические свойства и технологии. Пленки Ленгмюра–Блоджетт . . . . . 589
5.7. Основы золь-гель технологии наноструктурированных материалов . . . . . 605
5.8. Термодинамика искривленных поверхностей . . . . . 621
5.9. Адсорбционные явления на поверхности твердых тел . . . . . 644
5.10. Кинетика мономолекулярной адсорбции и двумерная конденсация . . . . . 655
5.11. Полимолекулярная адсорбция и капиллярная конденсация . . 671
5.12. Роль адсорбции, растворения и диффузии в газопоглощении материалов . . . . . 682
5.13. Движущие силы и термодинамика гомогенного зародышеобразования . . . . . 685

5.14. Термодинамика и кинетика гетерогенного зародышеобразования . . . . . 695
5.15. Механизмы формирования и роста пленок на подложках . . . 713
5.16. Механизмы формирования герметичных соединений материалов . . . . . 737
5.17. Контрольные вопросы . . . . . 743

Приложение А. Термодинамические расчеты в технологических задачах электроники . . . . . 747
А.1. Состав газовой фазы и окисляемость металлов при термообработке оксидного катода . . . . . 747
А.2. Химическое осаждение арсенида галлия из газовой фазы в системе $GaAs–H_2O–H_2$ . . . . . 756
Приложение Б. Справочный материал . . . . . 763
Б.1. Важнейшие физические константы . . . . . 763
Б.2. Некоторые внесистемные единицы . . . . . 763
Б.3. Основные обозначения . . . . . 764
Литература, рекомендуемая для углубленного изучения . . . . . 771
Предметный указатель . . . . . 773

## Предисловие

Настоящая книга является существенно переработанным и дополненным вариантом ранее изданного учебного пособия [1]), написанного по материалам курса лекций, читаемого двумя соавторами (А.А.Б. и В.И.Ш.) в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (бывшем ЛЭТИ) для студентов факультета электроники. В книге также частично использованы материалы лекционного курса, читаемого третьим соавтором (В.И.Т.) в Сибирском федеральном университете (бывшем КГТУ) и изданного как учебное пособие [2]).

Переработка и дополнения вызваны настоятельной необходимостью включения в лекционный курс, во-первых, базовых положений термодинамики неравновесных процессов (глава 1) и, во-вторых, физико-технологических основ современной наноэлектроники (глава 5). Кроме того, в главу 3 по дефектообразованию в кристаллах добавлены элементы кристаллохимии и кристаллографии.

Изложение вопросов современной нанотехнологии отразилось и в названии книги, которое теперь, наряду с уже привычными *микроэлектроникой* и *наноэлектроникой*, содержит новый термин «***макроэлектроника***». Сюда мы относим все многообразие дискретных приборов вакуумной, газоразрядной и твердотельной электроники с размерами от миллиметров (навесные элементы гибридных интегральных схем) до дециметров и вплоть до метров (рентгеновские трубки, мощные СВЧ-приборы, генераторные и модуляторные лампы). Эти приборы, принципиально разработанные еще в давние годы, успешно функционируют и ныне. На наш взгляд, введенная нами триада «***макро – микро – нано***», наиболее полно и естественно отражает все направления современной электроники в ее широком понимании.

---

[1]) *Барыбин А.А.* Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы. — М.: Физматлит, 2006.

[2]) *Томилин В.И., Томилина Н.П.* Физико-химические и термодинамические основы материаловедения и технологий электронных средств. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.

Название книги «Физико-технологические основы ... электроники», как и ранее, отражает технологическую направленность в изучении физических и физико-химических явлений и закономерностей, лежащих в основе принципов, методов и процессов, используемых в производстве современных электронных приборов и устройств. Именно этим данное учебное пособие отличается от учебных дисциплин, близких по названию к «Физическим основам электроники», где изучаются физические закономерности в вакууме, плазме и твердом теле, положенные в основу принципа действия того или иного прибора.

Повседневный быт современного человека заполнен разнообразными электронными устройствами — телевизорами и плазменными панелями, микроволновыми печами и холодильниками, персональными компьютерами, сотовыми телефонами, спутниковыми навигаторами и другой техникой, обеспечивающей высокий комфорт в жизни населения планеты. «Большой взрыв» в развитии техники, в частности радиоэлектроники, возникший в последние десятилетия прошлого века, в первую очередь обязан прогрессу в разработке элементной базы электроники.

Высокотехнологичная электронная индустрия, являясь одной из важнейших базовых отраслей, во многом определяет сегодня место развитого государства в постиндустриальном информационном обществе. Электронная промышленность, взявшая старт в начале прошлого века с выпуска вакуумного диода и триода, почти за столетие прошла громадный путь. Примером современных достижений в массовом электронном производстве можно назвать кремниевые процессоры, имеющие на одном квадратном сантиметре до 300 млн транзисторов при минимальном размере элементов 32 нм. Но этот результат, хотя и является впечатляющим, не исчерпывает всех достижений ученых и инженеров, работающих над поиском и созданием новых наноэлементов.

Еще около двадцати лет назад ключевое направление развития электроники связывали с планарно-интегральной технологией, на основе которой изготавливали кремниевые интегральные микросхемы, приборы оптоэлектроники, акустоэлектроники, криоэлектроники и спинволновой электроники. Но на рубеже веков возникла «нанотехнологическая революция», охватившая практически все важные сферы жизнедеятельности человека. По мнению большинства экспертов в области научно-технической политики, последствия внедрения нанотехнологических разработок будут обширнее и глубже, чем результаты «компьютерной революции» последней трети прошлого столетия. В настоящее время среди элементов наноэлектроники уже имеются лазеры на

квантовых ямах и одноэлектронные транзисторы, изготовленные методами современной нанотехнологии.

Элементная база электроники включает приборы, перекрывающие огромный частотный диапазон от сверхнизких и низких звуковых частот до высоких и сверхвысоких радиочастот, кончая оптическим и рентгеновским излучением. Они выполняют самые разнообразные функции в системах передачи, приема, хранения и обработки информации. Сюда относятся такие функции, как:

- генерация и усиление сигналов;
- различные виды преобразования спектра сигналов (модуляция, детектирование, смешение, фильтрация, сжатие, расширение или фурье-трансформация сигналов, временна́я задержка и свертка сигналов);
- коммутационные преобразования в устройствах хранения и цифровой обработки сигналов;
- электрооптические и фотоэлектрические преобразования в устройствах индикации и визуализации сигналов.

Одно только перечисление функциональных назначений приборов свидетельствует об их огромном многообразии. Более того, такое многообразие расширяется за счет различия в принципе действия, частотно-геометрических факторах и конструктивно-типовых признаках приборов. Эти различия естественно порождают многообразие технологических процессов, методов, операций и приемов изготовления электронных приборов и устройств.

Номенклатура современной элементной базы электроники (включая электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые и другие приборы дискретного и интегрального микро- и наноисполнения) обширна и разнообразна по своему функциональному назначению, принципу работы, конструктивным и технологическим особенностям. Поэтому не представляется возможным детальное и углубленное изучение технологии всех типов приборов в рамках часов, предусмотренных учебными планами технологических дисциплин.

В этих условиях при построении учебного курса единственно возможным и методически оправданным остается *дедуктивный подход* к отбору учебного материала (от общего к частному). Такой подход должен базироваться на изложении фундаментальных физических и физико-химических закономерностей, присущих различным технологическим процессам, используемым при изготовлении приборов современной электроники. Эти общие закономерности характерны практически для всех типов приборов, принадлежащих к одному из трех направлений электроники:

• ***макроэлектроника***, к которой отнесены все типы электровакуумных, газоразрядных, дискретных полупроводниковых приборов и пленочных интегральных схем, изготавливаемых по *индивидуальным технологиям* для каждого типа приборов;

• ***микроэлектроника***, в которую объединены твердотельные приборы и интегральные микросхемы, для производства которых используются *интегрально-групповые технологии*;

• ***наноэлектроника***, которая включает современные приборы и наноструктуры, изготовляемые методами *нанотехнологии*, в том числе с применением новых наноматериалов.

Характерной особенностью современного этапа развития технологии элементной базы электроники является быстрое техническое освоение последних достижений в различных областях науки. Сюда относятся: физика вакуума, физика плазмы, физика твердого тела и тонких пленок, физика поверхности, физика взаимодействия с твердым телом концентрированных потоков энергии (пучков заряженных частиц и фотонов), химическая термодинамика и кинетика, электрохимия, кристаллохимия, материаловедение и многое другое. Многообразие технологических методов, приемов и процессов, используемых в современной электронике, делает методически оправданным вышеупомянутый дедуктивный подход при лекционном изложении курса технологии электронных приборов в ее широком понимании.

В основе любого технологического процесса лежит определенное физическое, химическое, электрохимическое или иное воздействие на материал с целью управляемого изменения его состояния, структуры или состава. Такой взгляд на технологические процессы позволяет выделить их базовые физико-технологические черты и показать общие физические закономерности, управляющие этими процессами вне зависимости от принадлежности прибора к той или иной группе. Именно подобный методологический подход был положен в основу построения настоящего учебного пособия. Авторский отбор материала, необходимого для изложения физических и физико-химических основ технологии, определялся исключительно его применимостью к физико-технологическим проблемам электроники (в ее макро-, микро- и нанореализациях). Бесспорно, это ограничивает круг рассматриваемых физических явлений, но позволяет в достаточно компактной форме охватить наиболее значимые технологические процессы.

***Введение*** открывает учебное пособие с целью дать читателю общее представление о современном состоянии элементной базы электроники в ее исторической ретроспективе. Кратко изложены

основные технологические особенности изготовления электронных приборов макроэлектроники и описаны пути перехода кремниевой микропроцессорной технологии к наноразмерному диапазону. Нанотехнологическое направление развития элементной базы электроники связано с перспективами в области создания новых (в том числе углеродных) наноматериалов и с разработкой новых методов и приемов нанотехнологии и нанодиагностики.

***Первая глава*** является базовой и содержит фундаментальные вопросы равновесной и неравновесной термодинамики, важные для понимания тех физических закономерностей, которые составляют основу многообразных процессов, используемых в технологии современной электроники. Традиционное изложение равновесной термодинамики базируется на трех постулатах, называемых началами термодинамики. Они феноменологически выражают общие закономерности, наблюдаемые в природе, без выяснения их микроскопической основы. Благодаря общности базовых положений, термодинамический подход дает результаты, применимые к разнообразным макроскопическим системам.

В отличие от традиционного изложения, в первой главе за основу взят статистический подход, основанный на больцмановском определении энтропии. В таком изложении известные начала равновесной термодинамики, выражающие закон сохранения энергии в открытых системах, критерий самопроизвольности процессов в закрытых системах и принцип недостижимости абсолютного нуля температуры, появляются в обратном порядке. Полученные в этой главе общие соотношения обратимой термодинамики, в частности условия фазового и химического равновесия, активно работают в последующих главах.

В первую главу включены также концептуальные вопросы неравновесной термодинамики необратимых процессов, базирующиеся на фундаментальных результатах Онсагера и Пригожина. Сюда относятся элементы линейной теории Онсагера, обоснование понятий локального квазиравновесия, потока и производства энтропии, теорема Пригожина о минимуме производства энтропии и универсальный принцип эволюции неравновесных систем. Эти вопросы существенно расширяют физический кругозор читателя и формируют новый взгляд на необратимость неравновесных процессов в открытых системах как источник самоорганизации системы, приводящий к формированию устойчивых диссипативных структур по терминологии Пригожина. Параграфы, посвященные изложению этих вопросов (пп. 1.19–1.24), при первом чтении книги могут быть опущены.

***Вторая глава*** рассматривает основные физические закономерности, которые описывают фазовые равновесия и управляют изменением фазового состояния веществ, а также основные положения химической термодинамики для систем с реактивными компонентами. Сюда также включены те вопросы, связанные с ионными и электрохимическими процессами, которые имеют непосредственное отношение к технологическим проблемам электроники. Как уже отмечалось, несмотря на многообразие процессов технологии, они могут быть объединены общностью физических явлений, лежащих в основе их действия. Например, технологические операции, проводимые в вакууме и газовых средах (такие как вакуумное обезгаживание и очистка материалов, термовакуумное испарение и конденсация, газофазная эпитаксия, легирование полупроводников из газовой фазы и др.), управляются законами испарения и сублимации конденсированных сред, растворения и диффузии газов в этих средах и т. п.

Закономерности взаимодействия между жидкой и твердой фазами, описываемые при помощи диаграмм плавкости, лежат в основе таких технологических операций, как пайка припоями, формирование омических контактов к полупроводникам, жидкофазная эпитаксия, кристаллизационные методы выращивания и очистки веществ и др. Законы химического и электрохимического взаимодействия управляют процессами очистки, травления и окисления поверхности, химическим транспортом веществ при газофазной эпитаксии, формированием термоэмиттирующего и люминофорного покрытий в электровакуумных приборах и т. п. Большинство из вышеперечисленных вопросов и составляет основное содержание второй главы.

***Третья глава*** содержит изложение основных физических закономерностей, которые определяют поведение дефектов в кристаллах и позволяют управлять ими для целенаправленного изменения электрофизических свойств путем легирования, то есть искусственного создания точечных дефектов в кристаллических полупроводниковых структурах.

Некоторые свойства твердых тел (плотность, упругость, решеточная теплоемкость, диэлектрическая проницаемость) малочувствительны к дефектности кристалла и адекватно описываются в рамках модели идеальной кристаллической решетки. Однако большинство физических свойств (электрические, магнитные, оптические, механические, тепловые) являются дефектоочувствительными, то есть зависят от степени несовершенства кристаллической решетки. Поскольку реальные твердые тела

имеют в большей или меньшей степени нарушения периодической структуры, то управление дефектообразованием в технологических процессах приобретает важное практическое значение.

Как уже отмечалось, материал этой главы изначально дополнен краткими сведениями из кристаллохимии и кристаллографии (пп. 3.1–3.4), необходимыми для последующего изложения как в этой главе, так и в главе 5.

***Четвертая глава*** рассматривает неравновесные физические явления, возникающие при нарушении условий фазового и химического равновесия, в применении к технологическим системам. В предыдущих главах были рассмотрены равновесные закономерности, лежащие в основе управления фазовыми, химическими и электрохимическими превращениями веществ и процессами дефектообразования в кристаллах полупроводников. Принципиальная возможность (или невозможность) смещения термодинамического равновесия в нужном направлении устанавливалась на основании знака приращения изобарного (или изохорного) потенциала $\Delta G$ (или $\Delta F$) для рассматриваемого процесса. Однако практическая осуществимость процесса определяется не только термодинамическими, но и кинетическими факторами.

Важную роль при этом, в частности при формировании скорости протекания процесса, играют существенно неравновесные закономерности, лежащие в основе химической и диффузионной кинетики. Именно эти закономерности управляют процессами вакуумного обезгаживания и газопроницаемости материалов, диффузионного легирования полупроводников, термического окисления кремния, химического травления полупроводников и эпитаксиального выращивания монокристаллических слоев, рассмотрение которых и составляет содержание четвертой главы.

Наряду с химическим транспортом веществ в проточных и сэндвич-системах, в эту главу добавлено рассмотрение кинетики химического транспорта при реактивном распылении металлов.

***Пятая глава*** подверглась наибольшим изменениям в сравнении с предыдущим изданием учебного пособия. Эти изменения, в первую очередь, связаны с дополнительным включением вопросов, относящихся к современным проблемам нанотехнологии и наноматериалов. Сюда относятся квантовые особенности нанообъектов пониженной размерности, структурно-геометрические особенности и квазикристаллическое состояние нанокластеров, атомная структура и дефекты поверхности, поверхностно-активные вещества в технологии пленок Ленгмюра–Блоджетт, основы золь-гель технологии, полимолекулярная адсорбция, двумерная

и капиллярная конденсация. Остальной материал главы, посвященный изложению основных положений термодинамики поверхностных явлений и межфазных взаимодействий, претерпел некоторые изменения за счет внесения дополнений. В первую очередь, они имеют отношение к таким физико-технологическим проблемам, как сорбционные явления на поверхности твердых тел, модели зародышеобразования и механизмы эпитаксиального роста пленок на совершенных подложках (механизмы Фольмера–Вебера, Франка–Ван-дер-Мерве и Странского–Крастанова).

***Приложение А*** содержит изложение методики термодинамических расчетов в применении к двум избранным технологическим задачам электроники: *во-первых*, анализ состава газовой фазы и окисляемости конструкционных материалов в вакуумном приборе при термообработке оксидного катода и, *во-вторых*, расчет процесса химического осаждения арсенида галлия из газовой фазы в системе $GaAs–H_2O–H_2$. Справочный материал, включая обозначения используемых величин, приведен в ***приложении Б***.

В учебное пособие, как и ранее, не включены вопросы, относящиеся к процессам электронного, ионного и лазерного воздействия на материалы, которые сегодня находят применение в микроэлектронной и наноэлектронной технологиях. Это сделано сознательно, так как специфика физических явлений при взаимодействии корпускулярных потоков с поверхностью твердых тел не вписывается в избранную нами «термодинамическую схему» изложения физических и физико-химических основ технологии.

В настоящем учебное пособии изложение материала построено так, чтобы дать читателю возможность самостоятельно сформировать общие физико-технологические представления путем изучения основных физических, химических и электрохимических закономерностей, как правило, без обращения к другой литературе. Для этого рассмотрение большинства вопросов начинается с обсуждения исходных модельных представлений, на базе которых приводится детальный вывод необходимых математических соотношений с последующей интерпретацией их физического содержания. Каждая глава заканчивается перечнем контрольных вопросов. С целью расширения кругозора студенческой аудитории в книге даны подстрочные сноски, содержащие краткие научно-биографические сведения об известных ученых.

Для углубленного изучения отдельных разделов в конце книги приведен список рекомендуемой литературы, который дополнен перечнем избранных публикаций по отдельным вопросам наноматериалов и нанотехнологий, приведенным в конце введения.

Книга предназначена главным образом для студентов в качестве учебного пособия по физико-технологическим основам макроэлектроники, микроэлектроники и наноэлектроники. Она может оказаться полезной также и специалистам в этих областях, поскольку содержит некоторые вопросы, выходящие за рамки учебной дисциплины, которые могут быть опущены студентами (например, пп. 1.19–1.24, 2.20, 2.21, 4.14–4.17).

Авторы благодарят своих коллег, деловое общение с которыми оказало полезное воздействие на методический отбор материала и структуру книги. Искреннюю признательность авторы адресуют В. В. Кузнецову и О. Ф. Луцкой за замечания при чтении отдельных глав рукописи книги, которые содействовали ее улучшению.

Любые критические замечания и пожелания, высланные по нижеуказанному адресу, будут приняты с благодарностью.

Санкт-Петербург *А. А. Барыбин*
сентябрь 2010 г. barybin@mail.ru

Введение

# ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ МАКРО-, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Зарождение электроники как научно-технического направления связывают с именами Джона Флеминга (изобретение диода, 1904 г.) и Ли де Фореста (изобретение триода, 1906 г.) [1]. С тех пор за сто с небольшим лет электроника (в широком ее понимании, включающем все современные направления) прошла огромный путь, определивший на сегодняшний день по сути дела весь научно-технический прогресс человечества. За эти годы можно четко проследить три стимулирующие тенденции, которые формировали различные направления в развитии электроники:

- повышение рабочей мощности устройств,
- освоение все более высоких рабочих частот,
- стремление к микроминиатюризации аппаратуры.

Позднее, с появлением интегральных микросхем и микропроцессоров, наметилась четвертая тенденция — переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой обработке с целью повышения быстродействия устройств.

---

[1]) Флеминг (Fleming) Джон Амброз (1849–1945) — английский ученый в области электротехники и радиотехники, изобрел (1904) двухэлектродную вакуумную лампу с термокатодом (диод) и выпрямитель на ее основе (назвав их, соответственно, «кенотроном» и «осцилляторным вентилем»), известен работами в области электрических трансформаторов, электроизмерений, фотометрии, электроники и беспроводной (радио) связи. Удостоен (1933) Медали почета IRE (Института радиоинженеров) за «заметную роль, которую он сыграл в деле внедрения физических и инженерных принципов в радиотехнике».

Ли де Форест (Lee de Forest) (1873–1961) — американский изобретатель в области радиоэлектроники, изобрел (1906) вакуумный триод (названный им «аудионом») и создал на его основе приемник для беспроводного телеграфа, дав ему впервые название «радио», считается основателем общественного радиовещания (1910) и автором первого патента на озвучивание фильмов (1919). Удостоен (1922) Медали почета IRE (Института радиоинженеров) за «изобретение трехэлектродной лампы и признание его большого вклада в радио».

Перечисленные выше тенденции развития электроники привели в настоящее время к огромному многообразию конкретных электронных приборов и устройств, предназначенных для решения различных естественно-научных, инженерно-технических, эколого-космических, медико-биологических и повседневных бытовых проблем жизнеобеспечения людей.

В историческом плане можно выделить следующие основные этапы, которые прошла электроника до современного состояния.

**1.** ***Эра вакуумной электроники*** начинается с появления первых вакуумных приборов (диода и триода) в начале прошлого столетия и успешно продолжается вплоть до наших дней в классе мощных генераторных и модуляторных ламп, приборов СВЧ-диапазона (клистроны, магнетроны, лампы бегущей и обратной волны и др.), рентгеновских и электронно-лучевых приборов (осциллографические, радиолокационные, передающие и приемные телевизионные трубки, мониторы компьютеров и др.) и разнообразных газоразрядных приборов силовой и бытовой электроники.

**2.** ***Эра полупроводниковой электроники*** начинается с изобретения транзистора в 1947 году Д. Бардиным, У. Браттейном и У. Шокли, получившими впоследствии Нобелевскую премию [1]).

---

[1]) Бардин (Bardeen) Джон (1908–1991) — крупнейший американский физик, специалист в области физики твердого тела и физики низких температур, один из изобретателей полупроводниковых транзисторов (точечного, 1947 г., и плоскостного, 1950 г.) и один из соавторов микроскопической теории сверхпроводимости; исследуя проблемы электропроводности металлов, первым предсказал притяжение между электронами благодаря обмену виртуальными фононами («куперовские пары»). Вторая Нобелевская премия по физике (совместно с Л. Купером и Дж. Шриффером, 1972) «за совместное создание теории сверхпроводимости, обычно называемой теорией БКШ».

Браттейн (Brattain) Уолтер Хаузер (1902–1987) — американский физик-экспериментатор, специалист в области физики полупроводников, один из создателей первых полупроводниковых транзисторов; изучал влияние адсорбционных пленок на электронную эмиссию с поверхности твердых тел, исследовал механизмы рекомбинации зарядов и поверхностные свойства германия и кремния, чрезвычайно важные для работы полевого транзистора, предложенного позже У. Шокли.

Шокли (Shockley) Уильям Брэдфорд (1910–1989) — американский физик, специалист по физике твердого тела (ферромагнетизм, пластичность металлов, теория дислокаций), изучал роль дефектов и поверхностных явлений в полупроводниках (поверхностные состояния Шокли), первым наблюдал дырочную проводимость, исследовал эффекты инжекции носителей заряда, обнаружил «эффект поля» и построил теорию $p$–$n$-перехода, на основе которой предложил плоскостной $p$–$n$–$p$-транзистор.

Совместная Нобелевская премия по физике (1956) «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Изначально полупроводниковые диоды и триоды (транзисторы) исполнялись в виде дискретных (корпусных) элементов на основе германия или кремния, которые заменяли вакуумные приборы в электрических цепях, составленных из резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Это продолжалось около десятка лет, пока накопленный технологический опыт не позволил создавать то или иное функциональное устройство в виде единой *интегральной схемы* — *гибридной* (ГИС с навесными полупроводниковыми элементами в бескорпусном исполнении) или *монолитной* (МИС с пассивными и активными элементами схемы, изготовленными на одной подложке в едином технологическом цикле). Так зародилась новая эра интегральной электроники.

**3. *Эра квантовой электроники*** ведет отсчет с изобретения принципа действия мазера/лазера[1)] в 1954 году Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и независимо от них Ч. Таунсом, получившими впоследствии Нобелевскую премию[2)]. Первые демонстрации мазерного эффекта на пучке молекул аммиака инициировали широкий фронт теоретических и экспериментальных исследований, главным образом, в радиочастотном диапазоне. Лишь в 1960 году

---

[1)] Сокращение от англ. *Microwave/Light Amplification Stimulated by Emission of Radiation*, предложенное Ч. Таунсом.

[2)] Басов Николай Геннадиевич (1922–2001) — советский и российский физик, специалист по квантовой электронике, установил (вместе с А. М. Прохоровым) принцип создания квантовых усилителей и генераторов, предложил различные типы полупроводниковых, газовых, химических и эксимерных лазеров, разработал физические основы создания квантовых стандартов частоты и выдвинул идею использования лазеров для управления термоядерным синтезом.

Прохоров Александр Михайлович (1916–2002) — советский и российский физик, специалист в области радиофизики, радиоспектроскопии, квантовой электроники и нелинейной оптики, сформулировал (вместе с Н. Г. Басовым) основные принципы квантового усиления и генерации, исследовал структуру волновых пучков в нелинейной среде, распространение оптических солитонов в световодах, лазерную генерацию ультразвука и управление свойствами твердого тела и лазерной плазмы при воздействии световыми пучками.

Таунс (Townes) Чарльз Хард (род. 1915) — американский физик, специалист в области радиоспектроскопии, нелинейной оптики, радиоастрономии и квантовой электроники, выдвинул идею генерации и усиления электромагнитных волн и на ее основе создал первый квантовый генератор (мазер на аммиаке), позже применил лазеры для высокоточной проверки специальной теории относительности и для исследований в астрофизике, открыл мазерный эффект в космосе, ввел новые современные методы инфракрасного детектирования на основе лазеров в астрономическую спектроскопию и интерферометрию.

Совместная Нобелевская премия по физике (1964) «за фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию генераторов и усилителей, основанных на лазерно-мазерном принципе».

был создан оптический квантовый генератор (лазер) на кристалле рубина, а через два года появились первые инжекционные лазеры на основе $p-n$-перехода в полупроводнике GaAs. Однако работали они в импульсном режиме при пониженных температурах и потому представляли малый практический интерес, несмотря на высокий коэффициент полезного действия (до 70%).

Основной задачей было получение непрерывной генерации при малых пороговых токах и комнатной температуре с сохранением высокого к.п.д. Решение этой задачи оказалось возможным путем замены гомоперехода в GaAs двойной гетероструктурой (ДГС) — узкозонный GaAs между двумя широкозонными полупроводниками на основе твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$. Первыми это удалось реализовать в 1970 году сотрудникам Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе (Ленинград) под руководством Ж. И. Алферова, получившего впоследствии Нобелевскую премию [1]). Последующие работы этого коллектива и конкурирующих с ним зарубежных фирм над созданием гетеролазеров со сверхрешетками и размерным квантованием заложили физико-технологические основы современной оптоэлектроники. Именно появление ДГС-лазеров открыло широкую дорогу для применения интегрально-оптических систем и систем волоконно-оптической связи во всемирной сети Интернет.

**4.** ***Эра интегральной электроники*** начинается с промышленного внедрения *кремниевой планарной технологии*, разработанной к началу 60-х годов на базе освоенных к тому времени технологических процессов. Сюда в первую очередь следует отнести: эпитаксиальное выращивание монокристаллических пленок, диффузионное легирование, термическое окисление кремния, вакуумное напыление алюминия, фотолитографию. Именно эти процессы сформировали надежный фундамент для перехода к планарно-эпитаксиальной технологии интегральных схем (ИС). У истоков этой технологии стояли два человека — Дж. Килби из Texas Instruments, получивший впоследствии, через сорок лет,

---

[1]) Алферов Жорес Иванович (род. 1930) — советский и российский ученый, специалист в области полупроводниковой оптоэлектроники и физики наноструктур пониженной размерности, разработал (с участием сотрудников ФТИ им. А. Ф. Иоффе) новые физико-технологические принципы конструирования полупроводниковых гетероструктур на основе уникальных материалов, включая объекты пониженной размерности (квантовые ямы, проволоки/нити, точки) для разнообразных приборных применений (лазеры, светодиоды, солнечные батареи и транзисторы). Нобелевская премия по физике (совместно с Г. Кремером, 2000) «за разработку полупроводниковых гетероструктур для быстродействующей электроники и оптоэлектроники».

Нобелевскую премию [1]), и Р. Нойс из Fairchild Semiconductor [2]). Их плодотворные идеи, сформулированные независимо друг от друга (1959 г. — патент Килби: ГИС на германии; патент Нойса: МИС на кремнии), дали весомый инженерно-практический вклад, определив (в большей степени технологическими идеями Р. Нойса) направление развития интегральных схем как элементной базы будущей *цифровой микроэлектроники*.

Наряду с этим, в те же годы возникли новые принципы аналоговой обработки сигналов, положенные в основу так называемой *функциональной электроники*. Здесь привычные схемотехнические решения заменены нетрадиционным использованием особого рода динамических неоднородностей в твердом теле (например, в форме движущихся доменов или линейных и нелинейных волн различной природы) для выполнения тех или иных функций. Именно это породило такие направления функциональной электроники, как акустоэлектроника, спин-волновая электроника, плазменно-волновая электроника и криоэлектроника.

Несмотря на ряд технически привлекательных и многообещающих эффектов, открытых при разработке этих направлений функциональной электроники, наибольшие перспективы в настоящее время связывают все-таки с наноэлектроникой.

**5. *Эра наноэлектроники*** в ее сегодняшнем широко популяризованном виде, как и другие нанотехнологии, имеет тем не менее известные физические истоки и технологические предпосылки. Для подтверждения этого приведем в хронологическом порядке наиболее значимые научно-технические достижения, на которых сегодня базируются нанотехнология и физика наноструктур.

---

[1]) Килби (Kilby) Джек Сен-Клер (1923–2005) — американский инженер-схемотехник, специалист в прикладной электронике, первым выдвинул идею интеграции множества элементов электрической цепи в одном кристалле, запатентовал около 60 изобретений, в том числе карманный калькулятор и термопринтер; его имя занесено в Национальный зал славы изобретателей США, среди которых А. Нобель, Г. Форд, Т. Эдисон и другие известные имена. Нобелевская премия по физике (2000) «за вклад в создание интегральных схем».

[2]) Нойс (Noyce) Роберт Нортон (1927–1990) — американский инженер-электронщик, работал в лаборатории У. Шокли, изобретателя транзисторов, позже совместно с Гордоном Муром (см. сноску на с. 32) основал компании по производству кремниевых микропроцессоров — Fairchild Semiconductor (1957) и Intel (1968). Общительного Роберта Нойса по-дружески называли «мэром Силиконовой долины» (всемирно известного района в Северной Калифорнии, где сосредоточены предприятия компьютерной электроники). Практически во всех современных интегральных микросхемах используется разработанная Нойсом производственная технология, и только преждевременная кончина не позволила ему разделить Нобелевскую премию совместно с Дж. Килби.

1933 г. — создание электронного микроскопа просвечивающего типа с разрешением 50 нм (*Ernest Ruska*, Нобелевская премия по физике, 1986).

1939 г. — коммерческий выпуск электронного микроскопа с разрешением 10 нм (компания *Siemens*).

1966 г. — изобретение пьезодвигателя, примененного позже в сканирующем туннельном микроскопе для позиционирования с точностью до $10^{-3}$ нм (*Russel Yang*).

1968 г. — разработка метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (*Harold Manasevit*).

1971 г. — изобретение и разработка принципов молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ, *Alfred Cho*).

1973 г. — реализация методом МЛЭ полупроводниковой сверхрешетки $GaAs–Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ с периодом 7–10 нм (*Leo Esaki*, Нобелевская премия по физике, 1973).

1974 г. — появление термина «нанотехнология» (*nanos* по гречески «карлик»), означающего процесс модифицирования материала путем воздействия одиночными атомами или молекулами (*Norio Taniguchi*).

1982 г. — создание сканирующего туннельного микроскопа с межатомным разрешением (*Gerd Binnig, Heinrich Rohrer*, Нобелевская премия по физике, 1986).

1985 г. — открытие фуллеренов (*Richard Smalley, Robert Curl, Harold Croto*, Нобелевская премия по физике, 1996).

1986 г. — создание атомно-силового микроскопа с межатомным разрешением (*Gerd Binnig, Christophe Gerber*).

1988 г. — создание ДГС-лазера на *квантовой яме*, ограниченной короткопериодными сверхрешетками, с рекордно низким пороговым током (лаборатория Ж. И. Алферова, ФТИ имени А. Ф. Иоффе, Ленинград).

1991 г. — открытие углеродных нанотрубок (*Sumio Iijima*).

1999 г. — разработка общих принципов манипулирования атомами или молекулами (*Mark Reed, James Tour*).

2000 г. — создание гетеролазера на *квантовых точках* с выходной мощностью 3,5–4 Вт в непрерывном режиме и к.п.д. до 50% (лаборатория Ж. И. Алферова, ФТИ имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург).

2004 г. — получение графена, однослойной аллотропной модификации углерода (*Andre Geim, Konstantin Novoselov*, Нобелевская премия по физике, 2010).

Таким образом, в течение нескольких предшествующих десятилетий был достигнут серьезный технологический задел в создании и контроле элементов нанометровых размеров. Это открывает обнадеживающую перспективу для дальнейшего развития электроники нанометрового диапазона в направлении воспроизводимости и надежности технологических результатов.

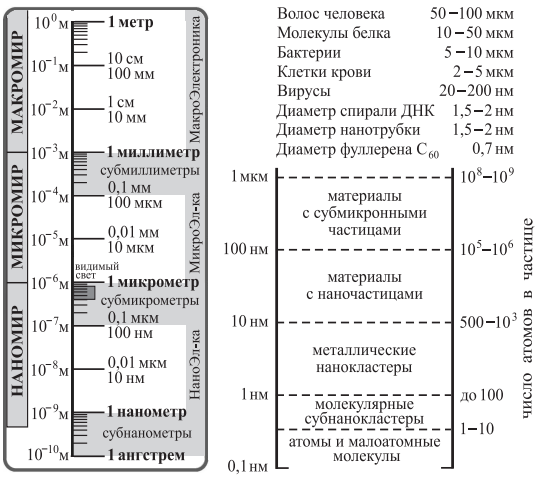


Рис. 1. Шкала размеров, характерных для объектов макромира (макроэлектроники), микромира (микроэлектроники) и наномира (наноэлектроники)

На рис. 1 приведены диапазоны размеров физических объектов, обосновывающие введение триады ***«макро – микро – нано»*** как для окружающего нас мира (макромир – микромир – наномир), так и для электроники (макроэлектроника – микроэлектроника – наноэлектроника), что ранее было отмечено в предисловии. Здесь также даны характерные размеры естественных (биологических) и искусственно созданных объектов. Из их сравнения видно, что технология сегодняшнего уровня уже позволяет создавать предельно малые объекты с размерами нанометрового и субнанометрового диапазона, такие как углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены, графены и им подобные.

Объектам макроэлектроники условно выделен диапазон размеров более 1 мм, объектам микроэлектроники — от 1 мкм до 100 мкм, а объектам наноэлектроники — от 1 нм до 100 нм. Между ними располагаются промежуточные области (выделенные серым цветом на рис. 1) *субмиллиметрового диапазона* (от 1 мм до 0,1 мм) и *субмикрометрового* (как часто говорят, *субмикронного*) *диапазона* (от 1 мкм до 0,1 мкм). В этих областях проявляются одновременно физико-технологические особенности объектов, принадлежащих соседним примыкающим диапазонам.

«Кирпичиками» нанометрового диапазона являются так называемые *кластеры* (от англ. *cluster*) — скопления взаимодействующих друг с другом атомных частиц, не превышающие 10 нм. *Наночастицами* называют частицы с размером в несколько десятков нанометров, но, как правило, не более 100 нм. Они содержат вплоть до $10^6$ атомов, а их свойства, как и свойства кластеров, существенно отличаются от свойств объемного вещества, состоящего из таких же атомов.

Объектами *субнанометровой* области (затемненной на рис. 1) с размерами от 1 нм до 0,1 нм (1 Å) являются атомы, обычные (малоатомные) молекулы, более сложные (многоатомные) молекулы (типа молекул ДНК, фуллерена $C_{60}$ и др.) и супрамолекулярные структуры (субнанокластеры), образованные межмолекулярными связями (типа дендритов, мицелл и т. п.). Примерно на пять порядков ниже лежит область внутриядерных частиц (не показанная на рисунке).

Следует обратить внимание на некоторую противоречивость вышеизложенной терминологии с той, которая принята в физике. Квантовая (микроскопическая) физика имеет дело с микрочастицами (атомами, ионами, молекулами) размером в десятые доли и единицы ангстрема, в отличие от классической (макроскопической) физики, изучающей свойства объемных материалов и макротел. Размерную область между ними (от долей миллиметра до единиц нанометра) принято называть *мезофизикой* («мезо» от греч. *средний*). Следовательно, мезофизика перекрывает диапазон размеров, характерных для микро- и наноэлектроники. Поэтому *физическая триада* «макро–мезо–микро» до некоторой степени эквивалентна *электронной триаде* «макро–микро–нано» и по сути соответствует ее смыслу (см. вводную часть гл. 5).

Задача последующего изложения — краткое описание основных этапов изготовления дискретных приборов макроэлектроники, технологических особенностей современной микроэлектроники и направлений развития и путей перехода к наноэлектронике.

## МАКРОЭЛЕКТРОНИКА:
### технологические особенности изготовления приборов

К приборам макроэлектроники будем относить те приборы, которые по своим массо-габаритным параметрам выходят за общепринятые рамки изделий микроэлектроники. Сюда, кроме приборов вакуумного и полупроводникового класса, можно также отнести разнообразные диэлектрические и ферритовые элементы, которые находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре. Как правило, подобного рода приборы изготавливают как дискретные элементы устройств (тем более, мощные приборы) и размещают индивидуально внутри аппаратуры.

Ниже остановим свое внимание только на технологии вакуумных приборов и дискретных полупроводниковых приборов (ДПП), современный внешний вид которых показан на рис. 2.

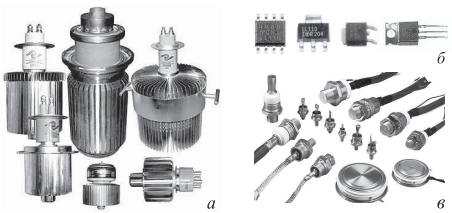


Рис. 2. Элементная база современной макроэлектроники: *а* — вакуумные генераторные и модуляторные лампы; *б* — полупроводниковые мощные транзисторы; *в* — полупроводниковые силовые диоды и тиристоры

***Вакуумные приборы*** имеют два общих признака, характерных для прибора любого типа и функционального назначения:

- *дискретный характер конструкции* прибора, состоящего из отдельных деталей и узлов — вакуумного корпуса, катода, подогревателя, анода, сеток, катодной ножки и других элементов, собранных в единую конструкцию;
- *дискретно-индивидуальный характер технологии*, порожденный дискретностью конструкции и проявляющийся в форме строгой последовательности технологических операций, которая сохраняется для всех без исключения приборов, но применяется, как правило, индивидуально к каждому экземпляру прибора.

Технологический маршрут изготовления вакуумного прибора любого типа (в том числе и газоразрядного) в обязательном порядке включает следующие операции (см. рис. 3).

Рис. 3. Технологический маршрут изготовления вакуумных приборов

Операции формообразования — *для получения необходимой формы деталей* при помощи механических, термических, электрофизических и электрохимических методов обработки материалов, таких как обработка резанием и давлением, порошковая металлургия и отливка деталей под вакуумом, ультразвуковая, электроискровая, электрохимическая, электронно-лучевая и лазерная обработка.

Операции по получению вакуумно-чистых деталей — *для очистки поверхности и обезгаживания деталей* с помощью таких методов, как обезжиривание (в трихлорэтилене и четыреххлористом углероде), химическое и электрохимическое травление и полировка (в водных растворах кислот и щелочей), промывка (в дистиллированной воде и этиловом спирте, в том числе с применением ультразвука) и рафинирующий отжиг (в вакууме или в атмосфере водорода) — см. пп. 4.4, 4.5 и 5.6.

Операции по нанесению поверхностных покрытий и защитных пленок — *для обеспечения активных функций* (термоэмиссионные, фотоэмиссионные, антиэмиссионные, люминесцентные и газопоглощающие покрытия) и *вспомогательных функций* (электроизоляционные, электропроводящие, теплоизлучающие и антикоррозийные покрытия) с помощью таких методов, как пульверизация, гальваническое и электрофоретическое осаждение, термовакуумное и электронно-лучевое испарение, катодное и ионно-плазменное распыление — см. п. 3.5.

Монтажно-сборочные операции и вакуумная герметизация прибора — *для сборки отдельных узлов и конструкции прибора в целом* при помощи таких методов, как пайка припоями, сварка плавлением (газовая, аргоно-дуговая, плазменно-лучевая, электронно-лучевая, лазерная), сварка давлением (электроконтактная, термодиффузионная, ультразвуковая, холодная), спаи металлов со стеклом и керамикой — см. п. 5.16.

Операции при откачке — *для обезгаживания деталей, активировки катода и наполнения газом* с применением термического прогрева в печах, нагрева деталей высокочастотным индуктором или электронной бомбардировкой и напуска рабочей газовой смеси (если необходимо) — см. пп. 3.5 и 4.4–4.6.

Операции на отпаянном приборе — *для стабилизации газовой среды, формирования рабочих параметров прибора и придания ему «товарного вида»* при помощи распыления газопоглотителя (если необходимо) и длительной тренировки прибора в жестком электрическом режиме, а также цоколевки, окраски и выборочных испытаний приборов.

В зависимости от класса и типа прибора отдельные технологические этапы имеют свои отличительные особенности. Так, маломощные приборы откачивают на автоматах и полуавтоматах с кратким циклом откачки (измеряемым часами и даже минутами), на заключительном этапе которого лишь распыляется газопоглотитель, но активировка катода проводится на этапе тренировки. Наоборот, мощные приборы, откачиваемые индивидуально или малыми партиями, проходят при этом полную электрическую обработку, включая активировку катода и первичную тренировку под рабочими напряжениями.

***Дискретные полупроводниковые приборы*** имеют два общих признака, характерных для прибора любого типа и любого функционального назначения:

- *монолитный характер конструкции* прибора, делающий невозможным разделение его на отдельные элементы; например, эмиттер, база и коллектор транзистора являются неразделимыми областями одного и того же полупроводникового кристалла;
- *интегрально-групповой характер технологии*, порожденный монолитностью конструкции прибора, позволяет проведение определенной группы технологических воздействий интегрально (по всей поверхности пластины) для совместного изготовления совокупности однотипных элементов, например, создание области эмиттера сразу для всех приборов на пластине.

Дело в том, что активные элементы дискретных полупроводниковых приборов (ДПП) изготавливают *не индивидуально* для каждого прибора по отдельности, а одновременно для всей партии приборов в виде совокупности однотипных элементов, размещенных на одной пластине (подложке). В этом смысле процесс их изготовления по сути не отличается от изготовления интегральных микросхем (ИМС), о которых речь пойдет ниже.

Различие между производством дискретных приборов и интегральных схем заключается лишь в том, что идентично повторенным элементом на пластине в первом случае является активный элемент дискретного прибора, а во втором случае — полностью интегральная микросхема, называемая «чипом» (от англ. *chip*). По этой причине, описывая ниже технологические особенности

полупроводниковой электроники, будем применять их с равным правом как для ДПП, так и для ИМС.

В обоих случаях технологическую основу производства составляет так называемый ***планарный процесс***[1]), под которым понимается совокупность технологических воздействий на материал (чаще всего кремний), осуществляемых с одной стороны исходной полупроводниковой пластины (называемой подложкой). Планарный процесс дает возможность одновременного изготовления в едином технологическом цикле большого числа идентичных ДПП или ИМС (до нескольких сотен и даже тысяч на одной пластине). Групповая обработка пластин (до 100–200 штук в одной партии) обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров и высокую производительность при существенном снижении себестоимости изделий. Благодаря этим особенностям планарная технология занимает доминирующее положение в современном полупроводниковом производстве.

По результату воздействия на материал все методы полупроводниковой технологии можно разделить на четыре группы.

**I группа** — ***методы удаления материала*** с использованием не только обычных жидкостных травителей (кислот и щелочей), но и «сухого травления», основанного на применении реактивных парогазовых смесей (газовое травление) и низкотемпературной плазмы (ионно-плазменное травление) — см. пп. 4.12 и 4.17.

**II группа** — ***методы осаждения материала*** на поверхность полупроводниковой пластины, такие как:

1) *нанесение металлических пленок* методами резистивного, электронно-лучевого и лазерного испарения, либо катодным и ионно-плазменным распылением металлов, выполняющих функции: а) *контактного сплава* для омических контактов, б) *высокоомного сплава* для резисторов, в) *низкоомного сплава* для токоведущих дорожек (межсоединений), обкладок конденсаторов и затворов МДП- или МОП-структур;

2) *создание диэлектрических* (*окисных*) *пленок* различными методами (например, окислением кремния), выполняющих следующие функции: а) *активная функция* подзатворного диэлектрика в МДП-приборах и изолятора элементов схемы; б) *пассивная функция* защиты поверхности приборов от внешних воздействий; в) *технологическая функция* маскирующего покрытия, селективно защищающего поверхность полупроводника от тех или

---

[1]) Первая интегральная микросхема на кремнии была создана Робертом Нойсом (см. сноску на с. 21) по планарной технологии, идею которой предложил в 1958 году Джин Хорни (Jean Hoerni), сотрудник Fairchild Semiconductor.

иных технологических воздействий, например, при локальном диффузионном или ионном легировании, а также при формировании контактных площадок и межсоединений — см. п. 4.10;

3) *осаждение монокристаллических пленок* методами жидкофазной, газофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии [1]) — см. пп. 4.13–4.15 и 5.15.

**III группа** — ***методы модификации свойств материала*** в результате диффузионного легирования или ионной имплантации — см. пп. 4.7 и 4.8.

**IV группа** — ***методы локальной микрообработки***, называемые *методами литографии*, такие как фотолитография (ФЛ), электронная литография (ЭЛ), ионная литография (ИЛ) и рентгеновская литография (РЛ).

Сущность методов литографии состоит в формировании на поверхности пластины элементов прибора или рисунка схемы с помощью специального химически стойкого органического материала — *резиста*, чувствительного к облучению ультрафиолетом (фоторезист при ФЛ), пучком ускоренных электронов (электронорезист при ЭЛ), пучком ускоренных ионов (ионорезист при ИЛ) или рентгеновским излучением (рентгенорезист при РЛ). Экспонирование выполняется через специальную маску — *фотошаблон* (ФШ) с изображением элементов прибора или рисунка схемы, селективно пропускающим облучающий поток. При фотолитографии используют обычный ультрафиолет (УФ, $\lambda = 300-400$ нм) или глубокий ультрафиолет (ГУФ, $\lambda = 150-300$ нм).

Облученные участки резиста либо разрушаются (*позитивные фоторезисты*, повторяющие рисунок ФШ), либо полимеризуются (*негативные фоторезисты*, создающие негатив рисунка ФШ), формируя скрытое изображение. После удаления соответствующих участков резиста защищенная им поверхность оказывается устойчивой к воздействию химических травителей. Это позволяет сформировать позитивное или негативное изображение элементов прибора или рисунка схемы на поверхности пластины.

Интегрально-групповая планарная технология в применении к изготовлению ДПП (например, биполярных транзисторов) позволяет установить последовательность технологических операций, приведенную на рис. 4 и отчасти применимую к ИМС.

---

[1]) Термин «эпитаксия», введенный в 1928 году Л. Руайе (L. Royer), происходит от греческих слов — *эпи* «на» и *таксис* «расположение в порядке» — что означает ориентированное наращивание на поверхности монокристаллической подложки нового слоя, который при своем росте продолжает кристаллографическую ориентацию подложки.

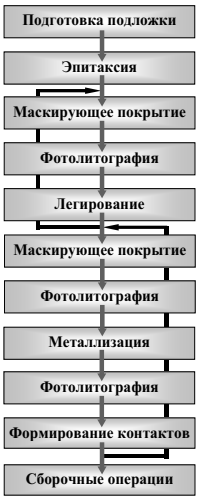


Рис. 4. Технологический маршрут изготовления ДПП

Операции механической и химической обработки — *для подготовки поверхности подложки* к эпитаксиальному наращиванию монокристаллической пленки или к планарному процессу изготовления приборов и интегральных схем — см. пп. 4.12 и 4.17.

Операции эпитаксиального роста — *для формирования на поверхности подложки полупроводниковых слоев* с необходимыми электрофизическими свойствами — см. пп. 4.13–4.15 и 5.15.

Операции формирования маскирующего покрытия (диоксида кремния) — *для проведения локальных технологических воздействий* на поверхность полупроводника — см. п. 4.10.

Фотолитографические операции — *для формирования последовательного набора совмещенных изображений* на поверхности пластины, создающих совокупность повторяющихся дискретных приборов или топологию интегральной микросхемы.

Операции диффузионного или ионного легирования — *для создания различных областей структуры*, например, $p-n$-переходов, диффузионных резисторов, конденсаторов и изолирующих участков в ИМС — см. пп. 4.7 и 4.8.

Операции формирования контактов — *для подвода напряжения к активным областям прибора*, а также для создания разветвленной цепи межсоединений в интегральных микросхемах.

Сборочные операции — *для разделения пластины на чипы* путем скрайбирования (от англ. *scribe*) алмазной иглой или лазерным лучом, *монтажа чипа на кристаллодержатель* с помощью пайки или ультразвуковой сварки, *присоединения выводов к контактам* кристалла и траверсам корпуса, *защитного покрытия кристалла* компаундом с окончательной герметизацией корпуса прибора.

Двумя черными стрелками на рис. 4 отражены циклы повторных операций. Так, левой стрелкой обозначено двойное проведение цикла, состоящего из трех последовательных операций:

а) термическое окисление кремния (для создания слоя $SiO_2$); б) фотолитография (для создания окон в $SiO_2$); в) локальное введение легирующих примесей в окна для формирования сначала базовой области, а затем внутри нее эмиттерной области (коллекторной областью транзистора является изначальная пленка кремния, эпитаксиально выращенная на поверхности подложки).

После третьего цикла окисление–фотолитография во вновь образованном слое $SiO_2$ вскрывают окна к областям коллектора, эмиттера, базы и на всю поверхность пластины наносят металлизацию (обычно вакуумным напылением алюминия, имеющего хорошую адгезию как к Si, так и к $SiO_2$). Четвертой фотолитографией по слою Al (для удаления лишнего металла) и последующим отжигом (при температуре 500–550°C) формируют омические контакты к рабочим областям транзистора, проводящие дорожки и контактные площадки. Следом за этим идут сборочные операции, завершающие производство дискретного транзистора.

Правая стрелка цикла повторных операций на рис. 4 характерна для интегральных микросхем, в которых разветвленная система металлизации выполняется в несколько слоев, изолированных друг от друга чаще диэлектрической пленкой $SiO_2$. Кроме диэлектрической изоляции, в ИМС на биполярных транзисторах для их разделения также используют обратно-смещенные *p–n*-переходы. В этом случае в подложке, например, из кремния с проводимостью *p*-типа, создают *n*-области («карманы»), внутри которых формируют необходимые активные или пассивные элементы схемы. Электрический переход между «карманом» и подложкой поддерживается в работающей ИМС под обратным напряжением, что обеспечивает высокое сопротивление изоляции.

Фотолитография как один из этапов, показанных на рис. 4, включает следующую последовательность операций: нанесение фоторезиста, его сушка и экспонирование через фотошаблон с удалением ненужных мест и термическим задубливанием оставшегося резиста (что создает окна, через которые локально удаляются химическим травлением диэлектрик $SiO_2$ или металл Al) и, наконец, полное удаление фоторезиста с пластины. В результате этого на поверхностном слое пластины оказывается сформированным рисунок, перенесенный (позитивно или негативно) с фотошаблона, — либо маска из $SiO_2$, либо электрические контакты и проводящие дорожки из Al.

При многократном применении фотолитографии важную роль играет операция совмещения отдельных фотошаблонов, соответствующих активным элементам транзистора, участкам изоляции, контактным площадкам, рисункам металлизации и т. д.

## МИКРОЭЛЕКТРОНИКА:
### кремниевая технология процессоров на пути от «микро» к «нано»

Технологическое продвижение микроэлектроники наиболее наглядно демонстрирует процессорная техника, достижения которой определяют прогресс компьютерной индустрии в целом.

Ныне первенство в производстве процессоров держат три компьютерных гиганта — Intel, AMD и IBM, но лидирующие позиции занимает Intel, чья продукция на рынке процессоров составляет около 75%. Поэтому ниже будем ориентироваться на достижения этой корпорации, которая в настоящее время является законодателем «технологической моды» в процессорной технике.

Рис. 5. Процессоры Intel

Днем рождения микропроцессора принято считать 15 ноября 1971 года, когда фирма Intel представила на суд общественности первый в мире процессор Intel 4004 [1]), названный Гордоном Муром [2]) «одним из самых революционных продуктов в истории человечества». Внешний вид этого микропроцессора показан на рис. 5, где для сравнения ниже приведен современный четырехъядерный процессор Intel Core i7 Extreme, выпущенный в 2008 году.

За прошедшие годы процессорная технология совершила гигантское продвижение: если первый процессор имел 2300 транзисторов с тактовой частотой 740 кГц и около 70 инструкций, то последний содержит 731 млн транзисторов на чипе при тактовой частоте 3,33 ГГц и свыше 700 инструкций. В основу технологического прогресса положено решение трех задач:

- увеличение степени интеграции (числа транзисторов на чипе),
- повышение быстродействия (тактовой частоты) процессоров,
- снижение стоимости производства.

Главным конструкторско-технологическим направлением для *одновременного* решения всех трех задач явилось уменьшение

---

[1]) Изобретателем первого микропроцессора является Тед Хофф (Ted Hoff), идею которого реализовали инженеры фирмы Intel Федерико Феджин (Federico Faggin) и Стан Мейзор (Stan Mazor), чьи имена в 1996 году были занесены в Национальный зал славы изобретателей США.

[2]) Мур (Moore) Гордон Эрл (род. 1929) — американский инженер, совместно с Робертом Нойсом (см. сноску на с. 21) основал (1968) компанию Intel (сокращение от англ. *Integrated Electronics*), автор «закона Мура» (см. рис. 9), эмпирического правила, ставшего основополагающим принципом развития процессорной индустрии. Ныне Г. Мур является почетным председателем совета директоров корпорации Intel и занимает, по данным Форбс за 2008 год, 288-ю позицию в списке самых богатых людей планеты с состоянием $ 3,7 млрд.

размеров активных элементов интегральных микросхем, составляющих схемотехническую базу цифровых устройств. Действительно, с уменьшением размеров возрастает скорость переключения нуль/единица (тактовая частота) электронного ключа, а также возрастает плотность размещения элементов, что увеличивает их общее количество на пластине и снижает стоимость производства в расчете на один элемент микросхемы [1)].

В качестве базового активного элемента современных процессоров на протяжении уже многих лет традиционно используют комплементарную МОП-ячейку (КМОП или англ. CMOS, сокращение от *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). Такая ячейка состоит из двух полевых транзисторов с индуцированным (инверсионным) каналом — $n$-типа ($n$-МОП или англ. NMOS) и $p$-типа ($p$-МОП или англ. PMOS), изготовленных на кремнии методами планарной полупроводниковой технологии.

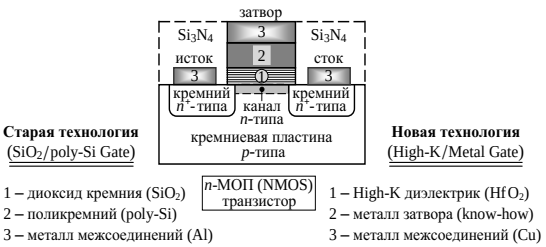


Рис. 6. Схематическое изображение структуры $n$-МОП транзистора с указанием принципиальных особенностей, присущих старой и новой технологиям: 1 — подзатворный диэлектрик, 2 — электрод затвора, 3 — контактный металл межэлементных соединений

Структура $n$-МОП транзистора, созданного на пластине кремния $p$-типа, изображена на рис. 6. Граница токового канала между истоком и стоком (в форме сильно легированных $n^+$-областей)

[1)] Занимательные цифры: 1. Стоимость одного транзистора в составе современного процессора примерно в миллион раз ниже аналогичной стоимости для ИМС в 1968 году, так что при подобных темпах снижения цен сегодня автомобиль стоил бы около одного цента. 2. Размер 45-нанометрового транзистора (используемого в процессоре Intel Core i7) примерно в 2000 раз меньше толщины человеческого волоса, так что около сотни таких приборов размещается на диаметре красной кровяной клетки. 3. Ежегодно все фирмы выпускают такое количество процессоров, которое содержит около $10^{19}$ транзисторов, что примерно в 100 раз превышает всю популяцию муравьев на планете.

показана штриховой линией, поскольку проводящий канал $n$-типа возникает только в режиме инверсии при положительном напряжении на затворе. Комплементарный $p$-МОП транзистор с каналом, истоком и стоком $p$-типа (не показанный на рис. 6) создают внутри $n$-Si кармана, имплантированного в исходную $p$-Si пластину. Ионная имплантация применяется также при локальном формировании областей истока и стока для $n$-МОП и $p$-МОП транзисторов в составе КМОП-ячейки.

На рис. 6 указаны принципиальные особенности старой (традиционной) технологии и новой (модифицированной за последние годы) технологии. В кремниевой КМОП-технологии в качестве диэлектрика затвора (1) и металла межсоединений (3) традиционно (со времен Роберта Нойса, см. сноску на с. 21) использовали $SiO_2$ и Al. Роль проводящего электрода затвора (2) с конца 60-х годов до последнего времени исполнял сильно легированный поликристаллический кремний (poly-Si). При этом для $n$-канала применяли $n^+$-поликремний с работой выхода около 4,15 эВ, а для $p$-канала — $p^+$-поликремний с работой выхода около 5,15 эВ (напоминаем, что ширина запрещенной зоны и электронное сродство кремния при 300 К, соответственно, равны $\Delta E_g = 1,12$ эВ и $\chi = 4,05$ эВ, см. п. 3.5). Приведенные численные значения обеспечивают минимальное пороговое напряжение переключения нуль/единица для КМОП-ячейки (определяемое началом перехода от режима обеднения к режиму инверсии в $n$-МОП и $p$-МОП транзисторах).

Необходимость модификации традиционной кремниевой технологии проявилась около десяти лет назад в ходе уменьшения размеров КМОП-ячейки с целью решения вышеуказанных задач.

В основу уменьшения размеров положен *принцип масштабирования*, сформулированный еще в 1972 году: с уменьшением линейных размеров в $\alpha$ раз во столько же раз уменьшаются напряжение и ток, но увеличивается концентрация легирующей примеси при сохранении неизменным распределения электрического поля в приборе. Как следствие этого, быстродействие повышается в $\alpha$ раз (в результате снижения емкости межсоединений и приборных структур при неизменной крутизне прибора), а мощность, рассеиваемая одной ячейкой, уменьшается в $\alpha^2$ раз (из-за одновременного уменьшения напряжения и тока в $\alpha$ раз) при возрастании плотности размещения ячеек пропорционально $\alpha^2$ (в результате уменьшения размеров межсоединений и топологических размеров приборных структур). Два последних фактора обеспечивают неизменное энергопотребление одного чипа при росте числа транзисторов на кристалле постоянной площади.

Однако с уменьшением длины токового канала (между истоком и стоком) и толщины подзатворного диэлектрика (между электродом затвора и каналом) возрастают токи утечки (продольный и поперечный). Именно это явилось принципиальным ограничением масштабированного уменьшения размеров КМОП-транзисторов, с чем и столкнулись в 90-х годах прошлого века.

Основные изменения конструктивно-технологических параметров, вводимые в производство процессоров компанией Intel, приведены на рис. 7 в форме таблицы, показывающей характерные особенности производственного техпроцесса с временным сдвигом в два года, начиная с 1997 г.

| Кодовый номер техпроцесса | P856 | P858 | Px60 | P1262 | P1264 | P1266 | P1268 | P1270 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| год ввода в производство | 1997 | 1999 | 2001 | 2003 | 2005 | 2007 | 2009 | 2011 |
| проектная норма техпроцесса, нм | 250 | 180 | 130 | 90 | 65 | 45 | 32 | 22 |
| длина волны УФ лазера, нм | 248 | 248 | **193** | 193 | 193[1)] | 193[1)] | 193[2)] | 193[3)] |
| материал межсоединений | Al | Al | **Cu** | Cu | Cu | Cu | Cu | Cu |
| диаметр пластины, мм | 200 | 200 | 200/300 | **300** | 300 | 300 | 300 | 300 |
| материал канала | Si | Si | Si | **str-Si** | str-Si | str-Si | str-Si | str-Si |
| диэлектрик затвора | $SiO_2$ | $SiO_2$ | $SiO_2$ | $SiO_2$ | $SiO_2$ | **High-K** | High-K | High-K |
| электрод затвора | poly-Si | poly-Si | poly-Si | poly-Si | poly-Si | **metal** | metal | metal |

[1)] сухая DUV-литография с фазовым сдвигом,
[2)] иммерсионная DUV-литография с фазовым сдвигом,
[3)] иммерсионная DUV-литография с фазовым сдвигом и двойной экспозицией.

Рис. 7. Конструктивно-технологические особенности производственного изготовления процессоров корпорацией Intel

Базовой характеристикой технологического процесса является *проектная норма*, под которой понимается минимальный топологический размер микросхемы, формируемый с помощью ультрафиолетового (УФ) освещения фоторезиста через фотошаблон при проекционной литографии. Из третьей строки таблицы видно, что за десять лет проектная норма уменьшилась более, чем в 5 раз (с 250 нм до 45 нм). В конце 2009 г. выпущены 32-нанометровые процессоры с переходом на технологию 22-нм в 2011 г. При этом, как показывают эмпирические данные, длина канала

составляет около 0,7–0,8 от проектной нормы, а толщина подзатворного диэлектрика — 0,020–0,025 от длины канала.

Среди технологических достижений, которые были внедрены компанией Intel в производственный процесс (в том числе с целью снижения проектной нормы) следует отметить принципиальные нововведения, выделенные в таблице на рис. 7 полужирным шрифтом на сером фоне. Отсюда видно, что, начиная с 2001 года, изменения в производственный процесс вносились каждые два года. Ниже кратко рассмотрим особенности новой технологии.

**1**. ***Использование лазерной литографии*** на основе глубокого УФ-излучения (DUV-литография, от англ. *Deep Ultra Violet*). Со времени изобретения фотолитографической технологии в начале 70-х годов прошлого столетия ее усовершенствование шло в направлении повышения разрешающей способности, в первую очередь, путем уменьшения длины волны излучения. С конца 80-х годов для освещения фотошаблонов стали применять эксимерные УФ-лазеры — сначала на основе молекул KrF с длиной волны $\lambda = 248$ нм (для 350-нм, 250-нм и 180-нм техпроцессов), а с 2000 года на основе молекул ArF с длиной волны $\lambda = 193$ нм (для 130-нм, 90-нм, 65-нм и 45-нм техпроцессов) (см. четвертую строку таблицы).

Разрешение линий на фоторезисте из-за оптической дифракции света обычно ограничивается величиной $\lambda/2$. Следовательно, ArF-лазер ($\lambda = 193$ нм) еще подходит для 90-нм техпроцесса, но уже не может обеспечить проектную норму 65 нм и менее.

Поэтому для повышения разрешающей способности были использованы *фотошаблоны с фазовым сдвигом*, принцип действия которых поясняет рис. 8. В таком шаблоне на одно из двух соседних окон дополнительно накладывается фазовый фильтр, сдвигающий фазу проходящей волны на 180°. В результате интерференции соседних противофазных полей происходит их взаимное ослабление в области между окнами, как показано на рис. 8 *б*, в сравнении с рис. 8 *а*. Фазовый сдвиг позволяет повысить разрешение в полтора раза, т. е. делает различимыми линии шириною до $\lambda/3$. Следовательно, DUV-литография с $\lambda = 193$ нм становится применимой и к 65-нм техпроцессу.

До сих пор речь шла о «сухой» проекционной литографии, переносящей топологический рисунок с фотошаблона через воздушную среду путем фокусирования его на поверхности фоторезиста (подложки). Для этой цели были разработаны специальные проекционные установки шагового мультиплицирования (так называемые степперы, от англ. *step*). Повышение разрешения таких

установок оказалось возможным при использовании *иммерсионной литографии*. В этом случае рисунок шаблона переносится не на сухую подложку, а на ее поверхность, покрытую слоем специальной иммерсионной жидкости (чаще воды, очищенной от загрязнений) с высоким коэффициентом преломления $n$. Длина электромагнитной волны в жидкости укорачивается в $n$ раз, т. е. $\lambda_ж = \lambda/n$. Теперь оптическое разрешение при использовании фотошаблона с фазовым сдвигом ограничивается величиной $\lambda_ж/3$. Таким образом, иммерсионная литография с фазовым сдвигом делает 193-нм лазер применимым даже к 32-нм техпроцессу.

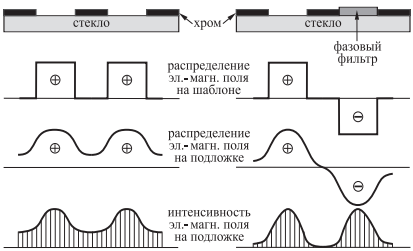


Рис. 8. Качественные картины распределения электромагнитного поля на поверхности фотошаблона, подложки и его интенсивности, воздействующей на фоторезист: *а* — обычный фотошаблон, *б* — фотошаблон с фазовым сдвигом

Сокращение топологической проектной нормы до 22 нм, запланированное на 2011 год (см. третью строку таблицы), оказалось возможным при использовании иммерсионной 193-нм литографии с фазовым сдвигом в сочетании с технологией *двойной экспозиции*. Здесь вместо одного шаблона применяют два, тем самым удваивая число экспозиций фоторезиста. При этом усложняется процедура совмещения шаблонов, однако решаемая современными степперами, обеспечивающими точность до 1 нм.

Следовательно, двойная экспозиция, повышая разрешающую способность литографии, увеличивает стоимость техпроцесса за счет удвоения числа шаблонов. Однако при этом сохраняется в качестве источника УФ-излучения 193-нм лазер. Это существенно снижает затраты производства, возникающие при переходе на более коротковолновое излучение. В будущем намечен переход с DUV-литографии на EUV-литографию (сокращение от англ. *Extreme Ultra Violet* — сверхжесткий УФ) с длиной волны 13 нм.

**2**. ***Замена алюминия медью*** в качестве металла межсоединений (пятая строка таблицы). При формировании многоуровневой архитектуры (до 6–7 слоев металлизации) использование Cu вместо Al снижает электрическое сопротивление проводящих дорожек и время задержки на межсоединениях. Это не только уменьшает тепловыделение, но и увеличивает быстродействие. С той же целью для изоляции проводящих слоев применяют диэлектрики с малой диэлектрической проницаемостью (типа фторсиликатного стекла), что снижает емкость между слоями и повышает скорость переключения.

**3**. ***Увеличение диаметра кремниевых пластин*** с 200 мм до 300 мм (шестая строка таблицы) позволило в два с лишним раза увеличить число процессоров, изготавливаемых на одной пластине, и тем самым снизить стоимость одного чипа.

**4**. ***Использование технологии «напряженного кремния»*** (англ. *Strained Silicon* или сокращение str-Si на рис. 7, седьмая строка таблицы) увеличивает подвижность носителей заряда в токовом канале с целью повышения тактовой частоты процессора. Задача увеличения подвижности дырок (в $p$-канале) и электронов (в $n$-канале) конструктивно решается по-разному для $p$-МОП и $n$-МОП транзисторов.

Поскольку движение дырки (как электронной вакансии в связях Si–Si) реализуется путем перескока электрона из одной соседней связи в другую (вакантную), то этот процесс облегчается при уменьшении расстояния между атомами путем сжатия кристаллической решетки в области между истоком и стоком. Такое сжатие канала в $p$-МОП транзисторе осуществляется путем замены кремния в истоке и стоке на твердый раствор $Si_{1-x}Ge_x$. При изменении величины $x$ от 0 до 1 период решетки линейно возрастает от $a = 5,43$ Å (Si) до $a = 5,66$ Å (Ge). С увеличением объема $Si_{1-x}Ge_x$, занимаемого истоком и стоком, расположенный между ними $p$-канал испытывает напряжение сжатия и сокращается (на доли процента) в направлении протекания тока.

В $n$-МОП транзисторе, где ток в канале создается электронами проводимости, их движение ускоряется при увеличении расстояния между атомами кремния. Это достигается в результате внешнего покрытия транзистора нитридом кремния ($Si_3N_4$, гексагональная решетка с параметрами $a = 7,76$ Å и $c = 5,62$ Å — см. п. 3.2), что схематически изображено верхней штриховой линией на рис. 6. При этом $n$-канал за счет механических напряжений, создаваемых нитридом кремния, растягивается (на доли процента) вдоль направления протекания тока.

По данным корпорации Intel, применение технологии «напряженного кремния» в обоих типах прибора (со сжатым каналом в $p$-МОП и с растянутым каналом в $n$-МОП) на 20–30% увеличивает скорость переключения КМОП-ячейки (за счет возрастания тока в канале) при повышении стоимости производства процессора всего на 2%.

**5**. ***Использование технологии High-K/Metal-Gate*** подразумевает замену $SiO_2$ материалом с более высокой диэлектрической проницаемостью (называемым в англоязычной литературе *High-K*, или *high-k* [1]) материалом) при одновременной замене поликремния (*poly-Si*) металлическим затвором (англ. *Metal-Gate*) (см. восьмую и девятую строки в таблице на рис. 7).

Быстрота переключения МОП-транзистора из непроводящего состояния в проводящее (нуль/единица) определяется скоростью индуцирования инверсионного заряда в канале: $dQ/dt = I$, т. е. величиной тока в канале. Этот заряд создается напряжением $V$ на затворе и равняется $Q = CV$, где $C = \varepsilon\varepsilon_0/d$ — емкость затвора (на единицу площади) для подзатворного диэлектрика с проницаемостью $\varepsilon$ и толщиной $d$. Следовательно, для повышения быстродействия путем увеличения тока канала, $I = CdV/dt$, надо в подзатворном диэлектрике увеличивать $\varepsilon$ и уменьшать $d$. Однако толщина диэлектрика имеет нижний физический предел, связанный с экспоненциальным ростом туннельного тока утечки, что приводит к недопустимо большому энергопотреблению и тепловыделению. Поэтому единственной возможностью остается переход к материалам с большей диэлектрической проницаемостью.

С подобной ситуацией фирма Intel столкнулась при реализации техпроцесса P1264 с топологической нормой 65 нм, где диэлектрик затвора достиг предельно малой толщины (около 1,2 нм, что составляет примерно пять моноатомных слоев кремния). Понижение проектной нормы до 45 нм оказалось возможным лишь при замене диоксида кремния High-K диэлектриками, среди которых наиболее подходящим оказался диоксид гафния ($HfO_2$). Такая замена позволила в 45-нм транзисторе увеличить толщину подзатворного диэлектрика до 3 нм, что снизило ток утечки почти в десять раз, а общее энергопотребление на 30%.

Однако сохранение поликремния в качестве электрода затвора привело к неприемлемо высокому пороговому напряжению для

---

[1]) Следует отметить терминологическую путаницу в этих обозначениях. На самом деле, следовало бы писать High-$\varepsilon$ или High-$\varkappa$, где $\varepsilon$ и $\varkappa$ характеризуют диэлектрическую проницаемость и электрическую восприимчивость материала, при этом $\varepsilon = 1 + \varkappa$ в системе СИ.