

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационной безопасности

Кафедра защиты информации

С. Л. Прищеп

АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальности 1-98 80 01 «Информационная безопасность»*

Минск БГУИР 2024

УДК 621.3.049.771.16(076)

ББК 32.844.1я73

П77

Рецензенты:

кафедра физики твердого тела
Белорусского государственного университета
(протокол № 5 от 15.12.2022);

главный научный сотрудник
лаборатории физики магнитных материалов
государственного научно-производственного объединения
«Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению»
доктор физико-математических наук К. И. Янушкевич

Прищепа, С. Л.

П77

Архитектура и технология сверхбольших интегральных схем : учеб.-метод. пособие / С. Л. Прищепа. – Минск : БГУИР, 2024. – 75 с. : ил.

ISBN 978-985-543-723-0.

Излагается теоретический материал, посвященный месту и назначению цифровых сверхбольших интегральных схем в глобальном информационном потоке. Освещены исторические аспекты появления интегральных микросхем, их частотные, временные и энергетические параметры. Рассмотрены основные технологические операции формирования топологии интегральных микросхем.

Предназначено для студентов специальности 1-98 80 01 «Информационная безопасность», изучающих дисциплину «Архитектура и технология сверхбольших интегральных схем».

УДК 621.3.049.771.16(076)

ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-543-723-0

© Прищепа С. Л., 2024

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2024

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1 Эволюция коммуникации человека | 6 |
| 2 Глобальный информационный поток | 8 |
| 3 Эволюционный закон Мура | 12 |
| 4 Первые интегральные микросхемы | 17 |
| 5 Характерная шкала размеров в микро- и наноэлектронике | 21 |
| 6 Временные и частотные параметры современных СБИС | 27 |
| 7 Температурная и энергетическая шкала современных СБИС | 31 |
| 8 Полупроводниковые пластины и чистые производственные помещения | 35 |
| 9 Рост кристаллов и процессы эпитаксии | 39 |
| 10 Легирование: диффузия, имплантация и отжиг | 45 |
| 11 Расчет параметров двухстадийной диффузии | 50 |
| 12 Расчет параметров одностадийной диффузии | 52 |
| 13 Ионная имплантация | 53 |
| 14 Расчет пробегов ионов в твердых телах | 57 |
| 15 Распределение внедренной имплантацией примеси по глубине | 61 |
| 16 Окисление и осаждение пленок..... | 64 |
| 17 Травление и полировка..... | 67 |
| 18 Фотолитография..... | 71 |
| Список использованных источников | 74 |

Введение

В настоящее время человечество находится в эпицентре самой масштабной технологической революции в истории. Эта глобальная революция является результатом одного ключевого открытия, сделанного в конце 1940-х годов, – открытия транзистора.

Современный транзистор является мощным электронным устройством: он размером всего с микроба, работает очень быстро, почти со скоростью света ($\approx 90\%$), очень дешевый, является практически идеальным высокоскоростным переключателем типа «0 | 1». Транзистор был изобретен Джоном Бардином, Уолтером Браттайном и Уильямом Шокли в *Bell Laboratories (Bell Labs)* 23 декабря 1947 года. И если в 1947 году в мире был только один транзистор, то сегодня на Земле насчитывается около 20 000 000 000 000 000 000 000 (20 миллиардов миллиардов) транзисторов, и это число удваивается примерно каждые 18 месяцев.

На рисунке 1 представлены некоторые тенденции роста производства транзисторов в мире. Точки представляют собой экспериментальные данные, пунктирной линией указан рост производства транзисторов, соответствующий удваиванию их количества каждый год. Для сравнения по левой оси ординат отложены данные о численности населения Земли (приведены в виде квадратов).

Учитывая, что население Земли составляет примерно 8 миллиардов, это означает, что на каждого жителя приходится приблизительно 2,5 миллиарда транзисторов. Таким образом, количество транзисторов увеличилось от 0 до 2×10^{22} всего за 75 лет. При этом для населения Земли рост с 0 до 8 миллиардов занял почти 30 000 лет. Из этого сравнения следует, что темпы роста производства транзисторов действительно крайне высоки.

При этом удивительный факт заключается в том, что все 2,5 миллиарда транзисторов, приходящиеся на одного жителя Земли, могут легко уместиться на ладони – размеры транзистора необычайно малы и не превышают долей микрометра. При этом в 1947 году транзистор представлял собой объект размером с ноготь большого пальца взрослого человека. Реплика (точная копия) первого в мире транзистора показана на рисунке 2.

В 1997 году, через 50 лет после открытия транзистора, компания DEC смогла разместить 9 300 000 транзисторов на одной интегральной микросхеме (ИМС) со стороной 1 сантиметр, чтобы создать микропроцессор, способный выполнять 10^9 операций в секунду. В настоящее время транзисторы входят в состав практически всех электронных устройств и во многом влияют на все сферы деятельности, в том числе и на сферу телекоммуникаций. Понятие «коммуникации» воплощает в себе совокупность генерирования, манипулирования, хранения, передачи, получения и конструктивного использования информации. Коммуникации также подразумевают распространение информации. Появление транзистора в корне изменило подходы к пониманию, организации и защите информационных потоков.

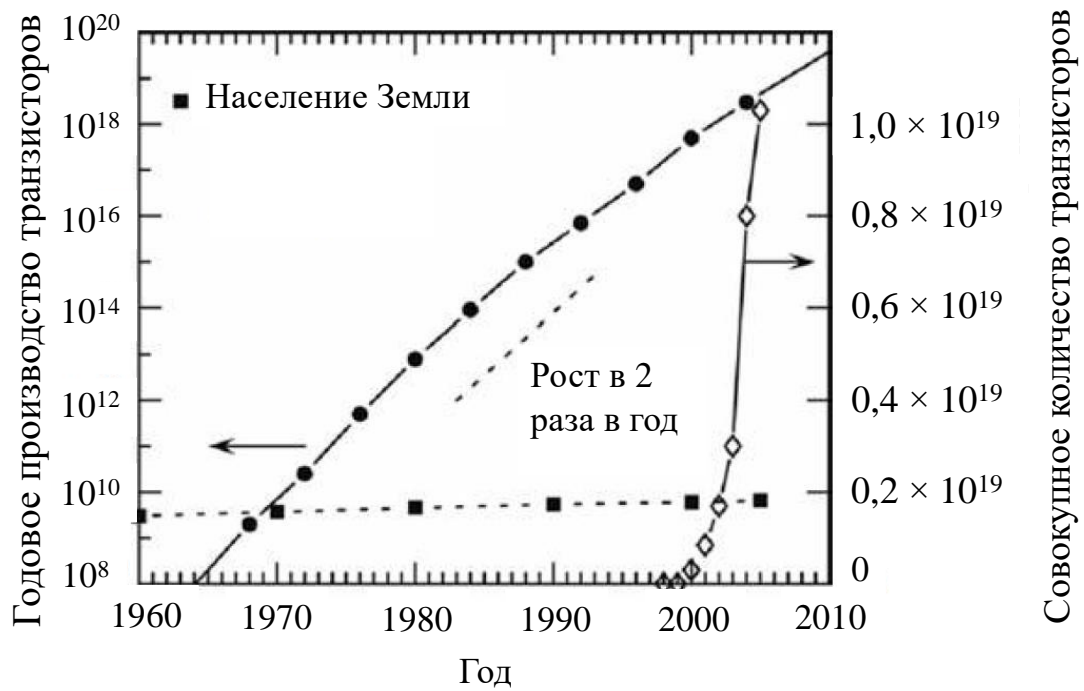


Рисунок 1 – Исторические тенденции роста годового мирового производства транзисторов и совокупного количества транзисторов в соотношении с ростом численности населения за тот же период



Рисунок 2 – Точная копия первого транзистора

1 ЭВОЛЮЦИЯ КОММУНИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА

На рисунке 3 изображены вехи в истории коммуникации человека, расположенные с интервалом в пять столетий. С 30 000 по 2000 год до нашей эры (на протяжении 28 000 лет) человеческая коммуникация не имела письменной основы. Современный алфавит появился на Ближнем Востоке примерно в 2000 году до нашей эры, положив начало тому, что теперь называется эпохой письменности. Ранние памятники письменности на глиняных табличках были созданы вручную, что требовало огромных усилий для изготовления, и явно предназначались для немногих привилегированных. Кроме того, глиняные таблички с нанесенной на них информацией легко разбивались, что приводило к потере информации. Ситуация изменилась с изобретением бумаги в 105 году нашей эры. Однако прошло почти 14 веков, прежде чем качество бумаги стало приемлемым для письменности. Такая бумага была создана в Испании в XV веке. Кроме того, понимание печатного слова не было общедоступным до развития переносного шрифта и, как следствие, появления эффективного печатного станка в середине XV века.

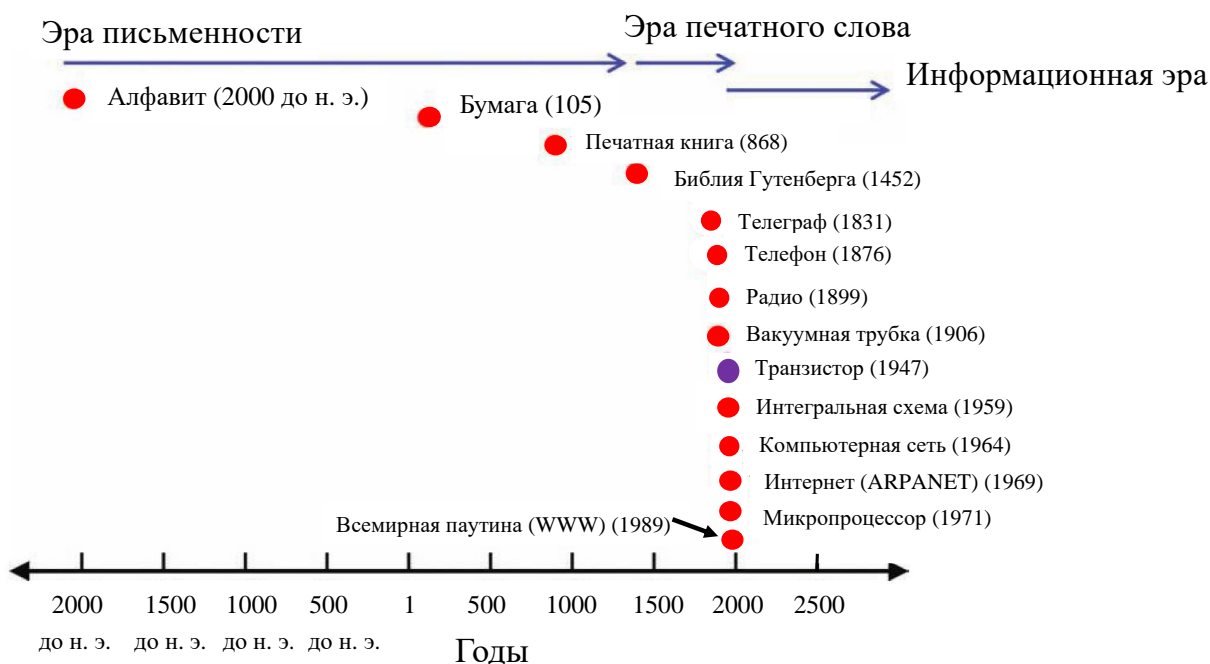


Рисунок 3 – Вехи в истории коммуникаций

Переносной шрифт привел к быстрому распространению книжного производства, начавшегося с Библии Гутенберга в 1452 году. Массово выпускаемые книги, а вскоре и всевозможные газеты и брошюры, стали легкодоступными, что позволило быстро распространять идеи и знания. Этот основанный на книгах взрыв знаний в конечном счете породил эпоху Просвещения, а вместе с ней и современную науку со своей практично настроенной когортой инженеров, которая предпочитала использовать научные открытия для практических целей.

Неслучайно, что основные этапы развития коммуникаций (см. рисунок 3) за последние 100 лет максимально близки друг к другу. Наука и инженерное дело должны были сначала создать базу, прежде чем произошел технологический взрыв. Во многих отношениях появление телеграфа, которое по своей сути доказало, что быстрая связь на расстоянии возможна с использованием электронов, привело в движение события, подготовившие почву для изобретения транзистора.

Термин «информационная эра», используемый на рисунке 3, ввел в обращение Уилсон Дизард в своей книге «Грядущая информационная эпоха: обзор технологий, экономики и политики», изданной в 1982 году [1]. В ней он отмечает, что после изобретения транзистора в 1947 году все остальное, казалось, развивалось почти естественным образом. Хотя, конечно, нельзя не отдать должное изобретательности ученых и инженеров, которые предложили и разработали первую интегральную микросхему в 1959 году, микропроцессор в 1971 году, а также, впоследствии, микросхемы памяти, персональные компьютеры, компьютерные сети, сотовые телефоны, смартфоны, интернет и многое другое. Таким образом, во второй половине XX столетия зародилась информационная эпоха и произошла революция в области коммуникаций, которая продолжается и в новом тысячелетии, улучшая старые и предоставляя новые средства, с помощью которых развивается отрасль телекоммуникационных технологий.

2 ГЛОБАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОТОК

Для того чтобы оценить важность происходящих в области телекоммуникаций изменений, необходимо понимать, какой объем информационного потока, передачи знаний, существует в наше время. Для ответа на поставленный вопрос определим несколько ключевых понятий, необходимых для более глубокого понимания проблемы. Для этого требуется разграничить «аналоговую» и «цифровую» сферы информации. Мир, в котором мы живем, определенно является аналоговым по своей природе – входные сигналы, которые воздействуют на наши органы чувств, а затем интерпретируются нашим мозгом, независимо от типа или формы (например, давление (P) температура (T), а также звук, свет, запах и т. д.) непрерывны во времени. Это означает, что они могут в принципе принимать любой диапазон значений в разные моменты времени t . Такие зависящие от времени аналоговые переменные, например, $P(t)$ или $T(t)$, называются аналоговыми сигналами. В мире микроэлектроники и нанoeлектроники наиболее распространенными и полезными сигналами являются напряжения $V(t)$ и токи $I(t)$, прежде всего потому, что по своей сути они представляют собой статические и динамические свойства ансамбля электронов и могут быть легко сгенерированы, обнаружены, обработаны, переданы и преобразованы из одного в другой и обратно множеством различных способов. Практически вся современная технология так или иначе опирается на это базовое манипулирование электронами либо в работе, либо в конструкции, либо в производстве, либо, чаще всего, во всех трех перечисленных областях.

Мир глобальной революции в области коммуникаций, напротив, в значительной степени цифровой по своей природе. Цифровые сигналы дискретны по форме и могут принимать только конечные значения (обычно только два, «1» или «0»), поскольку они изменяются от одного момента времени к другому дискретным способом. Например, в мире цифровых компьютеров цифровые сигналы могут варьироваться между напряжением рассматриваемого объекта, например, смартфона или цифровой камеры (к примеру, 2,5 В), и электрическим заземлением (0 В), и интерпретироваться либо как логическая 1 (2,5 В), либо как логический 0 (0 В) в момент времени t . Подобная дихотомия связана в первую очередь со свойствами транзистора как электронного устройства, которое может находиться в двух состояниях с различными значениями сопротивления. В одном из них, при большом сопротивлении (режим отсечки), на транзистор падает большое значение напряжения, и этому состоянию приписывается логическая 1. В другом, с малым значением сопротивления (режим насыщения), на транзистор падает малое напряжение. Этому состоянию соответствует логический 0. Именно из-за этого свойства транзистора в цифровой электронике используется система счисления с основой 2, а не 3 или, например, 5. На более глубоком уровне причина использования двоичной арифметики связана с необходимостью с высокой степенью надежности и высокой скоростью передавать с помощью транзисторов цифровой поток битов по множеству разнообразных каналов

(например, по коаксиальному кабелю, волоконно-оптической линии или по беспроводной сети). Кроме того, помехоустойчивость электронных схем, необходимых для отправки и получения информации, должна быть достаточно высокой, чтобы предотвратить искажение информации. По сути, малые шумы и высокая помехоустойчивость необходимы для поддержания целостности цифрового сигнала в присутствии паразитного шума окружающей среды (например, статического), который неизбежно возникает в процессе приема-передачи. Именно поэтому иногда говорят, что двоичное кодирование и транзисторы предназначены друг для друга.

Таким образом, очень удобно использовать двоичную систему счисления для описания цифровых сигналов. Бит в контексте электронного информационного потока представляет собой единственное числовое значение, либо двоичные значения «1» или «0», либо значения «*true*» или «*false*» в логике булевой алгебры, либо значения «*on*» или «*off*» на уровне транзистора. Все эти обозначения эквивалентны.

Бит представляет собой базовую единицу цифровой информации в области телекоммуникаций. Байт представляет собой последовательность таких битов. Как правило, 8 бит = 1 байт информации. Например, в интернете адрес интернет-протокола (*IP*-адрес) (электронное местоположение, которое назначается вашему компьютеру) содержит 32 бита, или 4 байта. *IP*-адрес записывается в цифровом виде, чтобы затем его можно было легко передавать в сеть с другими компьютерами. Для выражения более сложного адреса байты делят биты на группы.

Рассмотрим в качестве примера *IP*-адрес 192.168.0.1. Он может быть закодирован в двоичной системе счисления следующими битами и байтами:

$$192.168.0.1 = 11000000 \ 10101000 \ 00000000 \ 00000001.$$

Данный набор цифр представляет собой закодированный 4-байтовый поток из 32 бит. В двоичной системе счисления для байта (8-разрядного двоичного числа) имеем 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0.

Весовые коэффициенты для каждой из цифр в двоичной системе счисления записываются как

$$128 \ 64 \ 32 \ 16 \ 8 \ 4 \ 2 \ 1$$

и представляют целую степень числа 2:

$$2^7 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128, \quad 2^6 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 64,$$

$$2^5 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32, \quad 2^4 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16,$$

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8, \quad 2^2 = 2 \times 2 = 4, \quad 2^1 = 2, \quad 2^0 = 1.$$

Таким образом, в двоичной системе счисления

$$192 = 1 \times 128 + 1 \times 64 + 0 \times 32 + 0 \times 16 + 0 \times 8 + 0 \times 4 + \\ + 0 \times 2 + 0 \times 1 = 11000000.$$

Соответственно, 192.168.0.1 = 11000000 10101000 00000000 00000001 (пробел между байтами интерпретируется как десятичная точка).

Аналогичный процесс кодирования можно выполнить для букв алфавита, типографских символов и т. д.

Для передачи письменной (или устной) речи в двоичной (цифровой) форме наиболее часто используется *ASCII* – схема кодирования для латинского алфавита (например, английского). Кодировка *ASCII* (*American Standard Code for Information Interchange* – Американский стандартный код для обмена информацией) была введена в 1963 году. Пример использования: 01000001 = 65 = А; 01000010 = 66 = В; 01110111 = 119 = W; 00100001 = 33 = ! и т. д.

Таким образом, биты группируются в байты для повышения эффективности проектирования компьютерного оборудования, включая сетевое оборудование, а также жесткие диски и память. Именно поэтому байты лежат в основе всего электронного информационного потока. Наиболее распространенные объемы информации, используемые в процессе коммуникаций, приведены в таблице 1. Из таблицы следует, что, например, вся печатная коллекция библиотеки Конгресса США (крупнейшей библиотеки в мире) содержит около 10 000 000 000 000 (10 триллионов) байт информации, или 10 терабайт (10 Тбайт).

Таблица 1 – Представление информации в байтах

| Единица измерения | Контрольные точки |
|-------------------|--|
| 1 | 2 |
| Килобайт (Кбайт) | 1 Кбайт = 1000 байт 2 Кбайт – машинописная страница 100 Кбайт – фотография с низким разрешением |
| Мегабайт (Мбайт) | 1 Мбайт = 1000 Кбайт = 1 000 000 байт 1 Мбайт – небольшой роман 2 Мбайта – фотография с высоким разрешением 500 Мбайт – объем памяти компакт-диска |
| Гигабайт (Гбайт) | 1 Гбайт = 1000 Мбайт = 1 000 000 000 байт 1 Гбайт – грузовик, набитый книгами 4,7 Гбайта – объем хранилища DVD-диска 20 Гбайт – полное собрание сочинений Бетховена |
| Терабайт (Тбайт) | 1 Тбайт = 1000 Гбайт = 1 000 000 000 000 байт 1 Тбайт – объем печатных листов, изготовленных из 50 000 деревьев 10 Тбайт – печатная коллекция библиотеки Конгресса США |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 |
|------------------|---|
| Петабайт (Пбайт) | 1 Пбайт = 1000 Тбайт = 1 000 000 000 000 000 000 байт 2 Пбайта – сумма всех академических исследовательских библиотек США 200 Пбайт – весь печатный материал на Земле |
| Эксабайт (Эбайт) | 1 Эбайт = 1000 Пбайт = 1 000 000 000 000 000 000 000 байт 2 Эбайта – общий объем информации, сгенерированной на Земле в 2000 году 5 Эбайт – все слова, когда-либо произнесенные человеком 9570 Эбайт – общий глобальный электронный поток информации в 2012 году |

Итак, какой объем электронного информационного потока окружает нас? Для этого можно мысленно представить кодирование всей доступной информации (устной, письменной, визуальной и т. Д.) в цифровой формат, и затем подсчитать полученные байты. Это может выглядеть безнадежной задачей, учитывая кажущееся бесконечным разнообразие имеющейся информации, но на самом деле это возможно: ученые подсчитали, что в 2012 году глобальный информационный поток с использованием электронных средств составил около 9570 Эбайт [2]. При этом этот поток стремительно растет. Так, в 2002 году он составлял «всего» 17,9 Эбайт, а в 2006 году – уже 161 Эбайт.

3 ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЗАКОН МУРА

На рисунке 1 был продемонстрирован довольно быстрый рост производства транзисторов во времени. В основе этой тенденции лежат достаточно веские причины. Для правильной оценки любой тенденции роста необходимо провести расчеты.

Вначале вспомним, что логарифм – это просто показатель степени. Формально, если b является положительным числом, отличным от 1, то $\log_b x$ представляет степень, до которой b должно быть увеличено, чтобы получить x . Например, $\log_{10} 100 = 2$, потому что $10^2 = 10 \times 10 = 100$. В общем случае $y = \log_b x$ и $x = b^y$ являются эквивалентными утверждениями. Это последнее утверждение $x = b^y$ более точно обозначает как x увеличивается по степенному закону с ростом y . Если y оказывается временем t , таким, что $x = b^t$, то эта зависимость называется «степенной рост». Величина x в принципе может либо увеличиваться во времени, если $x = b^y$, либо уменьшаться во времени, если $x = b^{-y} = 1 / b^y$, но это все равно степенной рост.

Теперь выберем модель степенного роста, которая актуальна в контексте транзисторов: рост в два раза за год. Отметим, что сказать, что имеется рост в два раза за год, – это не то же самое, что сказать, что $y = 2t$, что является линейной зависимостью (y линейно зависит от t , т. Е. y пропорционален t), а не степенной. Степенной рост в два раза за год математически записывается как степенная функция (отсюда и название): $y = A \times 10^{0,30103t}$, где t – общее затраченное время (скажем, в годах). Здесь A – начальное значение y , т. Е., если $t = 0$, $y = A \times 10^0 = A \times 1 = A$.

Значение 0,30103 в этой степенной функции получено в результате принятия функции $\log_{10} 2$ для роста в два раза за год. Действительно, если мы используем $t = 1$ (1 год), то получим, что $y = 2A$, т. Е. y удвоился за 1 год. За 10 лет при этом темпе роста ($t = 10$) у нас было бы $y = 1024A$ (y в 1024 раза больше, чем в начале отсчета). За 20 лет это был бы рост в 1 048 576 раз, а за 30 лет – в 1 073 741 824 раз (т. Е. рост более чем в миллиард раз). Как показано на рисунке 4, даже несмотря на то, что зависимость $y = 10^{0,30103t}$ при малых значениях аргумента изначально ведет себя очень близко к зависимости $y = 2t$, эта подобность очень быстро меняется, и через 10 единиц времени (например, лет) наблюдается разница в 51,2 раза между степенным ростом в два раза за год и линейным ростом ($y = 2t$). Следовательно, с течением времени эти две зависимости ведут себя совершенно по-разному. Таким образом, если построить график степенной функции как логарифмический по оси y в зависимости от линейной шкалы времени по оси x (используем полулогарифмический масштаб), то мы получим прямолинейную зависимость. Поэтому полулогарифмический масштаб очень удобен для определения, действительно имеется ли степенная функция или нет. Именно в силу различия между этими двумя функциями становится понятно, каким образом степенной рост может привести от 1 транзистора в 1947 году к 20 000 000 000 000 000 транзисторов в наше время.

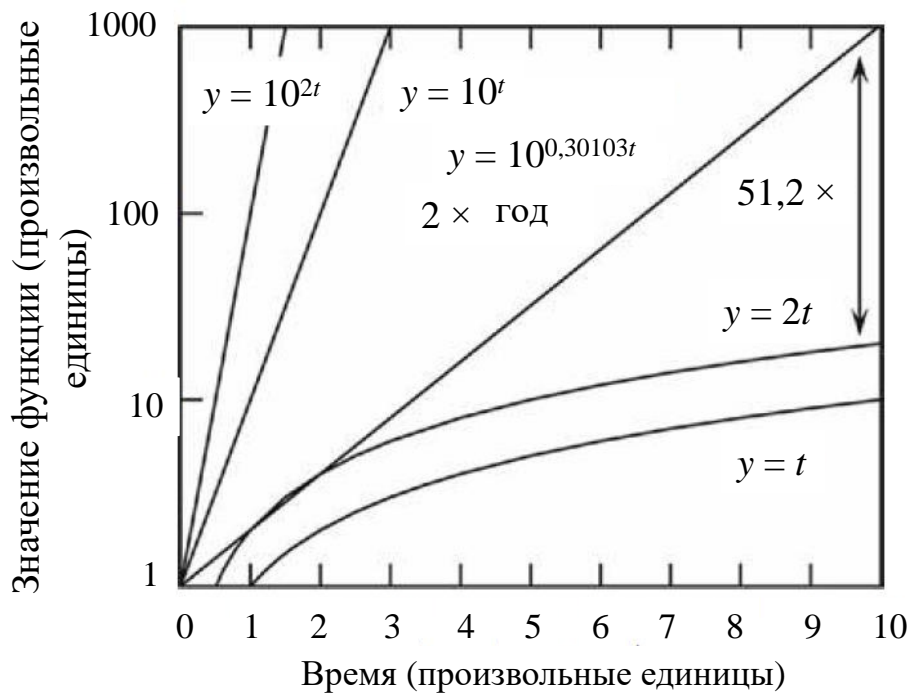


Рисунок 4 – Разница в поведении логарифмической и линейной функций

Первым, кто заметил эту тенденцию экспоненциального роста в индустрии микроэлектроники в 1965 году, был Гордон Мур, один из основателей и бывший генеральный директор *Intel*. Оригинальное пророческое заявление Мура 1965 года гласит: «Сложность минимальных затрат на компоненты увеличилась примерно в два раза за год... <...> Конечно, в краткосрочной перспективе можно ожидать, что этот показатель сохранится, если не увеличится. В долгосрочной перспективе темпы роста несколько более неопределенны, хотя нет никаких оснований полагать, что они не останутся почти постоянными по крайней мере в течение 10 лет. Это означает, что к 1975 году количество компонентов на интегральную схему при минимальной стоимости составит 65 000. Я считаю, что такая большая схема может быть построена на одной пластине» [3].

На рисунке 5 показаны четыре точки данных, которые использовал Мур. Это совсем малое количество данных, на которое он опирался в своих долгосрочных предсказаниях. На этом же рисунке также приведены тенденции в изменении количества транзисторов на единицу площади (прямоугольный чип из полупроводникового материала размером примерно сантиметр на сантиметр, на котором размещены транзисторы) как для микропроцессоров, так и для микросхем памяти. Данные относятся к периоду с 1970 по 2005 год. Помимо этого, на рисунке показана эволюция минимального размера элемента транзисторов в микрометрах. Видно, что за 45 лет эта величина снизилась с десятков микрометров в 1960 году до наноразмеров (менее, чем 100 нанометров) к 2010 году. В настоящее время характерный размер активной части транзистора не превышает десятка нанометров.

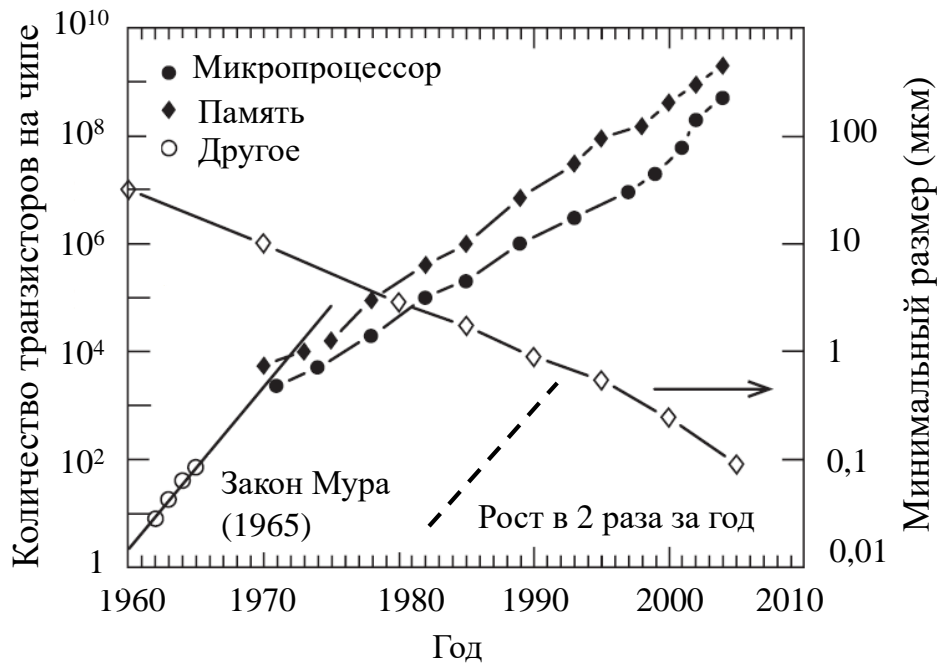


Рисунок 5 – Эволюция количества транзисторов на чипе (для микропроцессоров и микросхем памяти), минимального размера элемента, используемого для изготовления этих матриц, экстраполяция Мура

Первые ранние наблюдения Мура определяли рост количества транзисторов на чипе как примерно в два раза за год. Это степенная функция. С развитием микроэлектроники эта цифра была скорректирована на основе анализа большого количества экспериментальных данных, показавших удвоение не за год, а за 18 месяцев. Эти данные нанесены на график в полулогарифмических масштабах (степенной рост при этом выглядит как линейная зависимость). Степенная зависимость для роста количества транзисторов на чипе на рисунке 5 подчиняется прямолинейной зависимости в течение проанализированных 35 лет, что является поистине очень хорошим результатом для предсказания Мура. Многие другие показатели индустрии микроэлектроники следуют аналогичной схеме степенного роста: скорость работы транзисторов, их размер, стоимость. Динамика изменения цены отражена на рисунке 6, на котором приведена зависимость средней стоимости транзистора на мировом рынке от времени. Если в 1965 году стоимость одного транзистора составляла 10 долларов, то в 2008 году она равнялась 0,0000001 цента. Другими словами, дискретные транзисторы сегодня практически бесплатны. Один этот факт указывает на фундаментальную причину, по которой сегодня микропроцессор для ноутбука с несколькими миллиардами транзисторов в нем продается всего за несколько долларов. Эти различные тенденции степенного роста в индустрии микроэлектроники повсеместно называют «законом Мура». Следует отметить, что, строго говоря, это скорее эмпирическая тенденция, чем «закон», но в литературе специалистами используется именно термин «закон», поскольку прижилось именно это выражение.

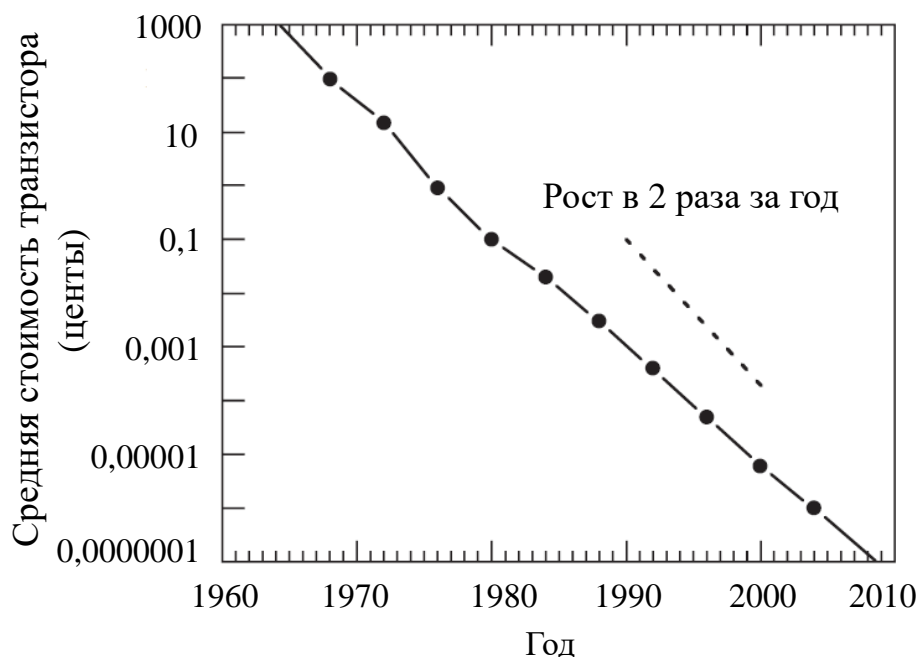


Рисунок 6 – Динамика годовой глобальной стоимости транзисторов (в центах)

Следует отметить, что то, что начиналось как пассивное наблюдение за тенденциями роста в микроэлектронике, в последние годы стало движущей силой для всей отрасли. То есть сегодня о состоянии отрасли в значительной степени судят по тому, насколько хорошо она может поддерживать рост в два раза за 18 месяцев по закону Мура. Это, безусловно, может быть палкой о двух концах и временами создает серьезные финансовые проблемы для рынка. Тем не менее революционные достижения в области телекоммуникаций напрямую связаны с этим фактором.

В свое время такие мировые гиганты микроэлектроники, как *Intel*, *IBM*, *Texas Instruments*, *Motorola* и другие, объединили усилия, чтобы составить «дорожную карту» того, куда движется отрасль, и выявить (а затем атаковать) на ранней стадии любые технологические препятствия для поддержания ставшего стандартом роста по закону Мура для всей отрасли. Образованная в результате организация называется Ассоциацией полупроводниковой промышленности (*Semiconductor Industry Association – SIA*) [4], и она работает над ежегодным выпуском (среди прочего) Международной технологической дорожной карты для полупроводников. Эта карта будущих этапов развития отрасли и их сроков, а также ключевых технологических показателей и ожидаемых инноваций, необходимых для поддержания роста, определяет многое из того, что происходит в области исследований и разработок в индустрии микроэлектроники стоимостью в несколько триллионов долларов. Согласно дорожной карте в течение этого десятилетия ожидается выпуск чипов памяти емкостью более 64 Гбайт, микропроцессоров с частотой более 20 ГГц и более 10 миллиардов транзисторов в корпусе, при этом напряжение питания должно составить всего 0,5 В.

В настоящее время в совет директоров *SIA* входят 14 компаний: *Advanced Micro Devices*, *Agere Systems*, *Analog Devices*, *Conexant Systems*, *Cypress Semiconductor*, *IBM*, *Intel*, *Intersil*, *LSI Logic*, *Micron Technology*, *Motorola*, *National Semiconductor*, *Texas Instruments* и *Xilinx*. В целом членами *SIA* являются более 90 компаний, представляющих практически всех крупных игроков мировой индустрии микроэлектроники.

4 ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

В конце 1950-х годов технология производства транзисторов стала доступна широкому кругу инженеров. С этого момента эта отрасль стала стремительно развиваться. Одним из первых лидеров мирового рынка в то время была компания *Fairchild Semiconductor*, производившая биполярные транзисторы. Тем временем Гордон Тил, один из первых сотрудников Шокли, руководителя группы, в которой был разработан транзистор, покинул *Bell Labs* в 1952 году по семейным обстоятельствам и состоянию здоровья и вернулся в Техас, присоединившись к малоизвестной тогда геофизической компании *Texas Instruments (TI)*. В компании Тил начал работать над транзисторами, и к 1954 году у *TI* было действующее производство германиевых биполярных транзисторов, которые они использовали для производства первого в мире коммерческого «транзисторного» радиоприемника *Regency*. В 1954 году Тил адаптировал разработанную в *Bell Labs* технологию создания *p-n*-переходов на основе кремния [5] для изготовления кремниевых транзисторов вместо германиевых. Этот переход от германия к кремнию оказался гигантским скачком в коммерциализации микроэлектроники.

К концу 1950-х годов стало понятно, что необходимо создавать полноценные электрические схемы на одном чипе из кремния, т. е. изготавливать нескольких транзисторов на куске кремния и соединять их вместе с нанесенными металлическими проводниками, чтобы сформировать полностью «монокристаллическую» (находящуюся на одном полупроводнике) «интегральную схему». В наше время такая схема известна как интегральная микросхема (ИМС). Пример современной ИМС показан на рисунке 7.

Джеку Килби из *TI* первым пришла в голову идея сделать микросхему на кремнии и, что важно, он осознал, что интеграция практической электронной схемы потребует создания необходимых пассивных элементов (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности) в самом кремнии. 12 сентября 1958 года ему удалось создать первую интегрированную цифровую схему транзистора «флип-флоп». Первая ИМС Килби показана на рисунке 8, а.

Тем временем Роберт Нойс из *Fairchild Semiconductors* сосредоточился на оптимальном способе создания металлических соединений для построения ИМС со многими компонентами, 23 января 1959 года представив «планарный процесс» для этого. Первая ИМС Нойса показана на рисунке 8, б. Предсказуемо возник неприятный патентный спор (более узконаправленный патент Нойса на ИМС был фактически выдан первым, 25 апреля 1961 года), но после длительной судебной тяжбы оба инженера, и Килби, и Нойс, были признаны авторами интегральной схемы.

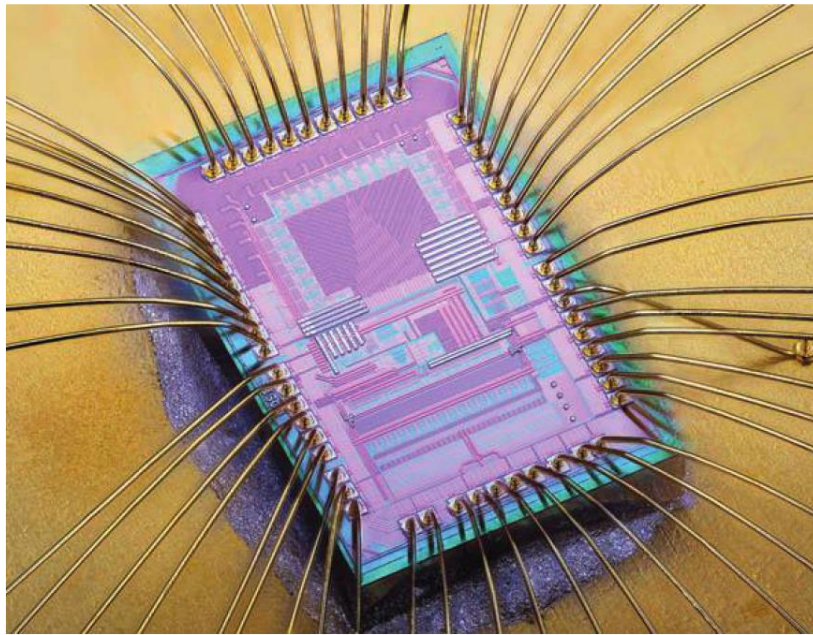
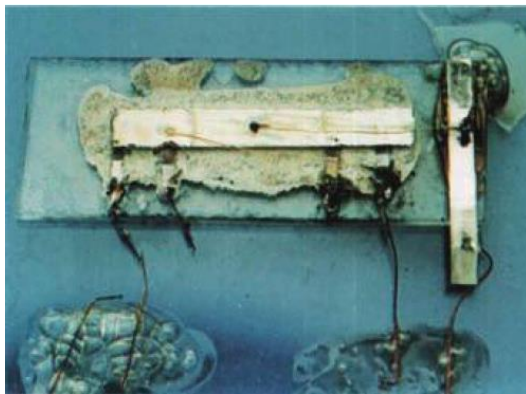
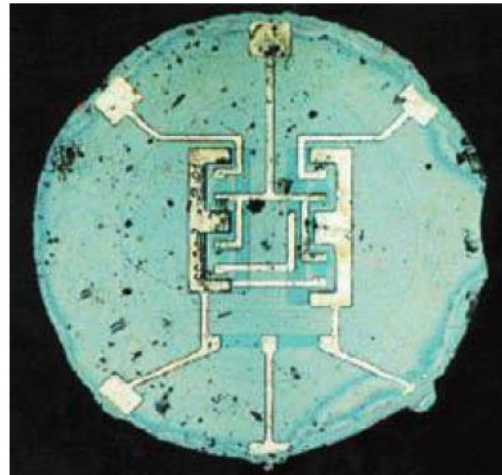


Рисунок 7 – Пример современной ИМС



a



б

a – ИМС Килби; *б* – ИМС Нойса

Рисунок 8 – Первые ИМС

К марту 1961 года *Fairchild Semiconductors* представила серию из шести различных микросхем и продала их НАСА и различным производителям оборудования за 120 долларов каждую [6]. В октябре 1961 года *TI* представила серию ИМС 51, каждая из микросхем которой состояла примерно из двух десятков элементов. Позже в том же месяце они представили мини-компьютер, состоящий из 587 микросхем серии 51. Этот примитивный компьютер немногим больше калькулятора весил всего 280 грамм и был размером с консервную банку [6]. В то время *ENIAC* (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), первый в мире цифровой компьютер на основе ламп, занимал целую комнату. Фотография компьютера *ENIAC* приведена на рисунке 9. Разница в размерах очевидна.

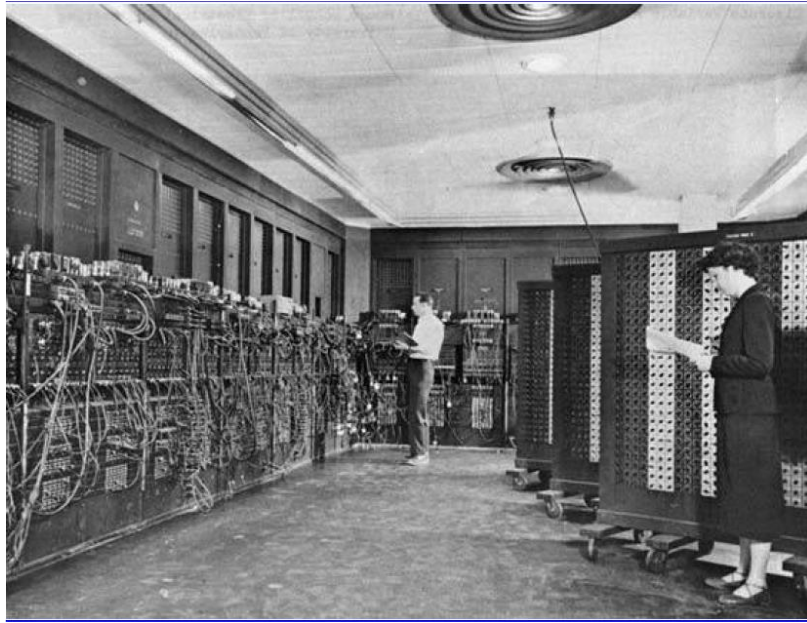


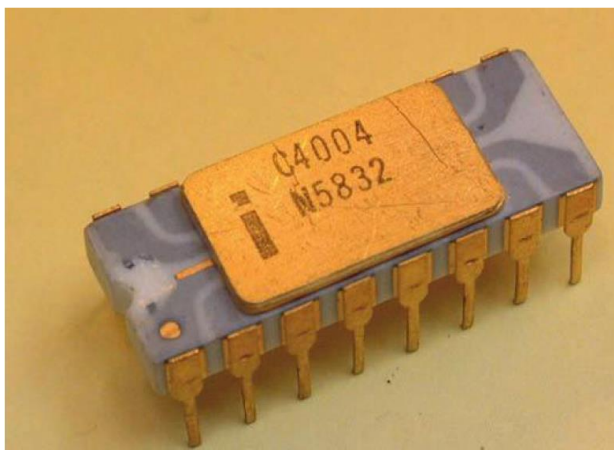
Рисунок 9 – Первый цифровой компьютер *ENIAC*

Следует отметить, что *Bell Labs*, компания, в которой был сделан первый в мире транзистор, так и не преуспела как крупный игрок в области ИМС-технологий. Это было обусловлено тем, что Джек Мортон, руководитель проекта *Bell Labs* по созданию транзисторов, не верил в перспективы монолитной интеграции. Более того, Мортон был уверен, что интеграция транзисторов – это в корне неправильная идея. К тому времени хорошо была известна проблема тирании чисел, или тирании межсоединений. По мере того, как все больше и больше дискретных транзисторов соединялось вместе для создания полезной электронной системы, количество одной только проводки было кошмаром. Микросхема была одним из способов решить эту проблему, а именно переместить громоздкие провода в тело самого кремния, т. е. в подложку, но Мортон считал это совершенно глупой идеей. Он рассудил, что, если бы выход (процент функционирующих устройств от общего количества, которое производится) составлял всего 50 %, при помещении 10 транзисторов на один и том же чип кремния для формирования микросхемы чистый выход конечной схемы составил бы всего 0,51 %. Отсюда последовал вывод о том, что вряд ли результат стоит затраченных усилий. В компании *Bell Labs* не верили в успех ИМС даже тогда, когда другие игроки на поле ИМС продвигались вперед и показывали перспективность этого направления. Именно поэтому компания *Bell Labs* была вне этого процесса. Сегодня всем понятно, до какой степени руководство *Bell Labs* заблуждалось в оценке перспективности развития ИМС. *Bell Labs* в конечном счете потерпела крах из-за менталитета *NIH* (*Not Invented Here* – не изобретено здесь) – термина, означающего подход, когда идея не может быть признана хорошей, если ее первым предложил кто-то другой [5].

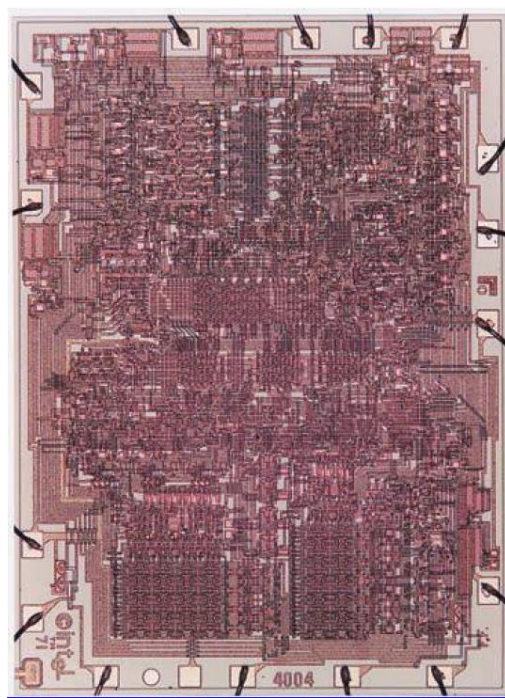
В 1965 году, к своему 35-летию, журнал *Electronics Magazine* попросил генерального директора недавно вышедшего на рынок производителя микросхем

Fairchild Semiconductors написать статью о будущем технологии. Отметив, что сложность микросхем с момента их промышленного освоения в 1962 году ежегодно удваивалась (до 50 компонентов в 1965 году), он не видел фундаментальной причины, по которой эта тенденция не должна продолжаться, прогнозируя, что степенной темп роста должен обеспечить более 65 000 компонентов на одной микросхеме к 1975 году. Не найдя физической причины, по которой этот уровень сложности не мог бы быть достигнут на практике, он далее провозгласил (достаточно смело для того времени), что этот степенной рост сложности ИМС, скорее всего, обязательно произойдет. Он пришел к выводу, и «будущее интегрированной электроники – это будущее самой электроники», и в итоге ИМС сделают электронные технологии более широкодоступными во всем обществе и приведут к «таким чудесам, как домашние компьютеры» и «портативное коммуникационное оборудование» [3]. Довольно удивительное видение, провозглашенное всего через три года после демонстрации первых промышленных ИМС, принадлежало Гордону Муру. Как указывалось выше, это феноменологическое предсказание в литературе получило название «закон Мура».

Несколько лет спустя, в 1971 году, корпорация *Intel* анонсировала выпуск первой в мире микросхемы – «микропроцессора» *Intel 4004*. Она представлена на рисунках 10, а и б. Микропроцессор *Intel* предопределил появление современного компьютера.



а



б

а – внешний вид; б – внутренние составляющие

Рисунок 10 – Микропроцессор *Intel 4004*

5 ХАРАКТЕРНАЯ ШКАЛА РАЗМЕРОВ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

С развитием технологии микроэлектроники инженеры изготавливают элементы размером гораздо меньше того, что человек может увидеть невооруженным глазом. Чтобы различить рисунок (топологию) современной ИМС, необходима визуализация этих крайне малых размеров – наноразмеров. Для этого используются специальные средства, инструменты, оборудование, с помощью которых можно рассмотреть даже отдельные атомы.

Хотя, строго говоря, даже используя самый мощный из мыслимых оптических микроскопов, мы не можем рассмотреть атом, сегодня можно довольно легко воспроизвести анатомию изображения, если воспользоваться инструментами квантовой механики.

В этом контексте существует фундаментальное различие между видением и визуализацией в микро- и наном мире, которое следует прояснить. Пример изображения, полученного с помощью атомного силового микроскопа, приведен на рисунке 11 (изображена поверхность кремния).

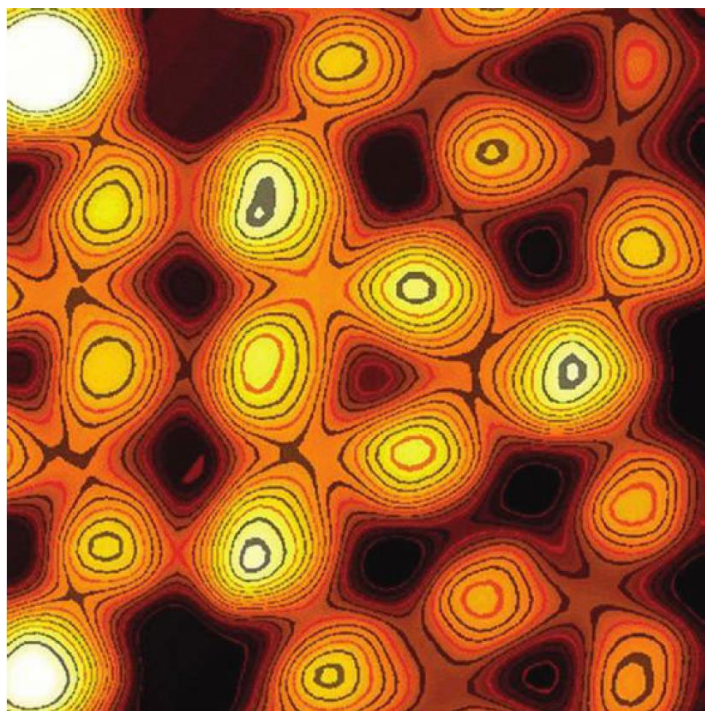
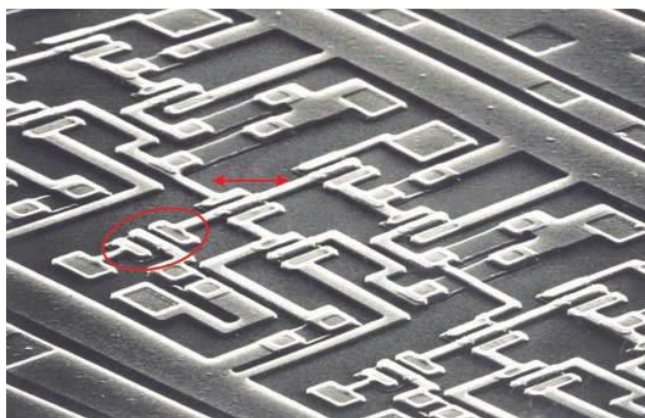


Рисунок 11 – Изображение атомной поверхности кристалла кремния, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии

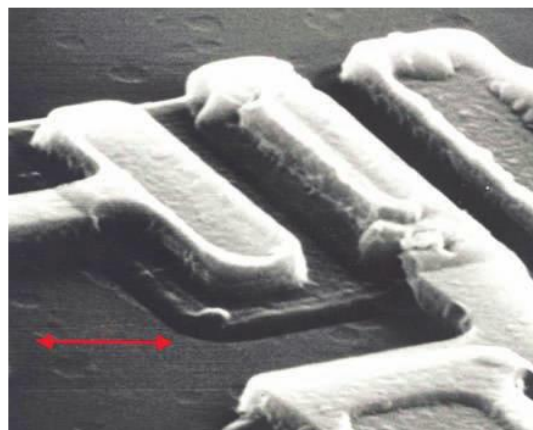
Из квантовой теории следует, что электрон является частицей-волной и имеет соответствующую длину волны, аналогичную свету. То есть электрону присущ дуализм. Например, длина волны электрона, движущегося со скоростью $1/1000$ от скорости света ($c = 3 \times 10^8 = 300\,000\,000$ метров в секунду в вакууме), составляет $2,43$ нанометра ($2,43 \times 10^{-9} = 0,00000000243$ метра) – намного меньше, чем самый современный транзистор, размер которого составляет десятки нанометров. Подобная

скорость движения довольно легко достижима для электрона, если к нему приложено соответствующее ускоряющее электрическое поле. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) пропускает подобные ускоренные электроны через высоковольтные управляющие решетки (по сути, электронные линзы) на изображаемый объект, и эти рассеянные электроны обнаруживаются почти таким же способом, как работает старая телевизионная трубка. Электронно-чувствительный детектирующий слой (сетчатка СЭМ) загорается, когда на него попадают рассеянные электроны, причем интенсивность пропорциональна количеству электронов, бомбардирующих экран. Таким образом формируется изображение объекта. На сегодняшний день СЭМ является стандартным прибором для работы с микро- и наноразмерными объектами, такими как транзисторы. Очевидно, что, прибегая к использованию электронов для исследования микро- и наномира, мы не можем утверждать, что действительно видим объект, поскольку человеческая сетчатка нечувствительна к подобным длинам волн. Вместо этого мы «изображаем» эти объекты с помощью электронов. Добавление цвета в таких изображениях является чисто художественным улучшением, поэтому изображения СЭМ обычно отображаются в черно-белой гамме.

Примеры подобных изображений ИМС, полученных с помощью СЭМ, приведены на рисунках 12, *а* и *б*.



а



б

а – участок ИМС; *б* – транзистор

Рисунок 12 – Высокорастворяющее СЭМ-изображение ИМС

С учетом того что современная микро- и наноэлектроника имеет дело с наноразмерной шкалой, рассмотрим основную размерную шкалу Вселенной, чтобы лучше понять место микроэлектроники в этом мире.

На рисунке 13 приведены размеры объектов (в метрах), которые окружают человека в его жизни. Отметим некоторые основные моменты. Согласно современным астрономическим данным, Вселенная имеет размер примерно 1×10^{27} метра (100 миллиардов световых лет) в поперечнике. Величина на 11 порядков меньше (1×10^{12}) составляет один световой год – типичную астрономическую единицу

измерения расстояния. Световой год – это расстояние, которое свет, движущийся со скоростью 3×10^8 метров в секунду, проходит за один год, примерно 1×10^{16} метра. Длина футбольного поля на 14 порядков меньше размера Вселенной. Еще на 12 порядков меньше диаметр атома углерода – основного строительного элемента жизни. Наконец, на 5 порядков меньше, чем атом углерода, диаметр атомного ядра. Приблизительное отношение размера Вселенной (наибольшая практическая шкала расстояний) к диаметру атомного ядра (наименьшая практическая шкала расстояний) составляет 1×10^{42} . Эта величина эквивалентна числу атомов в 1×10^{26} крупинках соли. Из такого количества крупинок соли можно было бы сформировать гигантский кубический блок соли со стороной примерно 46 километров. И этот массивный куб соли весил бы 126 584 850 100 000 тонн. Из этого сравнения видим, что 1×10^{42} – это действительно очень большое число.

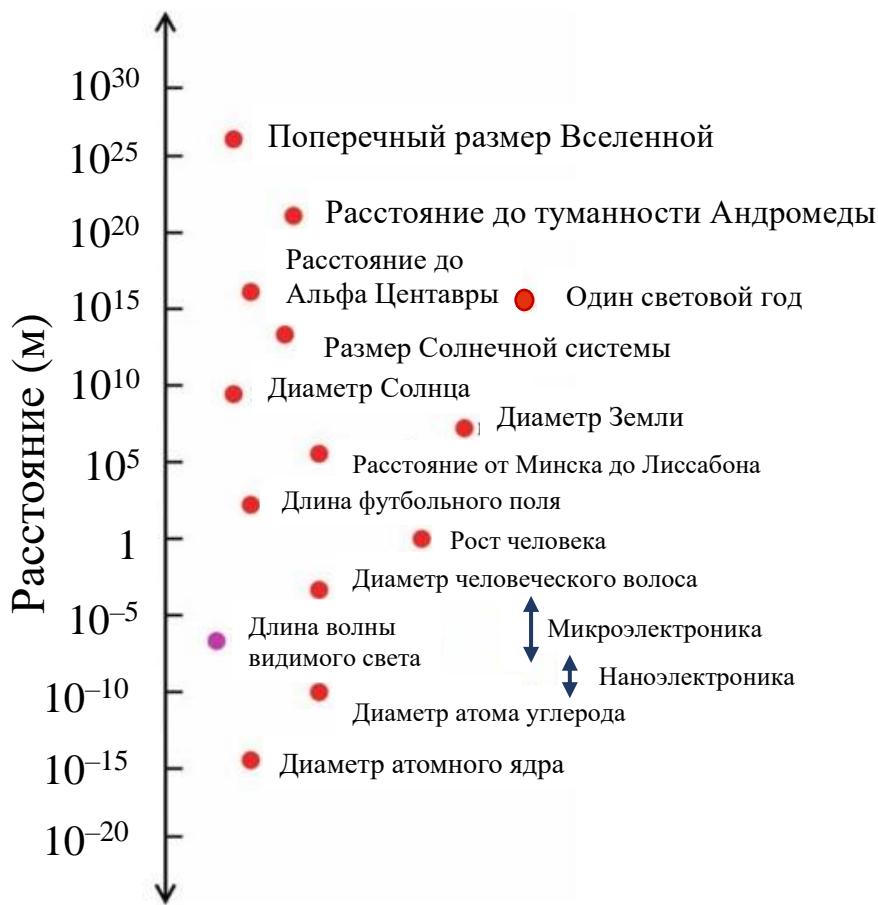


Рисунок 13 – Масштаб расстояний во Вселенной

Обратим внимание, что характерные размеры, с которыми имеет дело микро- и наноэлектроника, находятся в микронном диапазоне: 1×10^{-6} метра = 0,000001 метра (это эквивалентно 10 000 атомам кремния, размещенным тесно друг к другу), отсюда и название «микроэлектроника» (электроника микрометрового размера). Наноэлектроника имеет нанометровые размеры: 1×10^{-9} метра = 0,000000001 метра (10 атомов кремния, размещенных тесно друг к другу), отсюда название «наноэлектроника»

(электроника нанометрового размера). В масштабе Вселенной шкала микро- и наноэлектроники сгруппирована вокруг более знакомой и полезной меры – длины волны видимого света (0,4–0,7 микрометров) и определенно находится на самом краю расстояний, характерных для нашей Вселенной.

Рассматривая шкалу микро- и наноэлектроники, можно построить масштаб в диапазоне от размера атома (0,1 нанометра) до одного сантиметра. Этот диапазон проанализирован на рисунке 14. С помощью подобного увеличенного масштаба мир микро- и наноэлектроники становится более заметным. Современный транзистор (например, наноразмерная комплементарная структура металл – оксид – полупроводник (КМОП)) примерно того же размера, что и вирус, в 100 раз меньше клетки крови человека и в 1000 раз меньше толщины листа бумаги. За 75 с лишним лет, прошедших с момента демонстрации первого транзистора, его размер уменьшился примерно со 100 микрометров (толщина человеческого волоса) до нескольких десятых долей микрометра (размера небольшого вируса), уменьшившись в размере более чем в 1500 раз. Как обсуждалось в предыдущих разделах, фундаментальная движущая сила, стоящая за этим резким уменьшением размеров с течением времени в функциональном строительном блоке революции микро- и наноэлектроники, транзисторе, тесно связана с законом Мура и определяется им.

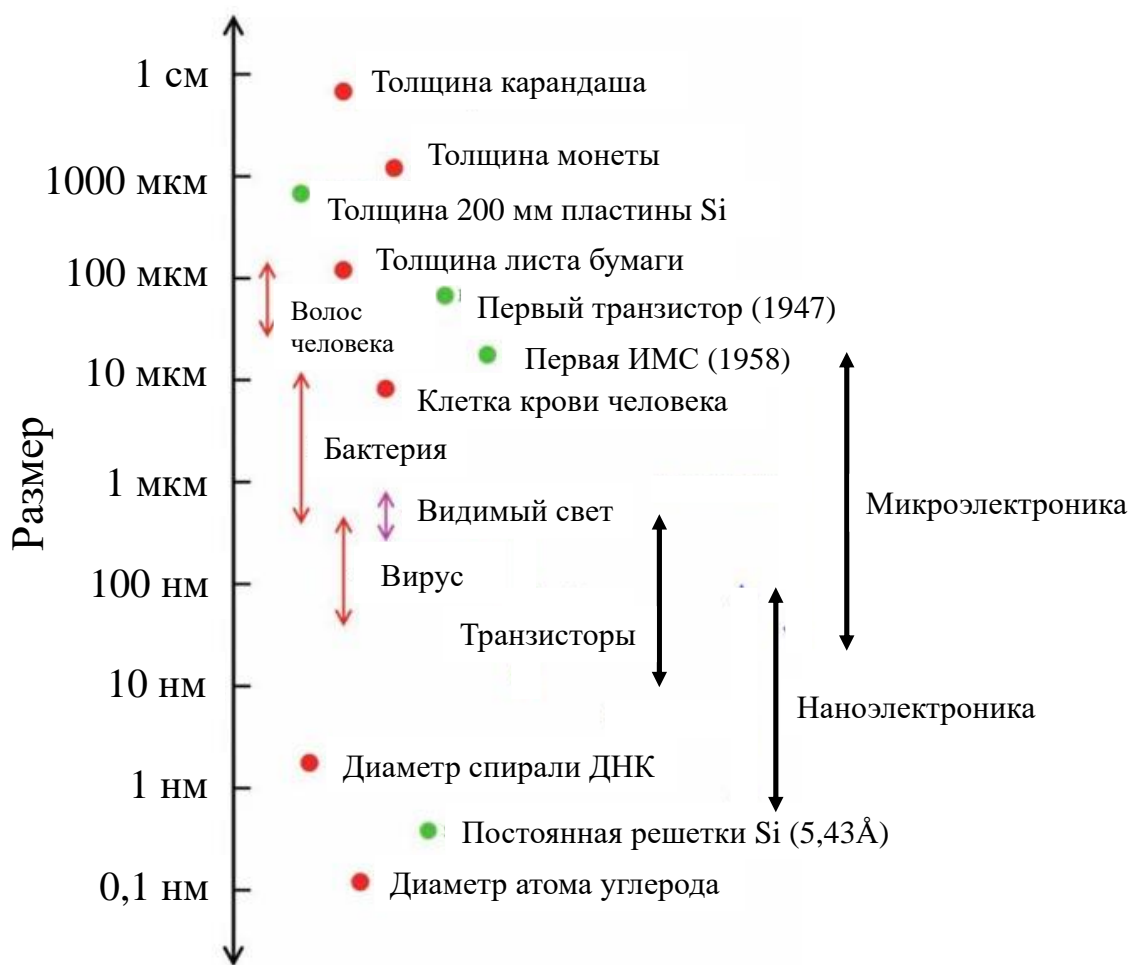
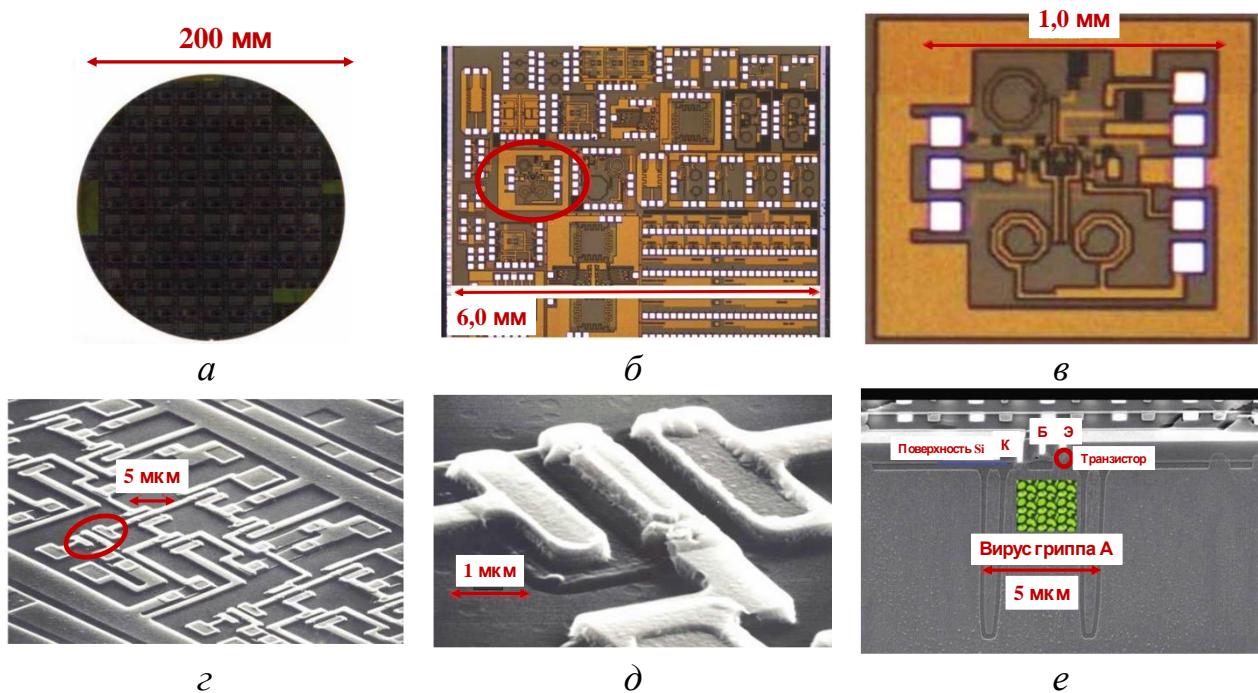


Рисунок 14 – Характерная шкала микро- и наноразмеров

Как уже отмечалось выше, микроэлектронное устройство микро- или нано-размеров можно визуализировать с помощью СЭМ. То есть для того, чтобы рассмотреть настоящее микроэлектронное устройство, необходимо очень большое увеличение изображения: для этого необходимо увеличить масштаб с макроскопического (видимого невооруженным глазом) до микроскопического (невидимого невооруженным глазом).

Это поэтапное увеличение начнем с кремниевой пластины диаметром 200 миллиметров. Фотография такой пластины, сделанная с помощью оптического микроскопа, показана на рисунке 15, *а*. На пластине кремния, представленной на рисунке, уже сформированы ряды чипов, которые после разрезания будут представлять собой почти готовые ИМС. Далее приведены фотографии, сделанные с последовательным увеличением. Изображения, приведенные на рисунках 15, *б* и *в*, получены с помощью оптического микроскопа, а изображения на рисунках 15, *г* и *д* – с помощью СЭМ. Такое представление информации позволяет визуализировать самый маленький компонент, находящийся на кремниевой пластине, а именно, непосредственно сам транзистор.



а – кремниевая пластина диаметром 200 мм; *б* – схема, состоящая из нескольких чипов; *в* – один чип; *г* – СЭМ-изображение набора транзисторов; *д* – СЭМ-изображение одного транзистора; *е* – поперечное сечение биполярного транзистора

Рисунок 15 – Детали микроэлектронного чипа

На рисунке 15, б показана оптическая микрофотография кремниевого чипа размером $6,0 \times 4,5$ миллиметра, используемая для исследования встроенных микросхем беспроводных приемопередатчиков. Белые квадраты представляют собой алюминиевые контактные площадки, которые позволяют подключать к цепи внешний прибор и измерять характеристики. На одной пластине размером 200 миллиметров воспроизводится примерно 70 идентичных тестовых схем. На этой кремниевой тестовой матрице имеется множество отдельных схем (одна из них обведена). Эта интегральная схема выполняет функцию радиочастотного микширования (объединение двух радиоволн разной частоты) и имеет размер около $1,0 \times 1,0$ миллиметра. Из этих размеров понятно, что приведенная схема все еще макроскопична.

Оптическая микрофотография радиочастотной интегральной схемы показана на рисунке 15, в. Отчетливо видны восемь контактных площадок, и теперь можно разглядеть сложную форму спирали (три круговые спирали – это мини-индуктивности). При таком уровне оптического увеличения транзисторы все еще неразличимы. На СЭМ-изображении можно увидеть отдельные транзисторы, металлическую проводку и резисторы. Указанные компоненты видны на рисунке 15, г. Диаметр транзистора (обведен) составляет примерно 5,0 микрометров. Сам транзистор показан на рисунке 15, д. Это тоже СЭМ-изображение, выполненное с большим увеличением по сравнению с изображением на рисунке 15, г. Если посмотреть на транзистор в поперечном сечении (буквально сломать пластину в точке, проходящей через транзистор), можно увидеть структуру самого транзистора. Она показана на рисунке 15, е. Заполненные оксидом глубокие и неглубокие желоба электрически изолируют один транзистор от другого, а различные уровни слоев металлизации используются для электрического соединения трех выводов – коллектора, базы и эмиттера (К, Б, Э) транзистора – с другими компонентами схемы. Отметим, что 95 % физики работы транзистора происходит внутри круга под меткой «Э» шириной примерно 0,15 микрометра.

Для подчеркивания малого размера транзистора на рисунке 15, е приведено семейство вирусов гриппа А. Каждый вирус диаметром около 0,1 микрометра наложен на СЭМ-изображение транзистора с соблюдением правильного масштаба. Из этой схемы отчетливо видно, что современные транзисторы буквально размером с вирус.

6 ВРЕМЕННЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОВРЕМЕННЫХ СБИС

Крупные достижения, связанные с революцией в микро- и наноэлектронике, напрямую определяются тем, что транзисторы могут быть одновременно очень маленькими, но при этом обеспечивать работу на высоких частотах, т. е. быстро обрабатывать информацию. Для понимания факта, насколько быстрыми могут быть транзисторы, необходимо разобраться со шкалой скоростей, которую представляет нам Вселенная. Рассмотрим основную шкалу времени Вселенной (в секундах). Данные представлены на рисунке 16.

Отметим некоторые основные моменты. Согласно наиболее оптимистичным астрономическим оценкам возраст Вселенной составляет около 4×10^{17} секунд (13,82 миллиарда лет). На 8 порядков меньше средняя продолжительность жизни человека (2×10^9 секунд). Еще на 9 порядков меньше время, необходимое для того, чтобы моргнуть глазами (доли секунды). На 9 порядков меньше время, необходимое микропроцессору в портативном компьютере для выполнения вычислительной операции (1 наносекунда = 1×10^{-9} секунды). И, наконец, на 6 порядков меньше время диэлектрической релаксации электрона в кристалле (то, насколько быстро электрон может чувствовать и реагировать на наложенное электрическое поле – 1 фемтосекунда = 1×10^{-15} секунды).

Таким образом, приблизительное отношение возраста (в секундах) Вселенной (самая длинная практическая шкала времени) ко времени диэлектрической релаксации электронов в кристалле (самая короткая практическая шкала времени) составляет довольно большое число, 1×10^{32} . Эту величину называют параметром универсального масштаба времени, и она составляет 32 порядка величины. Как и в случае с универсальным параметром шкалы расстояний, это очень большое число. Насколько оно большое, следует из следующего простого примера. Если бы, например, 1×10^{32} секунд было сжато до длины в один год (365 дней), продолжительность жизни человека составляла бы всего 0,747 фемтосекунды (0,000000000000000747 секунды). Как следует из рисунка 16, внутренняя скорость переключения (т. е. то, как быстро транзистор открывается и закрывается, когда работает как переключатель) современного транзистора находится в пикосекундном масштабе времени (1×10^{-12} секунды).

В настоящее время мировой рекорд скорости переключения транзистора на основе кремния составляет около 2 пикосекунд. Это быстрее, чем время срабатывания нейронов мозга человека, которое составляет чуть больше микросекунды. За время переключения транзистора световой луч пройдет расстояние менее 1 миллиметра. Поэтому такая скорость переключения транзистора является действительно очень быстрой.

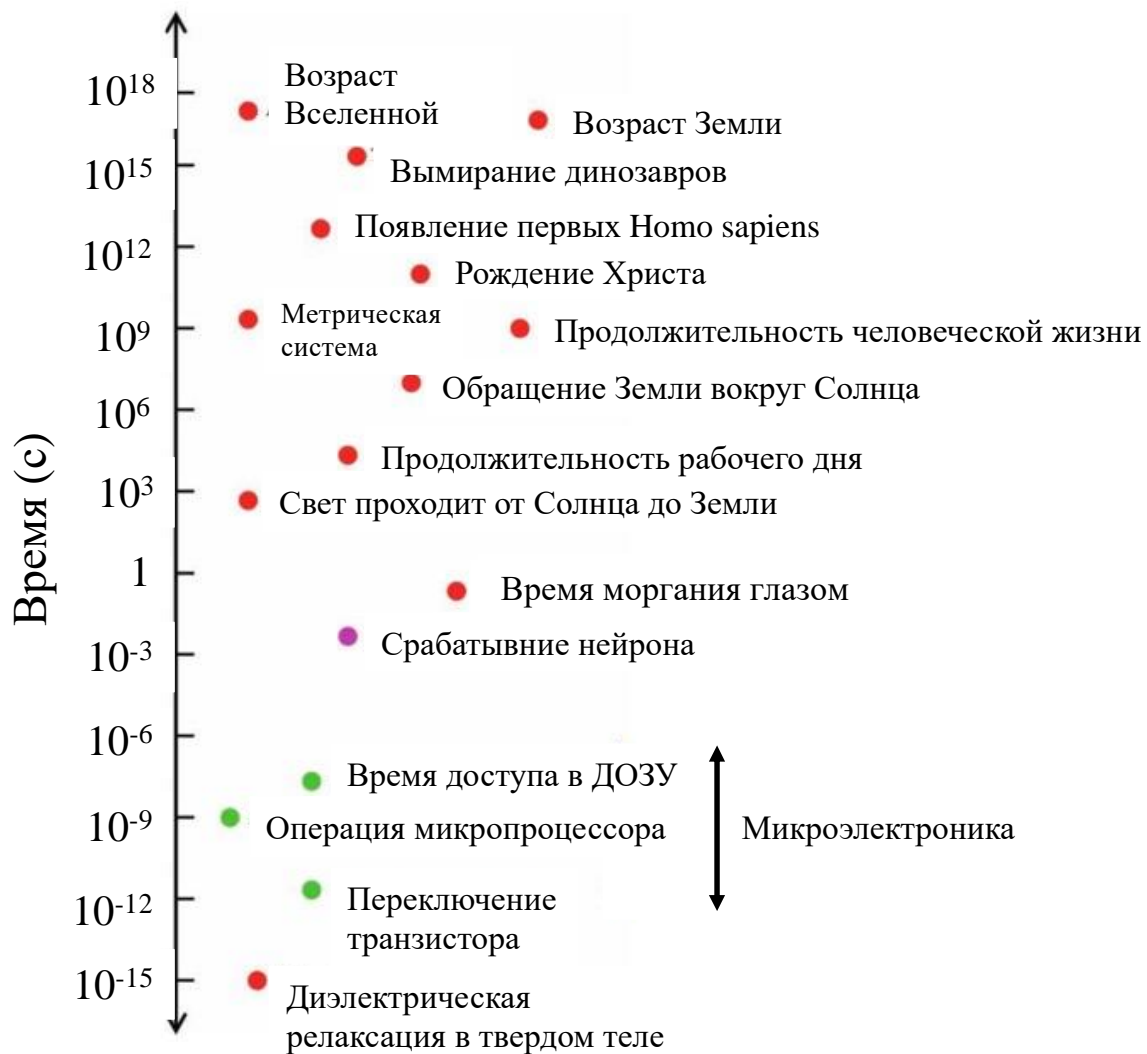


Рисунок 16 – Временная шкала Вселенной

Тесно связанным с временным масштабом Вселенной и очень важным в контексте приложений микро- и нанoeлектроники является частотный масштаб Вселенной, изображенный на рисунке 17. Для периодических волн (например, электромагнитных, звуковых или водяных волн) очень удобно говорить о частоте волны, т. е. о количестве волновых циклов в секунду. Частота измеряется в герцах, $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. Частота волны (f) – это скорость распространения волны (v), деленная на ее длину (λ), т. е. $f = v / \lambda$. Например, известно, что длина волны видимого света лежит в диапазоне 0,4–0,7 микрометра. Поскольку все электромагнитное излучение распространяется в вакууме со скоростью света ($3 \times 10^8 \text{ м/с}$), это означает, что видимый свет имеет диапазон частот от $4,3 \times 10^{14}$ до $7,5 \times 10^{14}$ герц, или 42–750 терагерц ($1 \text{ ТГц} = 1 \times 10^{12} \text{ Гц}$). Точно так же человеческое ухо воспринимает частотный диапазон акустических волн примерно от 20 герц до 20 килогерц.

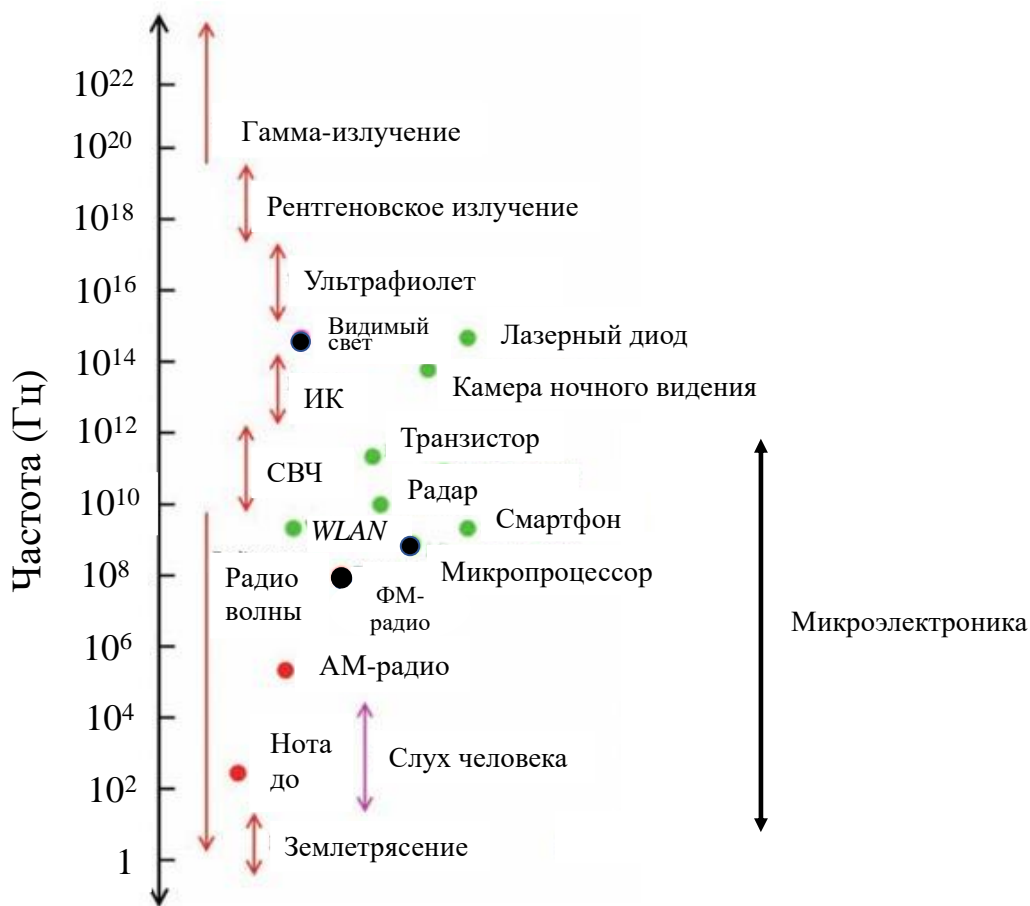


Рисунок 17 – Частотная шкала Вселенной

В отличие от масштабов расстояния и времени, Вселенная не имеет жестких практических границ в частотной области для электромагнитного излучения, и оно может охватывать диапазон от радиоволн ($f < 1 \times 10^{10}$ Гц), микроволн ($1 \times 10^{10} < f < 1 \times 10^{12}$ Гц) до инфракрасного излучения ($1 \times 10^{12} < f < 4 \times 10^{14}$ Гц). Далее следует узкий диапазон видимого спектра ($4 \times 10^{14} < f < 7 \times 10^{14}$ Гц), ультрафиолетовое излучение ($7 \times 10^{14} < f < 1 \times 10^{17}$ Гц), рентгеновские лучи ($1 \times 10^{17} < f < 1 \times 10^{19}$ Гц) и, наконец, гамма-излучение ($f > 1 \times 10^{19}$ Гц). Все эти диапазоны указаны на рисунке 17.

Однако существуют практические ограничения на собственные частотные возможности современных микроэлектронных (и фотонных) устройств, которые варьируются примерно от 1,0 гигагерц (1×10^9 Гц) до 1,0 терагерц, хотя очевидно, что электронные продукты, основанные на микроэлектронных устройствах, могут также работать на более низких частотах (как, например, АМ-радио или ФМ-радио), соответственно снижая частотный диапазон со 100 килогерц до нескольких сотен мегагерц.

Отметим еще некоторые полезные частотные диапазоны в контексте микро- и наноэлектроники. Несущая частота, используемая в смартфоне, составляет около 2 гигагерц; тактовая частота современного микропроцессора лежит в диапазоне от 2 до 4 гигагерц; несущая частота беспроводной локальной сети

(*WLAN*) для беспроводного маршрутизатора составляет 2,4 или 5,8 гигагерц. Как видно, все эти технологически важные частоты находятся в диапазоне нескольких гигагерц. Этот выбор частоты для передачи данных или голосовой связи не случаен, а скорее оптимизирован для обеспечения минимальных помех на заданном практическом расстоянии (помех от дождя, атмосферных помех, поглощения сигнала атмосферными газами и т. Д.). Транзисторы, используемые для построения интегральных схем в таких системах, способны функционировать на частоте вплоть до 100 гигагерц. Этот диапазон в литературе известен как *W*-диапазон (70–110 ГГц). Оптические (фотонные) микроэлектронные устройства, которые генерируют (или детектируют) электромагнитное излучение, функционируют на частоте ближе к частоте видимого спектра в терагерцах и включают важные области применения, такие как лазерные диоды (красный свет с частотой $f = 430$ терагерц), светоизлучающие диоды (зеленый свет с частотой $f = 700$ терагерц) или системы ночного видения (инфракрасный свет с частотой $f = 10$ терагерц).

7 ТЕМПЕРАТУРНАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ШКАЛА СОВРЕМЕННЫХ СБИС

В завершение обсуждения величин, которые характеризуют мир микро- и наноэлектроники, опишем температурные и энергетические масштабы Вселенной. Температура и энергия – это по сути одно и то же, и поэтому их можно использовать взаимозаменяемо, в зависимости от удобства. Энергия – это способность выполнять определенную работу, где формально работа – это приложение силы для перемещения объекта на заданное расстояние. Энергия может находиться в одной из двух форм и быть либо кинетической (энергия, связанная с движением объекта), либо потенциальной (скрытая энергия объекта, связанная с положением, например, под воздействием силы тяжести или электрического поля, или химической конфигурацией (например, можно сжечь объект, скажем, древесину или бензин, чтобы высвободить скрытую потенциальную энергию)). Одним из главных физических законов нашего мира является закон сохранения энергии.

Одна из распространенных трудностей в правильной оценке энергетических масштабов связана с их размерностью. В системе СИ предпочтительной единицей измерения энергии является джоуль ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$). Энергия в микро- и наноэлектронике чаще всего выражается в электрон-вольтах (эВ). Один электрон-вольт – это количество кинетической энергии, которое получает один электрон при ускорении с помощью электрического потенциала в один вольт. Отсюда следует, что $1 \text{ электрон-вольт} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ джоуля}$. Работа микро- и наноустройств сосредоточена на энергиях размером порядка единиц электрон-вольта (например, запрещенная зона энергии кремния составляет $1,12 \text{ электрон-вольт}$ при комнатной температуре).

По сути, энергия и абсолютная температура, измеряемые в кельвинах (К), связаны масштабным коэффициентом, известным как постоянная Больцмана (k), названная в честь ее первооткрывателя: $k = 8,617 \times 10^{-5} \text{ эВ/К}$, так что энергия, измеренная в электрон-вольтах, и есть та же самая энергия, измеренная в единицах тепловой энергии. Тепловая энергия (kT), как известно, занимает видное место в физике микро- и наноразмерных систем. Например, при комнатной температуре ($300 \text{ К} = 26,85 \text{ }^\circ\text{C}$) тепловая энергия ничтожно мала и составляет всего $0,0259 \text{ электрон-вольт}$. Характерные значения энергии систем, распространенных во Вселенной, приведены на рисунке 18. На нем указаны энергетические шкалы как в градусах Кельвина, так и в электрон-вольтах.

Рассмотрим более детально основную шкалу температуры – энергии Вселенной, представленную на рисунке 18. Ядро Солнца имеет температуру чуть более $15\,000\,000$ кельвинов, центр нашей галактики еще горячее (но его температуру труднее измерить, учитывая, что там находится огромная черная дыра). Почти на 6 порядков меньше этой величины (5×10^5) является комнатная температура (300 К), удобная точка отсчета для жизни на Земле и для микро- и нано-

электроники. Еще в 100 раз меньше космическая фоновая температура Вселенной (2,73 К), остаточное свечение Большого взрыва, которому 13,8 миллиарда лет. В настоящее время самая низкая достигнутая в лабораторных условиях температура составляет 100 пикокельвинов, что на целых 10 порядков ниже космического фона. Приблизительное соотношение самых высоких и самых низких достижимых температур во Вселенной составляет около 1×10^{18} . Как и другие параметры универсального масштаба (расстояние, время и частота), это крайне большое число.

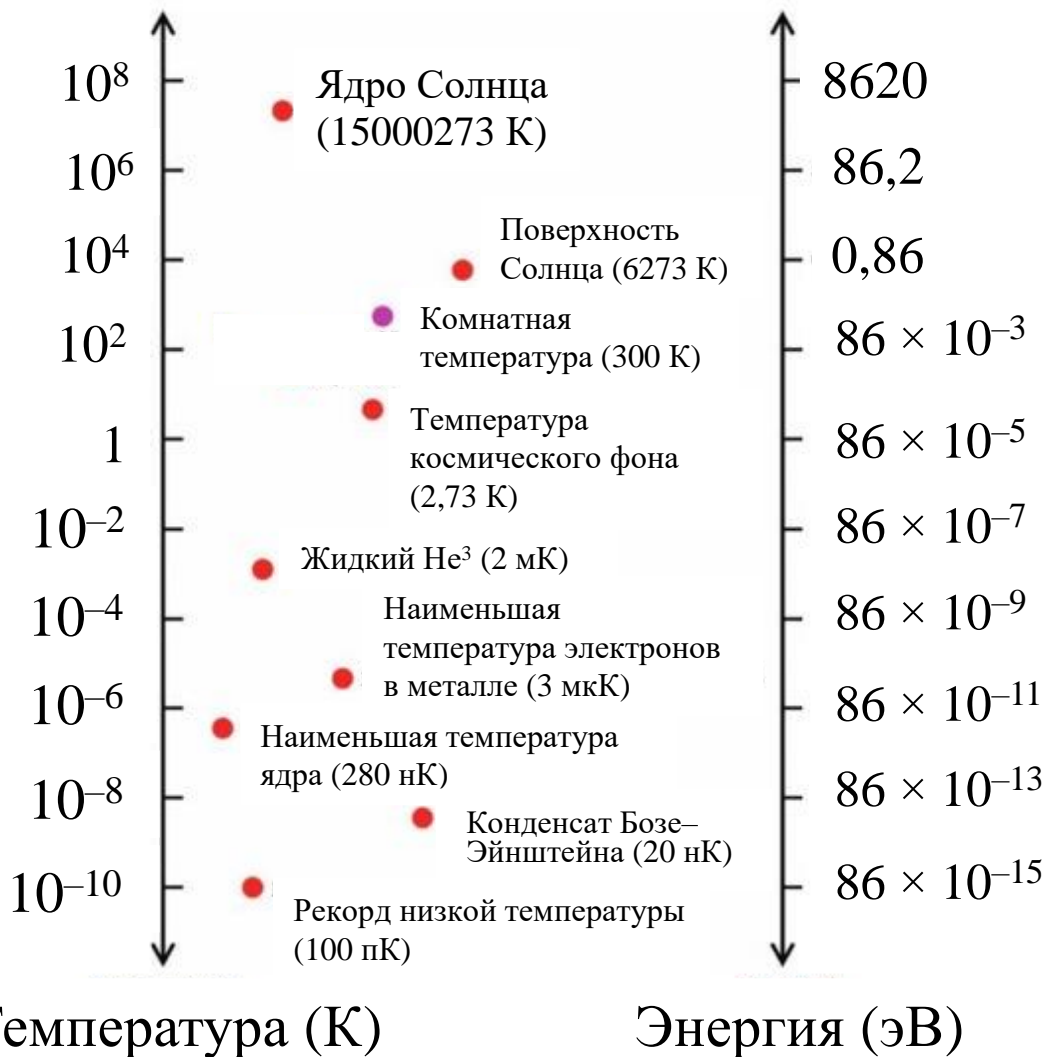


Рисунок 18 – Температурная и энергетическая шкала Вселенной

Теперь остановимся более подробно на вопросе, какое отношение температура и энергия имеют к миру микро- и нанoeлектроники. На рисунке 19 показана увеличенная шкалы температуры – энергии с выделением основных моментов, имеющих отношение к микро- и нанoeлектронике.

Отметим некоторые ключевые из них:

– диапазон рабочих температур стандартной электроники колеблется от -55 до $+125$ градусов Цельсия. Коммерческая электроника охватывает температурный диапазон от 0 до 85 градусов Цельсия;

– в настоящее время наблюдается тенденция к проектированию и эксплуатации электронных устройств и микросхем при все более низких температурах, до $77,3$ кельвинов (температура кипения жидкого азота) или даже до $4,2$ кельвинов (температура кипения жидкого гелия), а также при повышенных температурах, вплоть до 500 градусов Цельсия. Существует множество уникальных применений такой электроники в экстремальной окружающей среде, включая, например, исследование Луны, где температура на освещенных солнцем областях составляет около 120 градусов Цельсия, в то время как температура в постоянных темных пятнах (например, кратерах) может достигать -230 градусов Цельсия, или 43 кельвинов, что выходит далеко за пределы той области, при которой обычная электроника функционирует надежно.

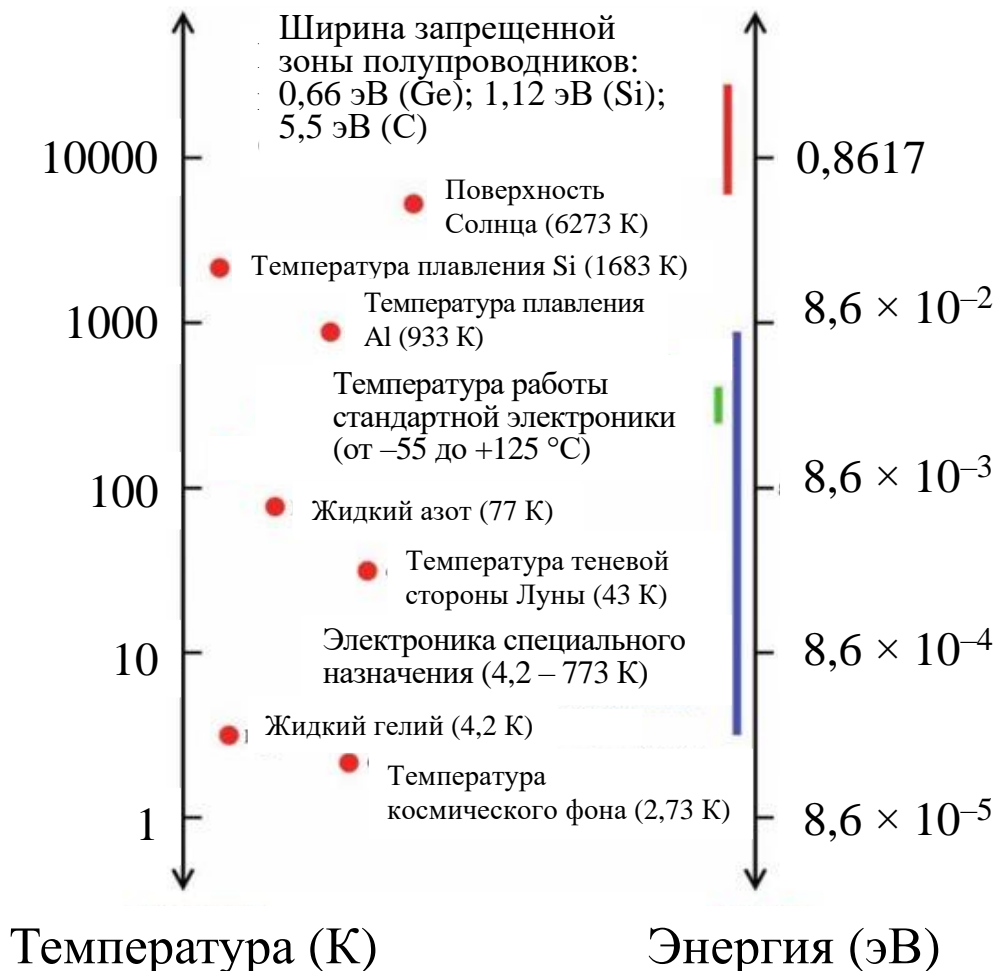


Рисунок 19 – Температурная и энергетическая шкала микро- и наноэлектроники

С энергетической точки зрения для понимания микро- и наномира можно выделить два дополнительных важных момента:

– запрещенная зона энергии (*energy gap*) – наиболее фундаментальный параметр (после значения энергии kT), определяющий свойства полупроводников и электронных и фотонных устройств, построенных на их основе, охватывает диапазон всего в несколько электрон-вольт (0,66 эВ – германий, 1,12 эВ – кремний, 3,0 эВ – карбид кремния, 5,5 эВ – алмаз). Именно эти значения энергии фактически требуются для создания микро- и наноэлектронных приборов, обеспечивающих работу телекоммуникационных устройств;

– другой релевантной энергетической мерой микро- и наномира является так называемый показатель качества интегральных микросхем, равный произведению потребляемой мощности на время задержки (*Power Delay Product – PDP*). Учитывая, что мощность измеряется в ваттах (Вт), а задержка переключения измеряется в секундах, это означает, что *PDP* является поддающейся количественной оценке мерой энергии, затраченной на переключение транзистора из состояния «0» в состояние «1», и наоборот. Минимизация *PDP* цифровой логики была основной движущей силой эволюции и достигла заметных успехов в индустрии микро- и наноэлектроники за последние 60 с лишним лет. Рекордная скорость переключения для одного цифрового логического элемента в настоящее время составляет около 2 пикосекунд при мощности потребления около 0,001 Вт (1 милливатт, мВт), что дает *PDP* около 2 фемтоджоулей (2×10^{-15} Дж). Несмотря на то что это очень малое количество энергии, обратим внимание, что оно все еще эквивалентно 12 484 электрон-вольт, что намного превышает значения энергии самих материалов, лежащих в основе микроэлектронных изделий и составляющих порядка единиц электрон-вольт.

8 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЛАСТИНЫ И ЧИСТЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Современный процесс создания интегральной микросхемы (ИМС, ИС) включает следующие этапы.

1. Выращивание монокристалла кремния. Для этого необходимо выполнить следующие операции:

- а) непосредственно выращивание монокристалла;
- б) разрезание монокристалла на пластины;
- в) полировка пластин.

2. Формирование пластин. Для этого необходимо проведение следующих операций:

- а) очистка подложек;
- б) осаждение необходимых функциональных слоев;
- в) травление слоев;
- г) формирование рисунка (топологии);
- д) легирование.

3. Тестирование чипов. Этот этап включает в себя:

- а) исследование свойств;
- б) электрическое тестирование;
- в) сортировку чипов.

4. Упаковка ИМС:

- а) резка пластины;
- б) постановка в корпус;
- в) создание контактов.

5. Финишный контроль:

а) испытание ИС при повышенных нагрузках (температура, механические напряжения);

б) тестирование функциональных свойств ИС.

Перечисленные выше этапы формирования современной СБИС невозможны без особых условий, в первую очередь важна чистота процессов на всех стадиях изготовления. Для этого используются чистые комнаты. В производстве СБИС весьма актуальной задачей является проблема создания чистых производственных помещений (ЧПП) с жесткими требованиями:

– к микроклимату помещений (низкая запыленность воздушной среды, оптимальные влажность, температура, скорости воздушных потоков, перепад давления в смежных помещениях);

– технологическому оборудованию и оснастке (отсутствие вибраций, шума, открытых движущихся частей, использование специальных материалов и др.);

– производственному персоналу (ношение специальной одежды, соблюдение правил поведения в рабочих помещениях).

Согласно стандарту *ISO 14644-5*, разработанному Международной организацией стандартизации (*ISO*), чистое помещение – это помещение, в котором

контролируется концентрация аэрозольных частиц, которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, и в котором при необходимости контролируются другие параметры (температура, влажность и давление) [7]. Таким образом, ЧПП – это помещение, снижающее до минимума поступление, генерацию и накопление частиц. Поставленная задача достигается подачей в чистое помещение больших объемов воздуха, фильтруемого высокоэффективными фильтрами. Он подается для разбавления и удаления частиц и бактерий, выделяемых персоналом и технологическим оборудованием, установленным в чистом помещении, а также для того, чтобы создать барьер от попадания загрязненных воздушных потоков извне. Кроме того, ЧПП построено из материалов, которые не генерируют аэрозолей и могут легко очищаться. Наконец, работающий в ЧПП персонал носит спецодежду, изолирующую его от окружающей среды и снижающую количество выделяемых частиц и микроорганизмов. В чистых помещениях могут также контролироваться температура, влажность, уровень шума, освещенность и вибрация.

Степень чистоты воздуха в ЧПП также регламентируется стандартом *ISO 14644-5*. При этом основным параметром, определяющим класс чистого производственного помещения, является количество частиц аэрозолей определенного размера на один метр кубический. Данные для различных классов ЧПП приведены в таблице 2.

Максимально допустимая концентрация аэрозольных частиц того или иного диаметра C_n рассчитывается по следующей формуле:

$$C_n = 10^N \left(\frac{0,1 \text{ мкм}}{D} \right)^{2,08},$$

где N – класс *ISO* ($N < 9$).

Для производства современных СБИС требуется класс чистоты не менее *ISO 3*.

Таблица 2 – Допустимое количество частиц в помещениях различных классов чистоты

| Класс чистоты | <i>ISO</i> 14644-1 | Число частиц в 1 м ³ воздуха | | | | | |
|---------------|--------------------|---|---------|---------|---------|-------|-------|
| | | 0,1 мкм | 0,2 мкм | 0,3 мкм | 0,5 мкм | 1 мкм | 5 мкм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ИМС | <i>ISO 1</i> | 10 | 2 | – | – | – | – |
| ИМС | <i>ISO 2</i> | 100 | 24 | 10 | 4 | – | – |
| 1 (ИМС) | <i>ISO 3</i> | 1000 | 237 | 102 | 35 | 8 | – |
| 10 (ИМС) | <i>ISO 4</i> | 10 000 | 2370 | 1020 | 352 | 83 | – |

Продолжение таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|-------|-----------|---------|---------|------------|-----------|---------|
| 100 (фармацевтика) | ISO 5 | 100 000 | 23 700 | 10 200 | 3520 | 832 | 29 |
| 1000 (оптика) | ISO 6 | 1 000 000 | 237 000 | 102 000 | 35 200 | 8320 | 293 |
| 10 000 (точное машиностроение) | ISO 7 | – | – | – | 352 000 | 83 200 | 2930 |
| 100 000 (автомобильная промышленность) | ISO 8 | – | – | – | 3 520 000 | 832 000 | 29 300 |
| 1 000 000 | ISO 9 | – | – | – | 35 200 000 | 8 320 000 | 293 000 |

Ключ к чистоте производственного помещения заключается в постоянном притоке воздуха через сложные системы фильтрации. Таким образом, воздух круглосуточно циркулирует в чистом помещении, с высокой скоростью проходя сверху вниз через сложные потолочные фильтры, затем выходит наружу через фильтры в полу и уже очищенный возвращается обратно через фильтры в ЧПП.

ЧПП необходимы из-за того, что размер транзистора составляет от 10 до 100 нанометров. Любые частицы, которые случайно попадают на поверхность пластины во время критического этапа обработки, загрязняют транзистор, искажая его параметры или приводя к необратимому браку.

Чтобы свести к минимуму объем обработки воздуха и, следовательно, весьма дорогостоящую фильтрацию, в чистую комнату выходят только рабочие органы различного оборудования для обработки пластин. Само оборудование расположено в отдельном помещении, которое не требует такой чистоты окружающей среды. Для него достаточно, как правило, соблюдать класс ISO 6.

Одним из возможных источников загрязнения является персонал. С этой точки зрения персонал является источником чешуек кожи, кусочков волос, бактерий, вирусов, клещей, остатков химических веществ и др. Натрий, содержащийся в человеческом поту, особенно опасен для транзисторов. Поэтому для входа в чистую комнату персонал должен обдуться высокоскоростным потоком воздуха, а затем облачаться в специальный костюм, надевать маску, сетку для волос и латексные перчатки.

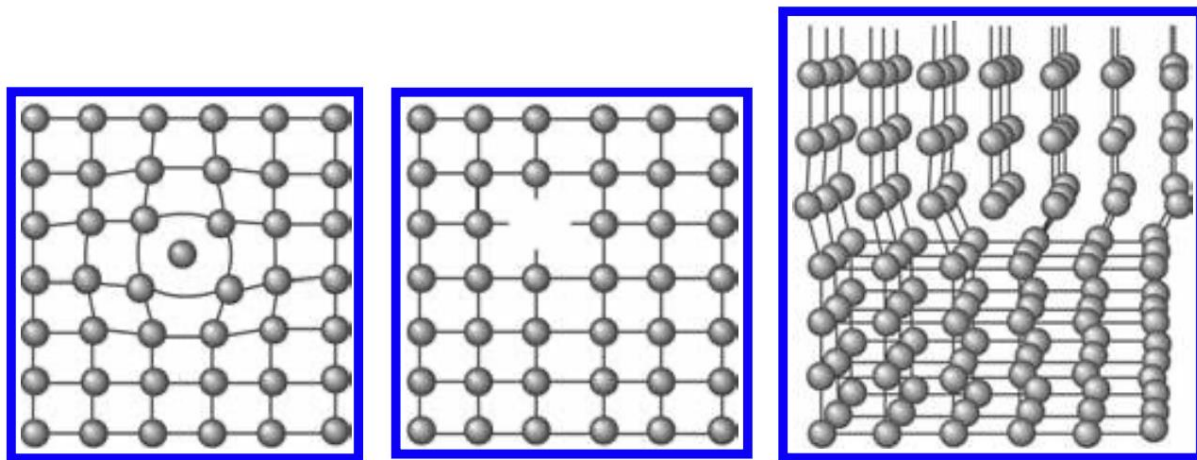
Успешное производство микросхем требует как времени, так и энергии, задействуя 3 смены персонала в день, 7 дней в неделю, 52 недели в году. Персонал фабрики много раз за смену пересекает производственные помещения, чтобы

выполнить отдельный этап технологического процесса, использует очень дорогое производственное оборудование с последующей перепроверкой того, что было только что сделано (чтобы убедиться, что все правильно, прежде чем двигаться дальше). Очевидно, что сведение к минимуму времени контакта персонала с микросхемами является залогом снижения брака при производстве СБИС.

9 РОСТ КРИСТАЛЛОВ И ПРОЦЕССЫ ЭПИТАКСИИ

Основная идея выращивания монокристаллов кремния заключается в следующем: расплавляют сверхчистый кремний, опускают затравочный кристалл кремния в емкость с расплавленным кремнием, очень медленно вращают емкость с расплавом в одном направлении (например, по часовой стрелке), а саму затравку – в другом (в данном примере против часовой стрелки), формируя круглый кристалл. Затем в течение нескольких дней или недель при строго контролируемых условиях осторожно извлекают затравку из расплава. Этот метод выращивания кристаллов называется процессом Чохральского. В результате получается целый кремниевый слиток в виде стержня. Современная технология позволяет выращивать кремниевые стержни диаметром до 450 миллиметров и длиной до 3 метров. В этом случае требуется время порядка одного месяца. Столько же времени требуется для плавного остывания выращенного гигантского монокристалла кремния.

Ключом к успеху в создании функциональных микросхем является то, что дефекты кристаллов, возникающие во время выращивания стержня, должны быть сведены к минимуму. Типичные дефекты кристалла включают в себя межузельный атом (дополнительный атом там, где он не должен быть), вакансию (отсутствующий атом) и краевой дефект или дислокацию (ряд дополнительных или отсутствующих атомов), показанные на рисунке 20.



a

б

в

a – межузельный атом; *б* – вакансия; *в* – краевой дефект

Рисунок 20 – Виды основных дефектов кристаллической решетки

После окончания процесса выращивания стержень разрезается на тонкие пластины (толщина кремниевой пластины диаметром 300 миллиметров составляет около 800 микрон) алмазной пилой и полируется с одной стороны для получения зеркальной поверхности. Предварительно отполированные, а затем

химически очищенные пластины получают атомарно плоскими (т. е. с отклонением менее одного нанометра по всей поверхности пластины) на той стороне пластины, где в последующем будет происходить процесс формирования СБИС.

Существуют экономические преимущества в том, чтобы делать исходную пластину как можно больше по площади. Действительно, при фиксированном выходе годных изделий производитель создаст больше микросхем на одной пластине большего диаметра. В силу этого размеры кремниевых пластин неуклонно росли с начала 1960-х годов до их нынешнего размера в 450 миллиметров. При этом стоимость единицы площади пластины после освоения технологии выращивания стала сравнимой с удельной ценой пластины предыдущего поколения. На рисунке 21 видно, что в настоящее время стоимость единицы площади 450-миллиметровой пластины все еще велика и превосходит аналогичные значения для пластин меньшего диаметра. Однако прогнозные показатели свидетельствуют о том, что к 2030 году стоимость единицы площади пластины кремния диаметром 450 миллиметров сравняется с аналогичной стоимостью для пластин меньшего диаметра. В этом случае микроэлектронная промышленность повсеместно будет переходить на кремниевые пластины большего диаметра.

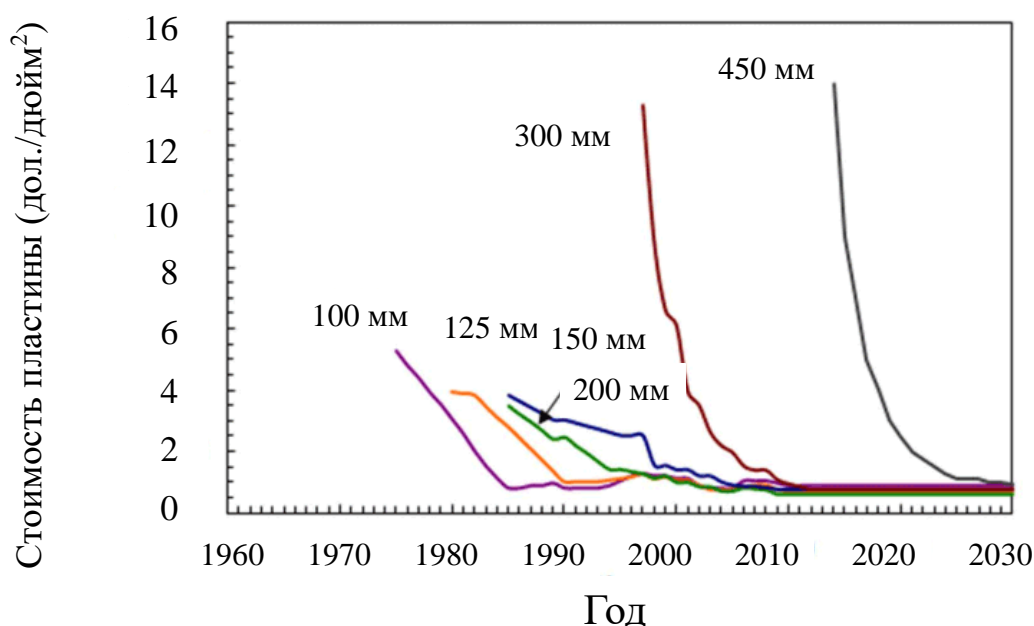


Рисунок 21 – Зависимость стоимости единицы площади кремниевой пластины от времени

В дополнение к бездефектным полупроводниковым пластинам обычно в производстве СБИС требуется дополнительная кристаллическая пленка кремния, выращенная непосредственно поверх исходной пластины (т. е. второй слой кристалла чистого кремния, который является атомарно гладким и бездефектным). Этот дополнительный слой создается с помощью процесса эпитаксии и может быть выращен как легированным, так и нелегированным (собственным

полупроводником) в зависимости от необходимости. Эпитаксиальный слой кремния обычно выращивается с помощью высокотемпературного (1100 °С) либо низкотемпературного (500–600 °С) процесса.

Высокотемпературный процесс на сегодняшний день является довольно рутинным и хорошо освоенным микроэлектронной промышленностью, в то время как низкотемпературный процесс остается довольно проблемным и требует сложного и дорогостоящего оборудования. Корреляция между температурой роста и простотой получения высококачественного эпитаксиального слоя довольно очевидна: чем выше температура, тем легче атомы кремния могут оказаться там, где им необходимо находиться на поверхности основной решетки материала подложки, и внедриться в кристаллическую матрицу, не создавая дефектов. Химический процесс высокотемпературного выращивания эпитаксиального кремния *n*-типа (кремний, легированный мышьяком) схематически показан на рисунке 22.

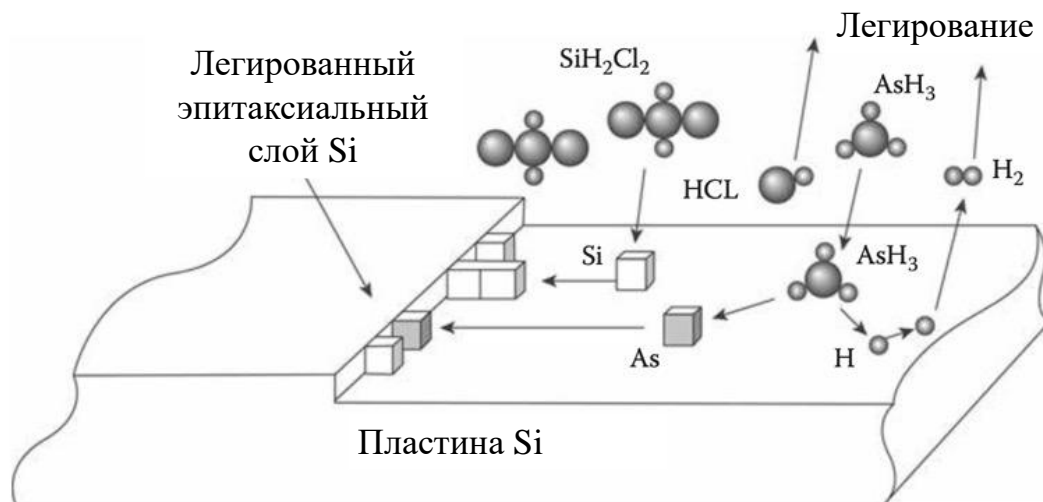


Рисунок 22 – Схематическое изображение процесса высокотемпературного эпитаксиального роста кремния, легированного мышьяком

Для современных устройств микро- и нанoeлектроники крайне перспективным является процесс низкотемпературной эпитаксии. Это связано в первую очередь с тем, что энергетическая запрещенная зона в полупроводниках зависит от постоянной решетки. Эта зависимость для наиболее распространенных в производстве СБИС полупроводников представлена на рисунке 23. Из рисунка следует, что, если кремний и германий не согласуются по постоянной решетки с арсенидом галлия, то арсенид алюминия с ним согласуется хорошо, как и фосфид галлия-индия (In_{0,53}Ga_{0,47}P) согласуется по постоянной решетки с фосфидом индия. Возможность выборочного изменения ширины запрещенной зоны через изменение постоянной решетки оказывается исключительно мощным рычагом для коррекции свойств как электронных, так и фотонных устройств в соответствии с потребностями (например, для увеличения тактовой частоты работы транзистора

или изменения длины волны лазерного диода). В настоящее время микроэлектронная промышленность в состоянии вырастить полупроводниковый сплав заданного состава для достижения желаемой величины запрещенной зоны. При этом требуется встроить полученный новый сплав в микроэлектронное устройство, а для этого необходимо вырастить его в виде эпитаксиального слоя и соединить с основным кристаллом. Низкотемпературный эпитаксиальный процесс обычно требуется в силу того, что нижележащие структуры или материалы, из которых уже синтезирована часть интегральной микросхемы, не должны быть подвергнуты высокотемпературной обработке. В противном случае возможна нежелательная взаимная диффузия материалов, размытие границы между ними, что приведет к необратимым катастрофическим последствиям.

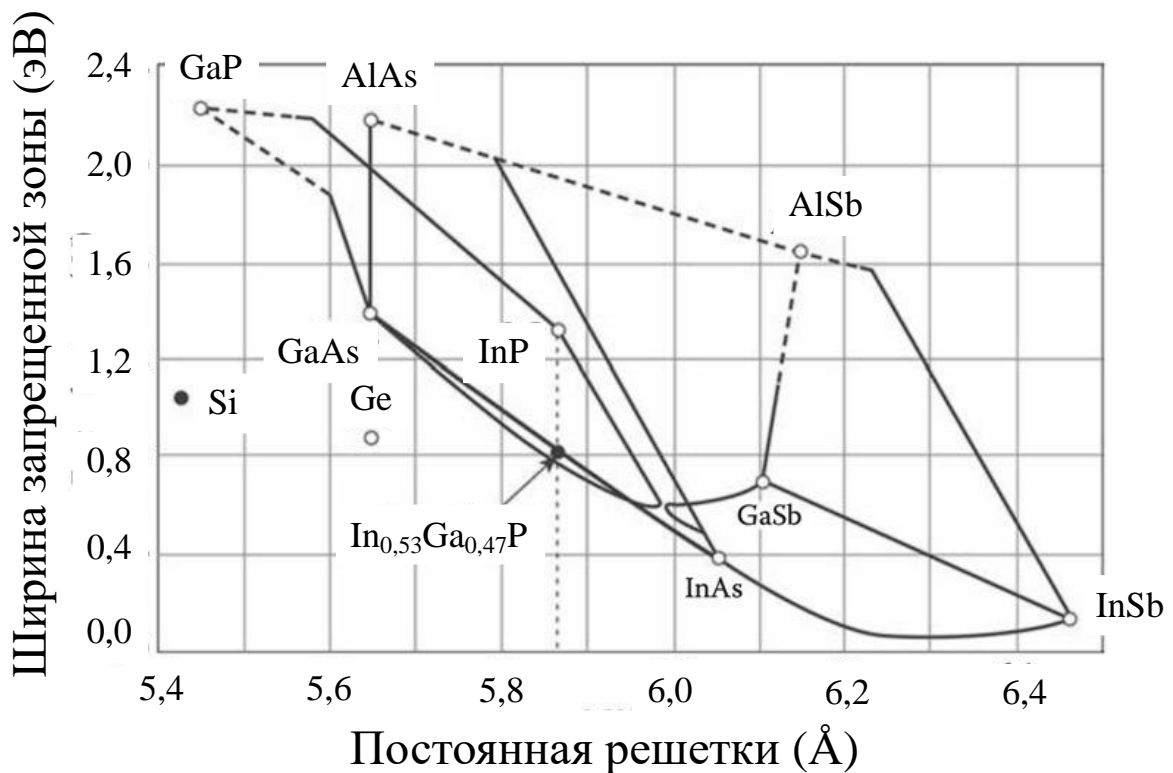


Рисунок 23 – Зависимость ширины запрещенной зоны некоторых полупроводников от их постоянной кристаллической решетки

Рассмотрим следующий технологически важный пример в качестве тестового. Сплав кремний-германий (SiGe) может быть выращен на кремниевой пластине-носителе для модификации запрещенной зоны, совместимой с производством кремния при проектировании высокочастотных транзисторов. Сплав SiGe, вообще говоря, не согласуется по постоянной решетки с кремнием (рисунок 24) – его постоянная решетки больше, чем у кремния. Это обусловлено тем, что постоянная решетки кремния равна 0,357 нанометра, тогда как постоянная решетки германия составляет 0,357 нанометра, разница составляет около 4 %. Схематически этот случай показан на рисунке 24.

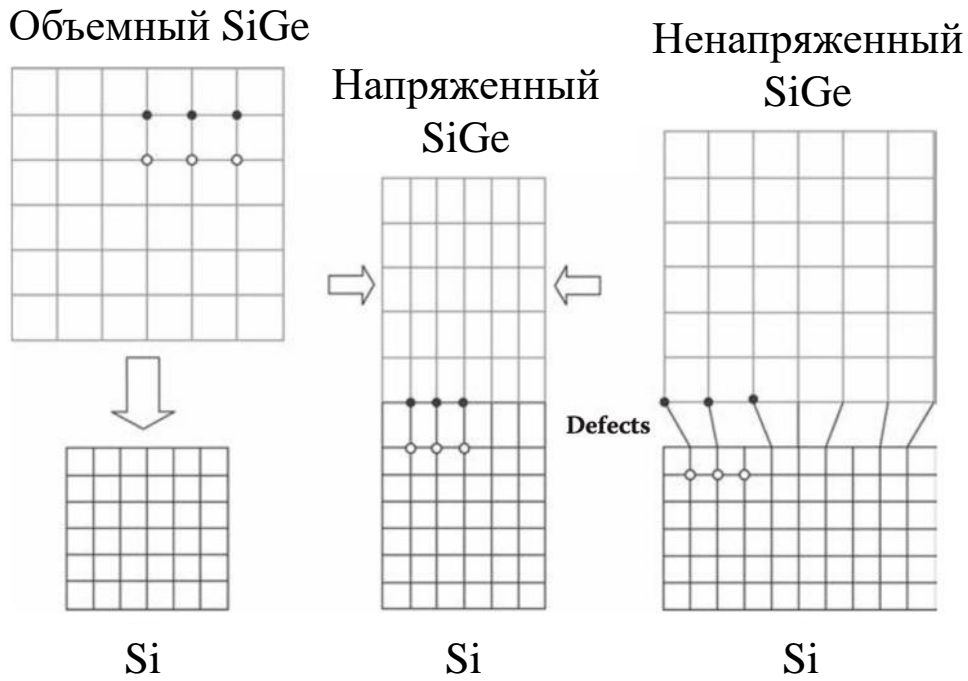


Рисунок 24 – Схематическое изображение эпитаксиального роста SiGe на Si

Подобное присущее кристаллическим решеткам несоответствие между эпитаксиальным слоем и пластиной часто имеет место в реализации СБИС. Проблема рассогласования постоянных решеток при низкотемпературной эпитаксии обычно решается введением дефектов дислокации на границе роста эпитаксиального слоя во время изготовления. Схематически это показано на рисунке 25.

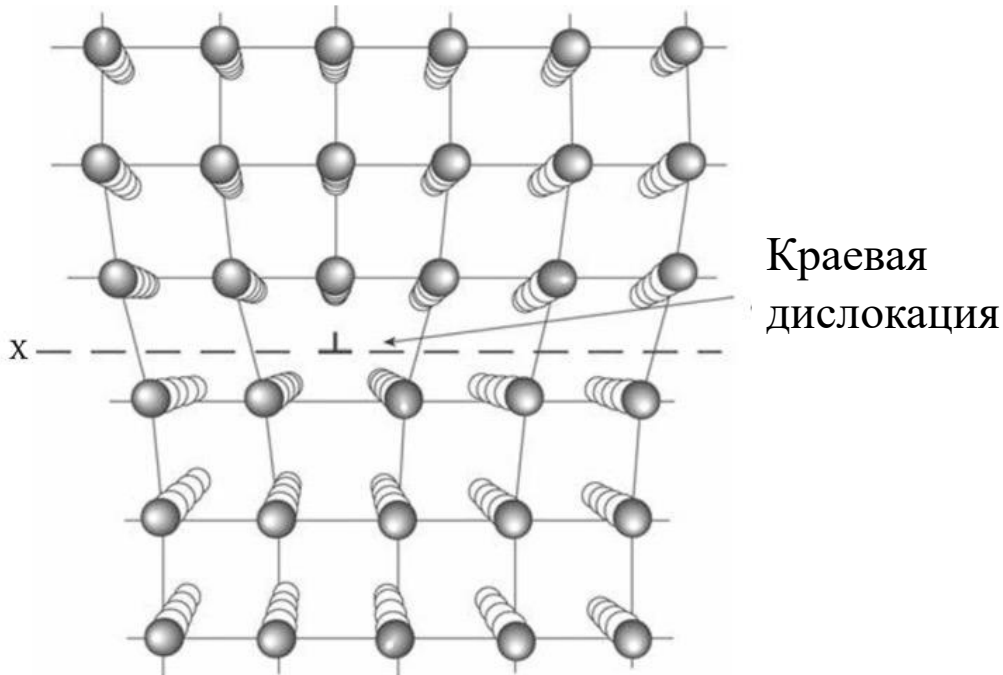


Рисунок 25 – Схематическое изображение краевой дислокации, сформированной во время роста эпитаксиального слоя

В настоящее время выращивание бездефектного эпитаксиального слоя SiGe на больших кремниевых пластинах является хорошо отработанной технологией. Эпитаксиальный сплав SiGe сжимается (деформация сжатия) во время его последовательного роста атом за атомом, что приводит к тому, что пленка принимает основную постоянную решетки Si и образует бездефектный наноразмерный материал в полученном эпитаксиально деформированном сплаве SiGe (см. рисунок 24). На этом эффекте основано формирование множества современных микроэлектронных устройств. Очевидно, однако, что величина деформации, которая может быть достигнута в подобных напряженных эпитаксиальных пленках, не должна превышать некоторого критического значения, иначе пленка может разрушиться. Следовательно, нельзя добавлять слишком много германия в пленку либо выращивать слишком толстую пленку. В этом случае будет превышен критерий термодинамического равновесия, и вся структура вернется к своему естественному ненапряженному состоянию, вызывая множество расширенных дефектов, что приведет к деградации свойств СБИС. Знание этой точной границы параметров (процент германия и толщина сплава кремний-германий) имеет большое практическое значение для успешной модификации запрещенных зон полупроводника.

10 ЛЕГИРОВАНИЕ: ДИФФУЗИЯ, ИМПЛАНТАЦИЯ И ОТЖИГ

После того как сформирована платформа для создания полупроводниковых СБИС (имеется либо монокристаллическая полупроводниковая пластина, либо эпитаксиальный слой, выращенный на пластине, либо и то, и другое вместе), необходим контроль и модификация удельного сопротивления и типа проводимости слоев. Кроме того, необходимо сформировать профиль распределения концентрации примесей по глубине, $N(x)$, где N – концентрация легирующего вещества, x – расстояние в направлении, перпендикулярном плоскости пластины. Наконец, очень важно иметь возможность контролировать степень легирования как по поверхности, так и по глубине. Для этого при помещении легирующей примеси на поверхности кристалла ее затем необходимо контролируемо перераспределить по глубине. Это перераспределение позволяет достичь двух основных целей:

- точное адаптирование профиля легирования $N(x)$ в соответствии с потребностями (например, для изменения свойств транзистора);

- управление проводимостью легированных слоев. Для того чтобы донорная примесь отдала свой электрон в зону проводимости и стала доступной для переноса электрического тока, атом примеси должен заменить атом кремния в кристаллической решетке.

Исторически впервые процесс введения и перераспределения легирующей примеси осуществлялся в высокотемпературной (порядка 1000 °С) диффузионной печи. В процессе кремниевые пластины помещают в кварцевую лодочку внутри кварцевой диффузионной трубки, нагревают до очень высокой температуры (буквально раскаляют докрасна), а затем добавляют выбранную легирующую добавку в газообразной форме (например, газообразный фосфин для легирования фосфором и получения проводимости n -типа). При таких высоких температурах легирующая добавка обладает достаточной энергией для миграции (диффузии) в кристалл в процессе, известном как диффузия в твердом состоянии (обратим внимание, что при этом ни одно из веществ не плавится). Атомы легирующей примеси проникают (диффундируют) в твердое вещество одним из двух основных способов:

- замещающая диффузия, при которой легирующая добавка перемещается через свободные участки решетки кремния;

- промежуточная диффузия, при которой легирующая добавка перемещается между атомами кремния в решетке;

- возможна также комбинация обоих методов.

Эти процессы схематически представлены на рисунке 26. Когда легирующие добавки достигают «правильного» расположения в кремниевой решетке, температура снижается, и легирующая примесь эффективно «застывает» в нужных местах.

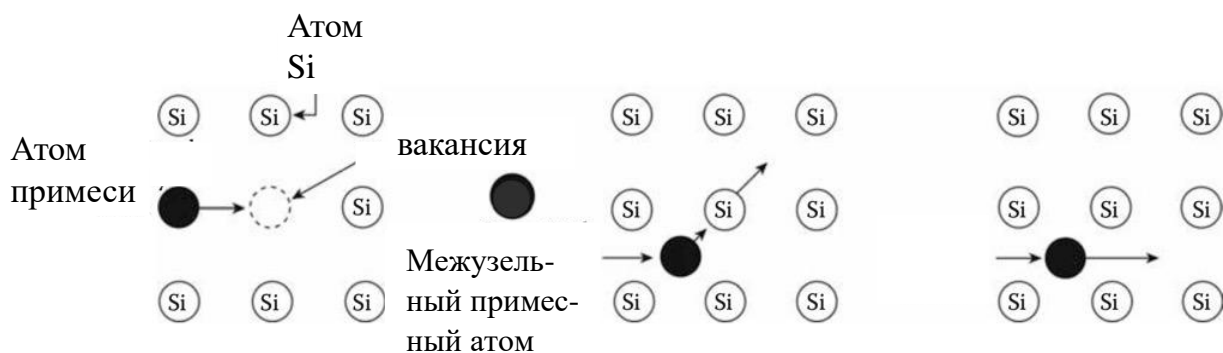


Рисунок 26 – Схематическое изображение различных диффузионно-легирующих процессов

Математически процессы диффузии описываются законами Фика. Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентраций [8]

$$F = -D \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (1)$$

где F – плотность потока вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени, измеряется в единицах $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $\frac{\partial N}{\partial x}$ – градиент концентрации примеси в направлении диффузии; D – коэффициент диффузии, имеющий размерность $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Обычно коэффициент диффузии определяется из экспериментальных измерений. Уравнение непрерывности связывает скорость роста концентрации легирующей примеси со временем и градиент плотности потока вещества. В одномерном случае уравнение непрерывности запишется как

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x}. \quad (2)$$

Объединив уравнения (1) и (2), получим второй закон Фика, который определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Это дифференциальное уравнение в частных производных может быть решено с помощью метода разделения переменных при соблюдении соответствующих граничных условий. Двумя наиболее практичными граничными условиями являются:

– диффузия с постоянным источником, при которой концентрация поверхностной легирующей примеси на поверхности кристалла во время диффузии поддерживается фиксированной;

– диффузия с ограниченным источником, во время которой фиксированное количество легирующей примеси находится на поверхности и не пополняется.

Решение этих двух задач приводит к классическим профилям диффузии, зависящим от времени.

Для диффузии из неограниченного источника решение уравнения (3) запишется как

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (4)$$

где $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy$ – дополненная до 1 функция ошибок; t – время загонки примеси; N_0 – концентрация примеси на поверхности ($x = 0$) [9]. Для диффузии из ограниченного источника (этап разгонки примеси) распределение профиля концентрации примеси выглядит следующим образом:

$$N(x, t) = \frac{2N_0\sqrt{Dt/\pi}}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой функцию распределения Гаусса. Обе зависимости $N(x)$, описываемые уравнениями (4) и (5), дают схожее распределение. Это видно из рисунка 27, на котором отложены распределение концентрации примеси по глубине согласно закону функции ошибок (4) и распределения Гаусса (5).

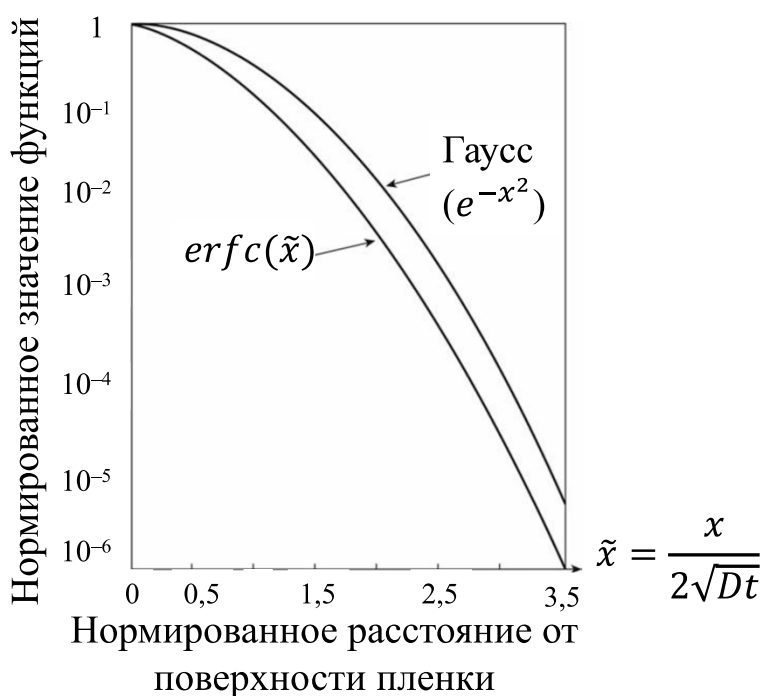


Рисунок 27 – Сравнение распределения примеси по глубине согласно функции ошибок и распределения Гаусса при твердотельной диффузии

В обоих случаях зависимость глубины диффузии от времени определяется произведением Dt . Это продемонстрировано на рисунке 28, на котором представлены профили распределения диффузионной примеси на этапе загонки для разных значений Dt .

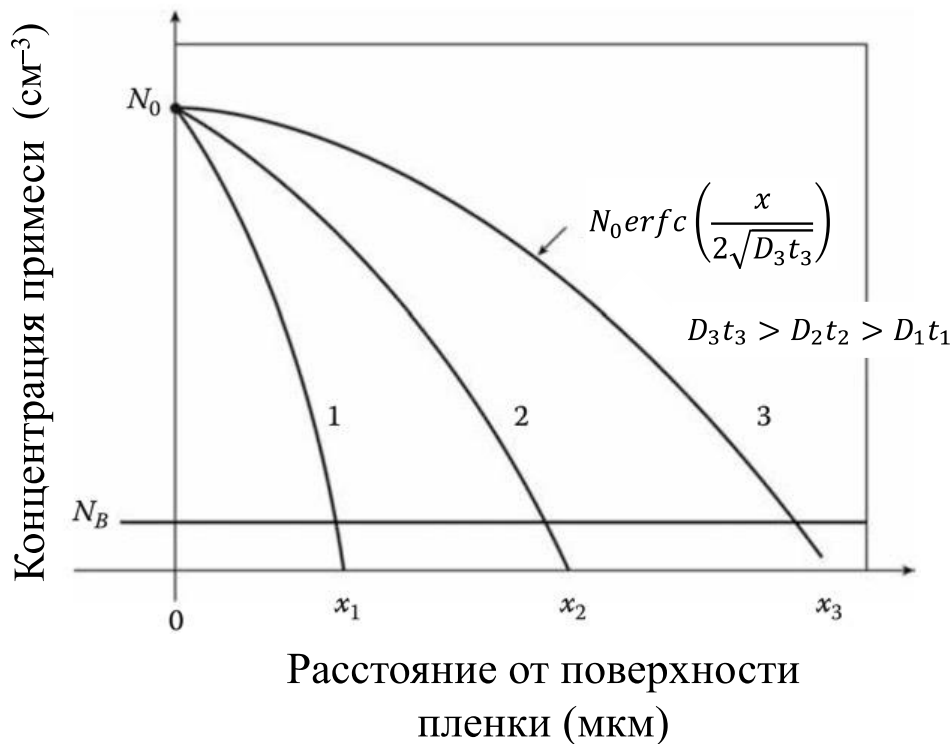


Рисунок 28 – Распределение профиля примеси для разных значений Dt

В микроэлектронике существует еще один важный параметр – доза легирования Q . Она определяется числом атомов примеси, введенных в кристалл на этапе загонки за время диффузии через единичную площадь. Дозу легирования можно получить из первого закона Фика:

$$F_{x=0} = -D \left(\frac{dN}{dx} \right)_{x=0} = \left\{ N = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} = DN_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{2\sqrt{Dt}} \exp \left[-\frac{x^2}{4Dt} \right]_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (6)$$

Поскольку доза легирования – это интеграл по времени от плотности потока вещества, то из уравнения (6) имеем

$$Q = \int_0^t F dt = \int_0^t N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} t^{-1/2} dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 1,13N_0 \sqrt{Dt}. \quad (7)$$

Для уменьшения температурного воздействия, т. е. уменьшения влияния фактора Dt , поверхностную концентрацию N_0 на этапе загонки выбирают наибо-

лее соответствующей максимальной растворимости примеси при данной температуре. Заменяв N_0 на величину предельной растворимости N_p , получим следующее выражение для дозы легирования:

$$Q = 1,13N_p\sqrt{Dt}. \quad (8)$$

На этапе разгонки примесь, введенная при загонке, распределяется вглубь полупроводника. При этом поверхностная концентрация примеси с течением времени убывает. Граничные условия для решения второго уравнения Фика на этапе разгонки имеют вид

$$N(t = 0, x = 0) = N_p, \quad N(t > 0, x \rightarrow \infty) = 0. \quad (9)$$

Как мы уже знаем, профиль распределения примеси на этом этапе определяется распределением Гаусса и описывается уравнением (5). Отметим, что чем тоньше слой, из которого происходит разгонка, тем точнее соблюдается закон. Полученный профиль распределения предполагает, что поступление примеси в кристалл извне и испарение примеси из кристалла отсутствуют. На практике это реализуется нагревом пластин в окислительной среде. При этом формирующаяся оксидная пленка на поверхности пластины препятствует испарению введенной на этапе загонки примеси.

Таким образом, решающими технологическими факторами процесса диффузии являются время диффузии, температура, растворимость примеси, свойства источника диффузанта, условия на поверхности и т. д. Точность поддержания этих параметров определяет стабильность и качество диффузионных структур, а следовательно, и элементов СБИС.

11 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСТАДИЙНОЙ ДИФФУЗИИ

Рассмотрим в качестве примера расчет параметров двухстадийной диффузии (этап загонки – этап разгонки). Исходные параметры для расчета – это конечные параметры структуры, а именно, глубина залегания p - n -перехода x_{p-n} и поверхностная концентрация N_0 . На практике вместо последней величины обычно используют ρ_s – поверхностное сопротивление диффузионной области. Это связано с тем, что поверхностное сопротивление может быть легко определено из измерений проводимости на постоянном токе.

Расчет обычно начинается со второй стадии – этапа разгонки. Для правильного определения положения p - n -перехода необходимо положить равенство концентрации введенной и исходной примесей на глубине залегания p - n -перехода:

$$N_{\text{введ}}(x = x_{p-n}) = N_{\text{исх}}(x = x_{p-n}). \quad (10)$$

Тогда распределение Гаусса запишется как

$$N_{\text{введ}}(x = x_{p-n}) = N_0 \exp\left(-\frac{x_{p-n}^2}{4D_2 t_2}\right), \quad (11)$$

где D_2 – коэффициент диффузии при температуре разгонки; t_2 – время разгонки; N_0 – поверхностная концентрация диффундирующей примеси.

Значение исходной концентрации примеси на глубине залегания p - n -перехода $N_{\text{исх}}(x = x_{p-n})$ зависит от метода легирования. Если примесь вводится в монокристаллическую подложку, в которой исходная примесь распределена равномерно, то $N_{\text{исх}}(x = x_{p-n})$ определяется по кривым зависимости удельного сопротивления от концентрации примеси. Эти зависимости известны для всех используемых в производстве СБИС элементов. Значение ρ_s определяется из маркировки подложки. Если примесь внедряется в область, ранее легированную методом диффузии, то значение концентрации $N_{\text{исх}}(x = x_{p-n})$ рассчитывается по уравнению, описывающему закон распределения примеси в ранее легированной области при расстоянии x , равном глубине залегания p - n -перехода рассчитываемой области:

$$x_{p-n} = 2\sqrt{Dt} \left(\ln \frac{N_0}{N_{\text{исх}}}\right)^{1/2}. \quad (12)$$

Далее, на основании уравнений (10) и (11) определяется время разгонки

$$t_2 = \frac{x_{p-n}^2}{4D_2 \ln\left(\frac{N_0}{N_{\text{исх}}}\right)}. \quad (13)$$

Для температуры, при которой происходит разгонка, необходимо определить коэффициент диффузии. В общем случае коэффициент диффузии описывается законом Аррениуса:

$$D = D_0 \exp(-E_a / kT), \quad (14)$$

где E_a – энергия активации, характеризующая энергию, необходимую для перехода атома в соседний узел решетки; D_0 – кажущийся коэффициент диффузии, равный коэффициенту диффузии D при бесконечно большой температуре, k – постоянная Больцмана. В таблице 3 приведены значения энергии активации, кажущегося коэффициента диффузии и предельной растворимости в кремнии при температуре 1200 °С для некоторых наиболее характерных элементов, применяющихся в производстве СБИС.

Таблица 3 – Параметры, описывающие диффузию в кремний основных элементов, применяющихся в производстве СБИС

| Элемент | E_a , эВ | D_0 , см ² ·с ⁻¹ | N_p , см ⁻³ | m |
|---------|------------|--|--------------------------|--------|
| B | 3,7 | 11,5 | 5×10^{20} | 0,3 |
| Ga | 3,5 | 3,3 | 4×10^{19} | 20 |
| In | 3,9 | 16 | 1×10^{19} | 10 000 |
| P | 4,4 | 1400 | $1,2 \times 10^{21}$ | 10 |
| As | 3,6 | 0,44 | $1,7 \times 10^{21}$ | 10 |
| Sb | 3,9 | 4 | 6×10^{20} | 10 |

После определения коэффициента диффузии D_2 на основании уравнения (14), определяется время разгонки t_2 . Затем при известных значениях D_2 и t_2 определяется количество примеси:

$$Q_2 = N_0 \sqrt{\pi D_2 t_2}. \quad (15)$$

Истинное количество примеси Q_1 , которое надо ввести, зависит от процесса перераспределения примеси между Si и пленкой SiO₂, выращенной на этапе разгонки:

$$Q_1 = \frac{Q_2}{m}, \quad (16)$$

где m – коэффициент сегрегации. Его значения приведены в таблице 3.

Требуемое количество примеси должно быть введено на этапе загонки:

$$Q_1 = 1,13 N_p \sqrt{D_1 t_1}. \quad (17)$$

Приравняв уравнения (16) и (17) для Q_1 , получаем выражение для времени загонки t_1 [9]:

$$t_1 = \frac{\pi N_0^2 x_p^2}{5,1 m^2 N_p^2 D_1 \ln \frac{N_0}{N_{исх}}}. \quad (18)$$

Подставляя температуру загонки T в пределах 800–1000 °С, рассчитываем D_1 и далее определяем время загонки t_1 . Необходимо заметить, что для того, чтобы не прибегать к жесткому технологическому контролю процесса, время загонки должно быть не менее 20 минут, для чего необходимо снижать температуру загонки.

12 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОДНОСТАДИЙНОЙ ДИФФУЗИИ

Исходное условие для одностадийной диффузии остается таким же, как и в предыдущем случае двухстадийной диффузии:

$$N_{\text{введ}}(x = x_{p-n}) = N_{\text{исх}}(x = x_{p-n}). \quad (19)$$

Распределение примеси при одностадийной диффузии (из неограниченного источника) подчиняется закону интеграла функции ошибок (4). Тогда

$$N_{\text{введ}}(x = x_{p-n}) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x_{p-n}}{2\sqrt{D_1 t_1}}, \quad (20)$$

где N_0 – заданная поверхностная концентрация примеси. Если задано поверхностное удельное сопротивление ρ_s , то N_0 определяется из соответствующих графиков для *erfc*-распределения.

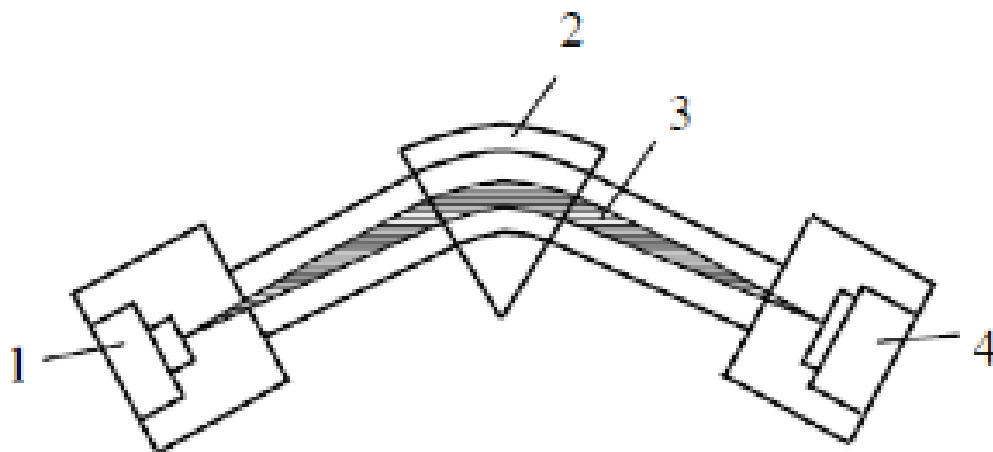
Отметим, что при высоких уровнях легирования, характерных для эмиттерных областей при формировании биполярного транзистора, а также областей истока и стока при изготовлении полевых транзисторов, коэффициент диффузии помимо температуры зависит и от концентрации. Это скажется на расчетах времени диффузии. В этом случае справедливо следующее эмпирическое выражение [9]:

$$D = 1,5D_0 \exp(-E_a / kT). \quad (21)$$

13 ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

В начале производства микросхем (например, в 1970-х годах) твердотельная диффузия была основным средством легирования полупроводников, но сегодня она редко используется для создания современных транзисторов. Это вызвано тем, что при экстремальных (очень высоких, более 1000 °С) температурах, необходимых для эффективной диффузии в твердом состоянии, становится практически невозможно контролировать местоположение и форму профиля легирования с точностью, необходимой для создания современных транзисторов. При необходимом условии контроля точности расположения транзисторов в 100 нанометров и менее это не представляется возможным. Решение этой важной проблемы заключается в использовании ионной имплантации вместо процессов диффузии [10].

Ионной имплантацией, или ионным легированием, называется процесс внедрения ионов в твердое тело с энергией, достаточной для проникновения в поверхностные слои. Ионное легирование широко используется при изготовлении современных СБИС и для модификации свойств функциональных материалов. Ионная имплантация осуществляется с помощью ионных ускорителей. Конструкция ионного ускорителя показана на рисунке 29.



1 – ионный источник; 2 – электромагнитный сепаратор;
3 – траектория ионов; 4 – подложка

Рисунок 29 – Конструкция ионного ускорителя

Основными конструктивными элементами ионного ускорителя являются собственно источник ионов и сепаратор их траекторий в зависимости от массы и скорости. Ионный источник служит для ионизации молекул примеси и формирования ионного пучка. Ионы из ионного источника извлекаются под действием ускоряющего потенциала U . В сепараторе ионы движутся в постоянном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости (см. рисунок 29). Сила Лоренца искривляет траектории движения ионов по радиусу R согласно уравнению

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad (22)$$

где m – масса иона; q – его заряд; v – скорость иона; B – индукция магнитного поля. Скорость иона запишется как

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что по радиусу R проходят только ионы примеси определенного сорта с фиксированным отношением m/q и постоянной энергией. Эти ионы, достигая подложки из кремния, внедряются (имплантируются) в нее благодаря своей высокой кинетической энергии. Типичные параметры установок ионной имплантации: энергии ионов – 50–300 килоэлектрон-вольт; дозы облучения (Q) – от 10^{13} до 10^{17} ионов/см². Таким образом, при определении режимов ионной имплантации различают два основных параметра: энергию ускоренных ионов и дозу облучения.

Ион с зарядом q под действием разности потенциалов U приобретает энергию:

$$E_0 = qU. \quad (24)$$

В общем случае заряд иона $q = ne$, где n – кратность ионизации ($n = 1, 2$ или 3); e – заряд электрона. Для обозначения кратности ионизации применяют знак «+» ($31P^+$, $31P^{++}$, $31P^{+++}$). Цифрой 31 обозначена атомная масса иона фосфора (P).

Иногда для имплантации используют не моноатомные ионы, а молекулярные. Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, обычно сразу же распадаются на отдельные атомы. Для подсчета энергии, которой будет обладать каждый атом с массой M_1 , входящий в ускоренный ион с молекулярной массой M_M , применяют следующее соотношение:

$$E_1 = E_0 \frac{M_1}{M_M}. \quad (25)$$

Приведем пример условного обозначения ионов молекул. N_2^+ – однократно ионизованная молекула азота с атомной массой 14 и молекулярным весом 28. BF_2^+ – ионизованная трехатомная молекула фторида бора.

Вернемся теперь к обсуждению такого важного параметра процесса имплантации, как доза облучения Q . Она определяется произведением плотности ионного тока j на длительность облучения t :

$$Q = j \times t. \quad (26)$$

Единицы измерения дозы облучения при ионной имплантации – кулон на метр квадратный (Кл/м²). Однако доза облучения не отражает в явном виде число примесных ионов, попавших в полупроводник. Для этого используется параметр, обозначающий количество частиц, внедренных на единицу поверхности:

$$Q_1 = \frac{Q}{q} = jt / en. \quad (27)$$

Величина Q_1 измеряется в ионах на метр квадратный (ион/м²).

При имплантации ионов в твердое тело различают следующие физические процессы.

При движении ионов в твердом теле они теряют свою энергию и изменяют направление движения в результате взаимодействия с кристаллической решеткой. Выделяют два типа взаимодействий с решеткой – упругие и неупругие столкновения. Упругими, или ядерными, столкновениями называются такие, при которых энергия иона передается атомам мишени. Они имеют дискретный характер и сопровождаются значительным рассеянием ионов. Неупругими, или электронными, называются столкновения, при которых энергия иона передается электронам. При этом величина переданной энергии относительно мала и торможение иона можно рассматривать как квазинепрерывный процесс. Следует отметить также, что вследствие существенной разницы масс иона и электрона неупругие потери не сопровождаются каким-либо существенным рассеянием первичных ионов. Именно в силу этого упругие потери энергии «тяжелых» ионов, масса которых больше массы атома мишени, приводят к сравнительно малым углам рассеяния. Это, в свою очередь, ведет к тому, что траектория их движения оказывается более прямолинейна, чем у легких ионов с массой, меньше чем масса атома мишени.

Далее, теряя свою энергию в атомных и электронных столкновениях, ионы естественно замедляются и, наконец, останавливаются внутри мишени. Этот процесс приводит к появлению так называемых внедренных в твердое тело ионов. Вследствие того, что число столкновений и энергия, передаваемая при столкновениях, являются переменными величинами, характеризующими случайный процесс, глубина проникновения ионов не будет одинаковой. Ионы с одинаковой энергией E_0 , массой M_1 , и атомным номером Z_1 падают на поверхность подложки и движутся каждый по индивидуальной траектории.

Путь, который проходят ионы вдоль оси X , называется полным пробегом R . Ионы после торможения останавливаются в точках, положение которых характеризуется проецированными на ось X пробегами R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} . Вследствие случайного характера столкновений пробеги ионов в твердом теле распределяются по статистическому закону Гаусса, который характеризуется средним проецированным на ось X пробегом $(\overline{R_p})$ и среднеквадратичным отклонением $\Delta\overline{R_p}$. На практике еще очень важен параметр ΔR_{\perp} – проекция пробегов на ось Y , которая ориентирована перпендикулярно оси пробегов X . В литературе проекция пробегов на ось Y называется боковым рассеянием. Схематически пробеги ионов в твердом теле показаны на рисунке 30.

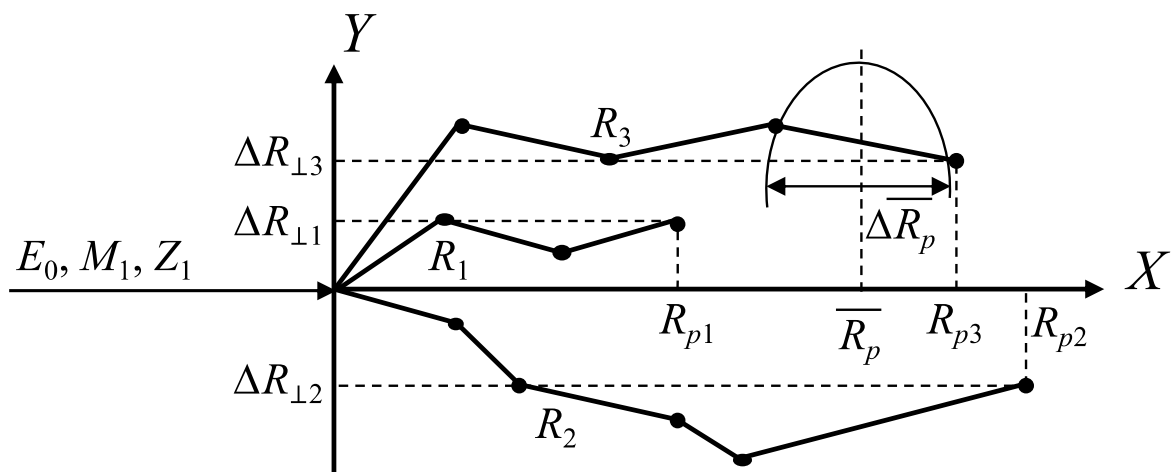


Рисунок 30 – Пробеги ионов в твердом теле

14 РАСЧЕТ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Основой расчетов пробегов ионов в твердых телах является теория Линдхарда – Шарфа – Шиотта (ЛШШ) [10]. В теорию заложены следующие предположения:

1) твердые тела, с которыми взаимодействуют ионы, являются однородными, изотропными и с неупорядоченным расположением атомов. В литературе это приближение называется приближением аморфной мишени;

2) упругие и неупругие взаимодействия происходят независимо друг от друга, т. Е. соблюдается принцип аддитивности;

3) в атомных столкновениях ионы теряют энергию, много меньшую начальной энергии иона. Это предположение позволяет применить статистический подход к расчету пробега ионов.

Согласно принципу аддитивности выражение для средней величины потерь энергии одного иона в твердом теле имеет вид

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_я + \left(\frac{dE}{dx}\right)_e = N_0(S_я + S_e), \quad (28)$$

где индексы «я» и «e» относятся соответственно к ядерным и электронным столкновениям, dE / dx – удельные потери энергии иона на отрезке пути от x до $x + dx$, N_0 – плотность атомов, $S_я$ и S_e – соответственно ядерные и электронные тормозные способности, которые можно записать как

$$S_я = \frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx}\right)_я, S_e = \frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx}\right)_e \quad [10]. \quad (29)$$

Физический смысл тормозных способностей $S_я$ и S_e заключается в том, что они определяют потери энергии иона в ядерных (атомных) и электронных столкновениях в твердом теле с единичной плотностью атомов при прохождении ионом отрезка пути длиной от x до $x + dx$.

Интегрируя уравнение (28), можно получить среднюю длину пути R иона до полной его остановки:

$$R = \frac{1}{N_0} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_я + S_e}. \quad (30)$$

Из уравнения (30) следует важный экспериментальный факт: чем больше потери энергии иона в атомных ($S_я$) и электронных (S_e) столкновениях, тем на меньшую глубину проникает внедренный ион. Величины $S_я$ и S_e зависят от энергии иона, атомного номера Z_1 и массы M_1 иона, а также от атомного номера Z_2 и массы M_2 атома мишени. В силу этого вычисления средней длины пути иона до полной его остановки проводят для каждой комбинации ион – мишень отдельно.

Теория Линдхарда – Шарфа – Шиотта упростила задачу вычисления пути до полной остановки R , введя безразмерные (нормированные) значения энергии ϵ и пробега ρ :

$$\varepsilon = \frac{\alpha M_2 E_0}{Z_1 Z_2 e^2 (M_1 + M_2)} = F \times E_0, \quad (31)$$

где $\alpha = 0,885\alpha_0 \left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)^{-1/2}$ – параметр экранирования (α_0 – радиус борвской орбиты, который равен $0,529 \times 10^{-10}$ м).

Нормированное значение пробега в теории ЛШШ выражается как

$$\rho = 4\pi\alpha^2 N_0 R \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} = L \times R. \quad (32)$$

Коэффициенты F и L в уравнениях (31) и (32) представляют собой нормированные множители энергии и пробега. Отсюда выражения для ядерной и электронной тормозных способностей приобретают универсальный характер:

$$S_{\text{я}}^{\text{H}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{я}}, \quad S_{\text{e}}^{\text{H}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{e}}. \quad (33)$$

После проведенных преобразований уравнение (28) примет вид

$$\frac{d\varepsilon}{d\rho} = S_{\text{я}}^{\text{H}} + S_{\text{e}}^{\text{H}}. \quad (34)$$

Заметное преимущество введения безразмерных параметров энергии ε и пробега ρ состоит в том, что зависимость $S_{\text{я}}^{\text{H}}$ или $(d\varepsilon / d\rho)_{\text{я}}$ от $\varepsilon^{1/2}$ является универсальной. Это проявляется в том, что она теперь применима для любых пар ион – атом. Эта зависимость приведена на рисунке 31. Видно, что ядерное торможение при малых энергиях иона возрастает, достигая максимального значения при $\varepsilon_1 = 0,35$, а затем медленно спадает с ростом энергии, т. К. быстрые частицы имеют меньшее время взаимодействия с центром рассеяния, т. Е. поперечное сечение для них уменьшается. Ядерная тормозная способность $S_{\text{я}}^{\text{H}0}$ равна 0,327 и является своеобразным средним значением для $S_{\text{я}}^{\text{H}}(\varepsilon^{1/2})$.

Для ядерной тормозной способности применима простая аналитическая аппроксимация вида

$$S_{\text{я}}^{\text{H}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{я}} = A \frac{\varepsilon^{1/2}}{B + \varepsilon}, \quad (35)$$

где эмпирические коэффициенты $A = 0,45$ и $B = 0,30$.

Переход от нормированной величины ядерной тормозной способности к размерному ее значению осуществляется с помощью соотношения

$$\left(\frac{dE}{dR} \right)_{\text{я}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{я}} \frac{E}{\varepsilon} \times \frac{\rho}{R}. \quad (36)$$

Что касается электронной тормозной способности, то она оценивается исходя из следующих соображений. Падающий ион теряет свою энергию как при столкновениях с электронами, так и на возбуждение электронного газа в объеме, удаленном от траектории иона. При скоростях, меньших, чем скорость Ферми,

величина S_e^H пропорциональна скорости иона, или корню квадратному из его энергии [10]:

$$S_e^H = k\varepsilon^{1/2}, \quad (37)$$

где

$$k = Z_1^{1/6} 0,0793 \frac{Z_1^{1/2} \times Z_2^{1/2} (M_1 + M_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} \times M_1^{3/2} \times M_2^{1/2}}.$$

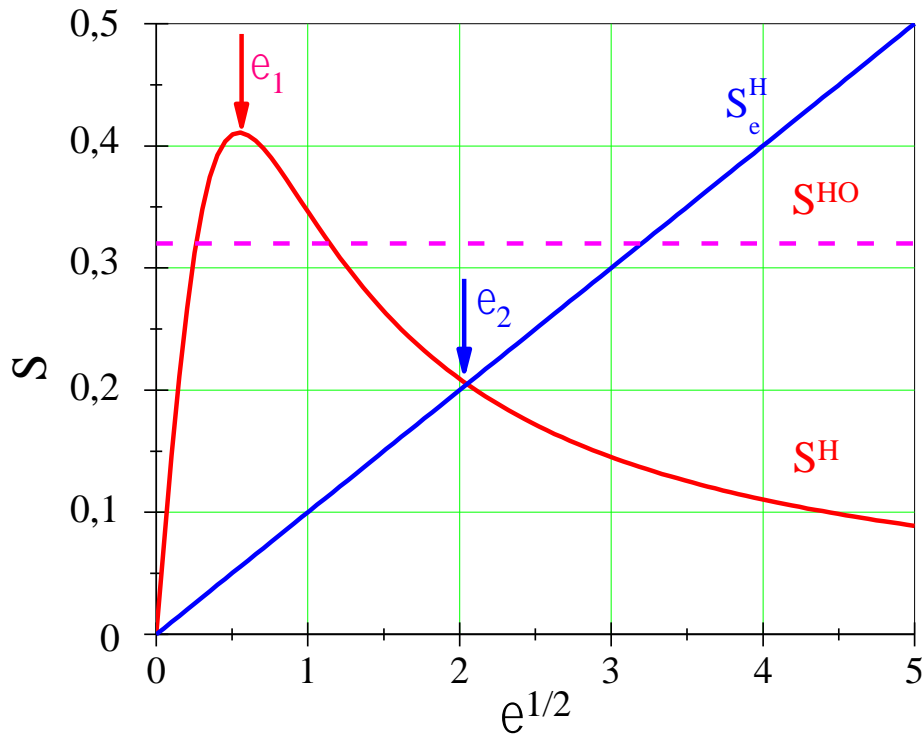


Рисунок 31 – Зависимости тормозных способностей от энергии

В результате электронное торможение можно представить не одной кривой, а семейством прямых, выходящих из начала координат. Угол наклона определяется константой k . Для ионов, представляющих практический интерес, $0,1 < k < 0,3$. Это в первую очередь относится к тяжелым ионам, для которых справедливо неравенство $Z_1 > Z_2$. Если же $Z_1 < Z_2$, то тогда $k > 1$. Набор зависимостей тормозной электронной способности от приведенной энергии для разных значений константы k показан на рисунке 32.

Переход от нормированной величины S_e^H к размерному значению осуществляется с помощью соотношения

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e \frac{E}{\varepsilon} \times \frac{\rho}{R}. \quad (38)$$

Расчеты пробегов с учетом обоих факторов выполняются в соответствии с уравнением

$$d\rho = \frac{d\varepsilon}{S_{\text{я}}^{\text{H}} + S_{\text{е}}^{\text{H}}} = \frac{d\varepsilon}{\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_{\text{я}} + \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_{\text{е}}} = \frac{d\varepsilon}{A\varepsilon^{\frac{1}{2}}/(B + \varepsilon) + k\varepsilon^{1/2}}. \quad (39)$$

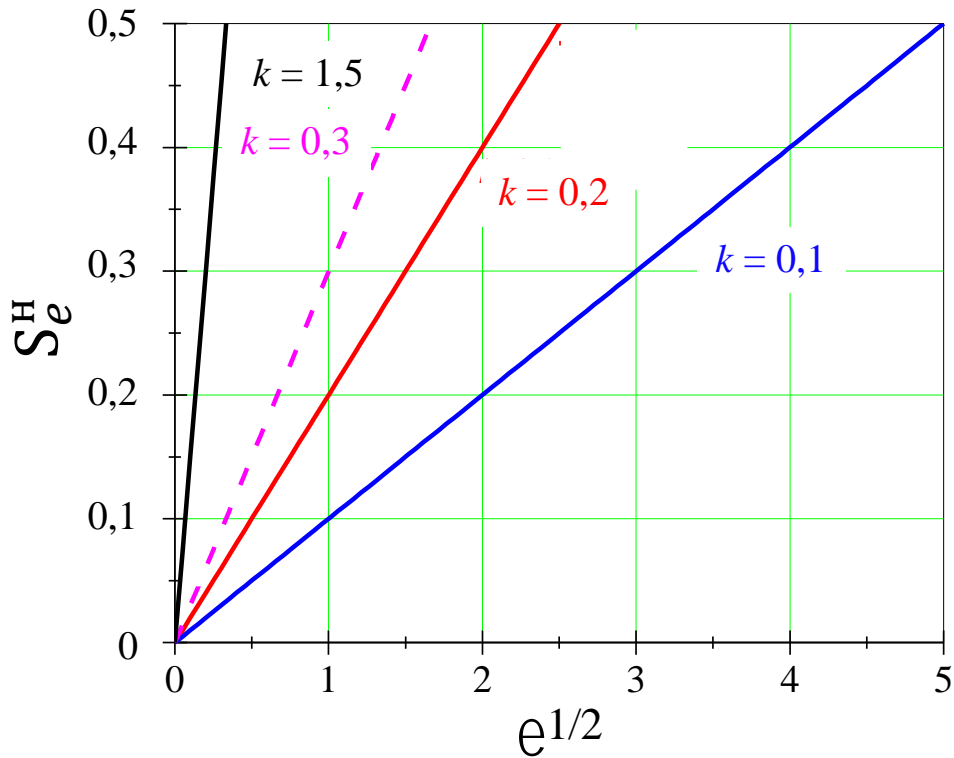


Рисунок 32 – Зависимости тормозной электронной способности от энергии

Проинтегрировав уравнение (39), получим

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} - \frac{2A}{k^2(A \times k^{-1} + B)^{1/2}} \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\varepsilon^{1/2}}{(A \times k^{-1} + B)^{1/2}} \right\}, \quad (40)$$

где аргумент арктангенса подставляется в радианах. Средний полный пробег тогда будет равен

$$R = \frac{\rho}{L}. \quad (41)$$

Если провести сравнительный анализ влияния ядерных и электронных процессов на ионную имплантацию (см. рисунок 31), то следует отметить три основных фактора:

- при малых энергиях иона $\varepsilon < \varepsilon_1$ доминируют потери на ядерное торможение;
- при $\varepsilon \approx \varepsilon_2$ потери энергии на ядерное и электронное столкновения сравнимы;
- при энергиях $\varepsilon > \varepsilon_2$ доминирует электронное торможение ионов.

15 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕДРЕННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ПРИМЕСИ ПО ГЛУБИНЕ

В результате торможения ионов в материале мишени они останавливаются на определенных глубинах, изменяя первоначальные свойства вещества. В полупроводниковой технологии ионная имплантация обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с термическим диффузионным методом введения примесей. Внедряя ионы III (B, Al, Ga, In) и V (P, As, Sb) групп в монокристалл Si, можно получить *p-n*- и *n-p*-переходы в любом месте на любой площади с точностью, намного превышающей точность диффузионного метода. С этой целью вначале на кремниевой пластине формируется защитная маска с помощью процесса фотолитографии, после чего осуществляется локальная имплантация примесей в полупроводник. Этот процесс схематически показан на рисунке 33, на котором изображен пример ионной имплантации фосфора в кремний *p*-типа. В качестве маски обычно используются слои SiO₂ с толщиной, большей чем пробег ионов в диоксиде кремния. Профиль распределения примеси в этом случае указан в правой части рисунка 33.

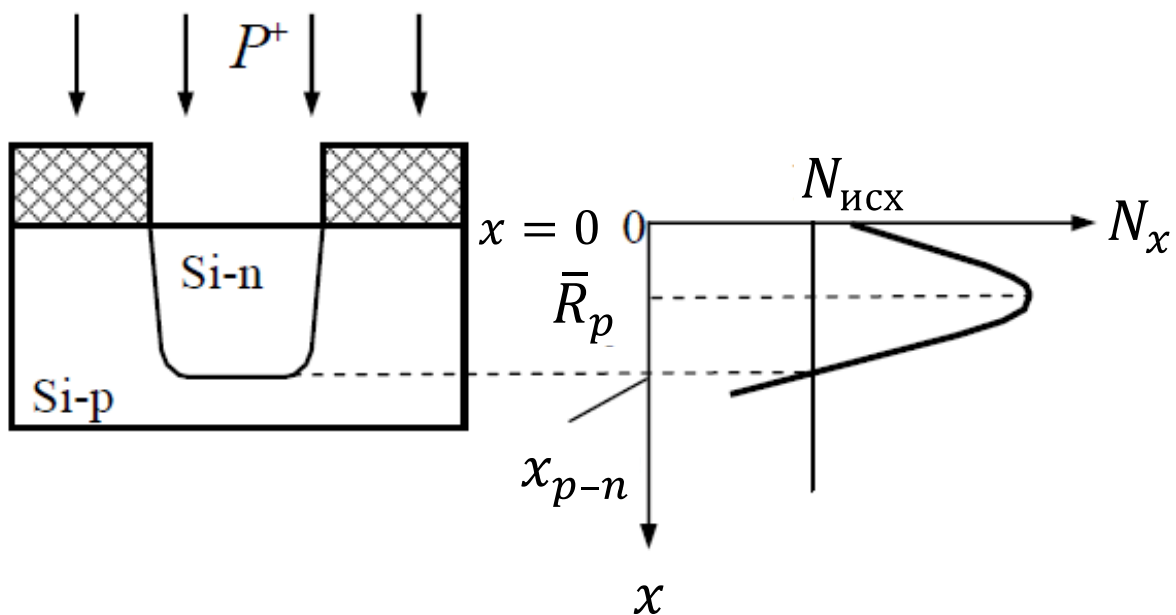


Рисунок 33 – Схематическое изображение имплантации P в *p*-Si

Профиль распределения при ионной имплантации рассчитывается исходя из следующих соображений. Для аморфных веществ распределение пробегов ионов приблизительно описывается законом Гаусса. Поэтому оно может быть охарактеризовано среднеквадратичным отклонением

$$\Delta \bar{R}_p^2 = \bar{R}_p^2 / 2\pi. \quad (42)$$

Зная величины \bar{R}_p и $\Delta \bar{R}_p$, распределение внедренной примеси по глубине $N(x)$ можно записать как

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta\bar{R}_\rho}} \times e^{-\frac{(x-\bar{R}_\rho)^2}{2\Delta\bar{R}_\rho^2}}, \quad (43)$$

где x – расстояние от поверхности вглубь полупроводника в направлении падения ионов.

Максимальная концентрация внедренной примеси выражается как

$$N_{\max} = \frac{Q}{(\sqrt{2\pi\Delta\bar{R}_\rho})} \quad (44)$$

и располагается на глубине \bar{R}_ρ (см. рисунок 33). Следует отметить, что концентрация примеси спадает с глубиной и уменьшается в 2, 10 и 100 раз по отношению к N_{\max} на глубинах:

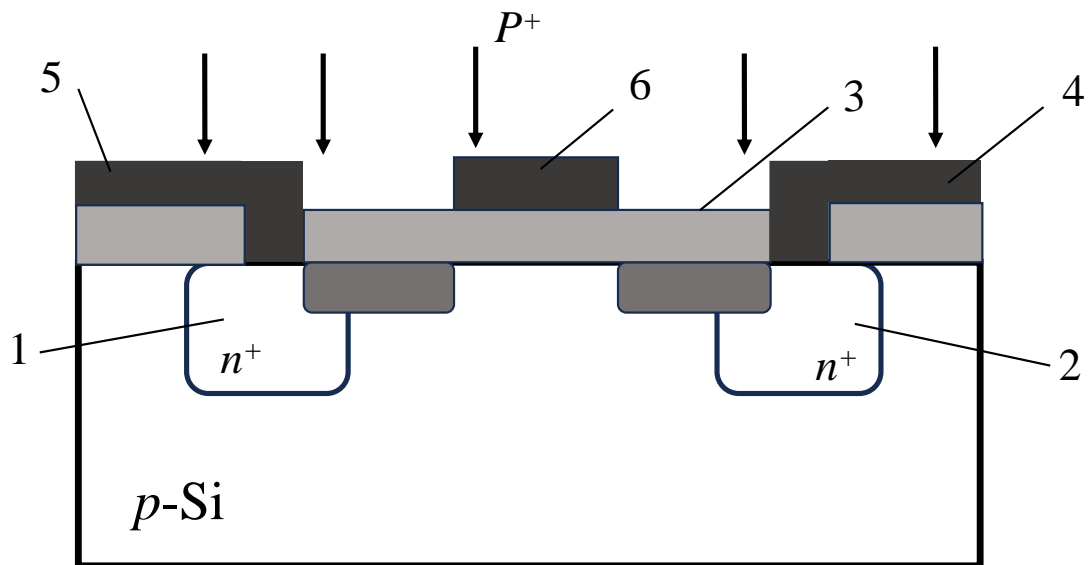
$$x_2 = \bar{R}_\rho \pm 1,2\Delta\bar{R}_\rho, \quad x_{10} = \bar{R}_\rho \pm 2\Delta\bar{R}_\rho, \quad x_{100} = \bar{R}_\rho \pm 3\Delta\bar{R}_\rho. \quad (45)$$

Глубина залегания p - n -перехода определяется из уравнения (43) для концентрации $N(x)$, равной исходной $N_{\text{исх}}$ в той области полупроводника, куда ведется имплантация. Решая его, получаем

$$x_{p-n} = \bar{R}_\rho \pm \Delta\bar{R}_\rho \times \sqrt{2 \ln \left\{ \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta\bar{R}_\rho} \times N_{\text{исх}}} \right\}}. \quad (46)$$

Одно из первых практических применений технологии ионной имплантации связано с формированием МОП-транзистора. Транзистор на основе структуры металл – оксид – полупроводник (МОП) является одним из наиболее широко используемых элементов СБИС. Первый транзистор, управляемый электрическим полем, был продемонстрирован в 1960 году. Сначала полевые транзисторы с двуокисью кремния в качестве подзатворного диэлектрика формировались на подложке n -типа проводимости. Затем из-за большей подвижности электронов, чем у дырок, при формировании сверхбольших быстродействующих интегральных схем стали использовать n -канальные транзисторы, формируемые на подложке p -типа. Структура МОП-транзистора приведена на рисунке 34.

Отметим, что области истока и стока обычно формируются диффузией. После окисления кремния и получения диэлектрического слоя, проведения операции фотолитографии, вскрывается окно для выращивания подзатворного диэлектрика. Затем проводится фотолитография и вскрываются окна под контакты к областям истока и стока. Осадив вакуумным методом слой металла (алюминия) и выполнив фотолитографию, создаются электроды стока, истока и затвор. Следующим этапом является создание самосогласованного затвора путем имплантации фосфора. Затвор играет роль маски, которая обеспечивает его самосовмещение, необходимое для точного примыкания области затвора к контактам истока и стока. В результате самосовмещения снижается паразитная емкость между затвором и стоком, что улучшает характеристики транзистора.



1 – область истока; 2 – область стока; 3 – подзатворный диэлектрик;
4–5 – электроды; 6 – затвор

Рисунок 34 – Структура МОП-транзистора

В заключение этого раздела сформулируем основные области направления ионного легирования в производстве СБИС:

- введение легирующих примесей;
- получение различных профилей материалов в полупроводнике;
- синтез материалов с новыми свойствами.

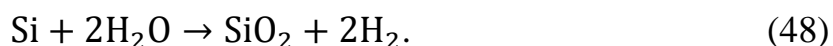
16 ОКИСЛЕНИЕ И ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК

Как было продемонстрировано в предыдущем разделе, в дополнение к точному введению легирующих добавок в полупроводник существует необходимость иметь возможность добавлять новые слои материалов. Эти добавленные слои поверх основного кристалла могут играть активную роль (например, оксид затвора в транзисторе, см. рисунок 34) или действовать как барьер для ионной имплантации или диффузии. Последнее необходимо для того, чтобы точно контролировать то место, куда попадают легирующие добавки. В настоящее время в технологии производства СБИС применяются два основных способа нанесения новых слоев: термическое окисление самого кристалла и нанесение пленки различными химическими способами. Кремний легко окисляется с образованием одного из самых совершенных диэлектриков в природе – диоксида кремния (SiO_2). Этот факт, помимо многих других преимуществ кремния, является его весьма важным свойством, способствующим тотальному доминированию в технологии СБИС.

Окисление кремния проходит согласно следующей химической реакции:



Диоксид кремния, полученным подобным образом, обычно в литературе называют «сухим» оксидом. Температура реакции при этом достаточно высока и составляет порядка 900 градусов Цельсия, чтобы обеспечить достаточно быстрое и одновременно с этим контролируемое окисление. Тем не менее, если просто оставить чистую кремниевую пластину при комнатной температуре на длительное время (несколько дней), на поверхности кремния сформируется естественный оксид толщиной порядка 1–2 нанометров. Для увеличения скорости реакции окисления кремния его можно подвергнуть воздействию нагретого водяного пара, в результате чего образуется так называемый «влажный» оксид. В этом случае окисление происходит согласно следующей реакции:



На практике «сухие» оксиды обычно обеспечивают наилучшее качество (например, более высокую прочность на разрыв), в то время как «влажные» оксиды быстро загрязняются. При использовании «сухих» оксидов минимизируется количество дефектов на границе роста между SiO_2 и кристаллом кремния (так называемых адгезионных связей), которые могут отрицательно повлиять на свойства транзистора или долгосрочную надежность. Для того чтобы оптимизировать время, необходимое для выращивания оксида, в современной технологии СБИС обычно начинают с «сухого» окисления, чтобы создать бездефектную границу роста, затем переключаются на «влажное» окисление, чтобы быстро получить необходимую толщину оксида, а затем в конце снова переключаются на процесс «сухого» окисления, чтобы сделать верхнюю поверхность оксида бездефектной.

Процесс «сухого» окисления показан на рисунке 35. В этом случае кремний фактически уходит на производство оксида, и, таким образом, полупроводниковая пластина расходуется эффективно. Конечный слой оксида будет находиться примерно на 55 % выше исходной поверхности кремния, а поверхность кристалла кремния будет в свою очередь располагаться приблизительно на 45 % ниже того места, где она была до начала процесса окисления. Следует отметить, что подобный процесс не всегда оптимален, особенно при создании довольно толстых оксидных слоев толщиной более нескольких сотен нанометров.

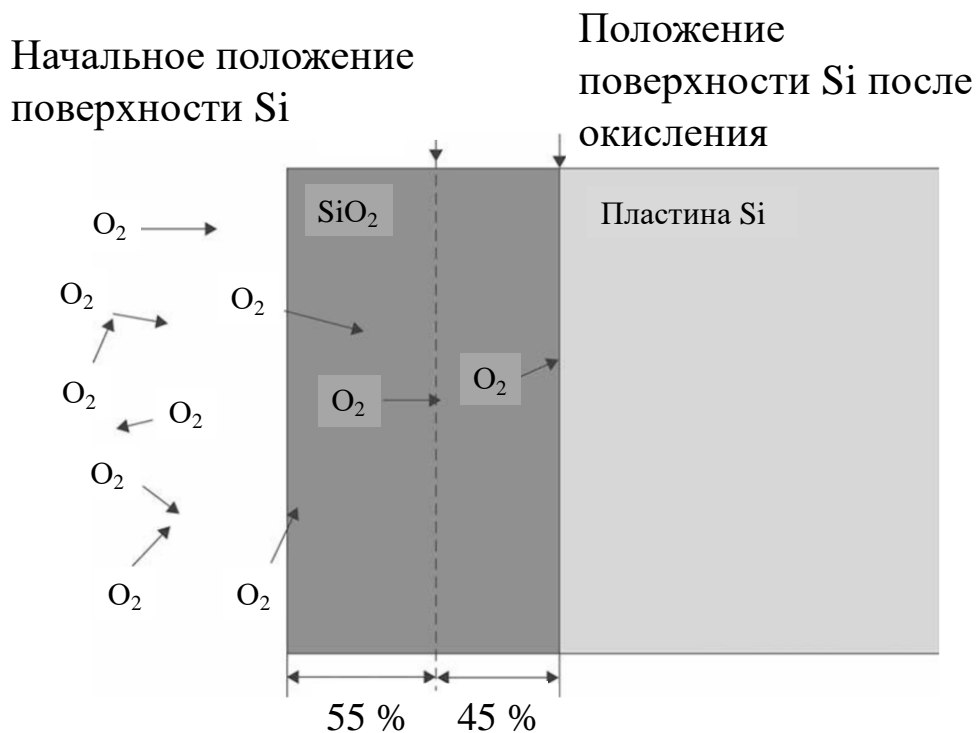
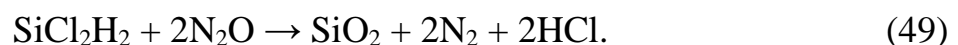


Рисунок 35 – Процесс термического окисления Si

Для получения толстых оксидов толщиной до микрона или даже других материалов используются процессы химического осаждения материалов на поверхность полупроводниковой пластины. В подавляющем большинстве случаев это достигается с помощью процесса химического осаждения из газовой фазы – химического парофазного осаждения (ХПО). Такие системы часто работают при пониженном (ниже атмосферного) давлении и поэтому известны как инструменты ХПО низкого давления (НДХПО). Концепция НДХПО заключается в помещении пластин в контролируемо нагретую печь, в которую контролируемо подается поток соответствующих газов (химических паров), необходимых для создания пленки.

Одним из способов осаждения оксида является использование дихлоросилана при температуре около 900 градусов Цельсия. Химическая реакция при этом записывается как



В качестве побочного продукта реакции (49) производится соляная кислота. В микроэлектронике для получения диоксида кремния используется также тетраэтилортосиликат:



Хотя оксиды, полученные методом НДХПО, как правило, уступают по своим электрическим свойствам (напряжение пробоя, тангенс угла диэлектрических потерь) термическим оксидам, их можно легко и быстро наносить на любой сложный рельеф. Это означает, что они могут осаждаться как на горизонтальных, так и на вертикальных поверхностях с одинаковой скоростью и, таким образом, покрывать ступени на поверхности кристалла и заполнять полости на поверхности, что является важной отличительной чертой этого процесса.

Если имеется необходимость нанести поликристаллический кремний (поликремний) на пластину, то это также можно реализовать с помощью НДХПО, используя силан (SiH_4). Химическая реакция протекает согласно уравнению



Следует отметить, однако, что силан чрезвычайно взрывоопасен и токсичен. Емкости с силаном обычно помещают вдали от технологических зданий. Используются чувствительные газовые детекторы и серьезные меры безопасности при обращении с силаном. Тем не менее силан применяется при производстве СБИС, поскольку поликремний очень часто используется в том случае, когда не требуется идеальный монокристалл кремния, но все же по условиям технологического процесса необходимо наличие слоя легированного кремния, который служил бы хорошим проводником. Кроме того, поликремний можно нанести непосредственно на оксид, например для того, чтобы электрически изолировать его от кристалла кремния.

Отметим также, что альтернативным оксиду диэлектриком является нитрид кремния (Si_3N_4), который осаждается с помощью НДХПО при использовании смеси силана с аммиаком (NH_3):



Нитрид кремния не является таким хорошим изолятором, как оксид кремния, но, что важно, обладает совершенно иными свойствами при травлении, и поэтому часто используется в процессе изготовления СБИС в качестве селективного диэлектрика относительно диоксида кремния.

17 ТРАВЛЕНИЕ И ПОЛИРОВКА

С помощью процессов травления осуществляется избирательное удаление либо ранее нанесенных на пластину материалов, либо самого кристаллического слоя. Травление является незаменимым процессом избирательного формирования рисунка (топологии) СБИС.

Существуют два основных способа травления осажденных материалов: влажное травление, т. е. использование ванны с каким-либо жидким травителем для удаления рассматриваемого материала, и травление методом распыления с использованием реактивной плазмы для удаления рассматриваемого материала.

Базовый процесс химического травления – относительно простой процесс. Он состоит из нескольких этапов:

- подготовка чистого травителя (кислотного или щелочного);
- помещение в емкость с травителем пластины с предварительно нанесенным на ее поверхность материалом;
- непосредственно процесс травления материала в течение времени t ;
- промывка пластины в нейтральном растворе для остановки процесса травления.

Очень важно в процессе химического травления осуществлять контроль количества стравливаемого материала. Например, распространенным травителем для оксида кремния является плавиковая кислота (HF). Ее отличительной способностью является то, что она воздействует исключительно на оксид кремния, не стравливая при этом непосредственно сам кремний. Следовательно, если опустить кремниевую пластину с нанесенным сверху оксидом в емкость с плавиковой кислотой, оксид будет травиться до тех пор, пока не достигнет кремния. После этого процесс травления остановится, независимо от того, как долго кремниевая пластина остается в ванне с плавиковой кислотой. В этом случае говорят, что плавиковая кислота обладает хорошей селективностью травления по отношению к кремнию (т. е. не травит его). Если поверх оксида дополнительно нанести защитный слой определенной формы (маску), который не травится в HF (например, органический фоторезист), тогда можно использовать травление в плавиковой кислоте для переноса рисунка на поверхность пластины. Это означает, что HF вытравливает оксид вплоть до кремния везде, кроме тех мест, где нанесена защитная маска.

Если же, наоборот, имеется необходимость протравить кремний (или поликремний), то можно использовать гидроксид калия (KOH), который обладает хорошей селективностью как к оксиду, так и к нитриду кремния, при этом скорость травления кремния составляет приблизительно 2 микрометра в минуту. В этом случае в качестве ограничителя травления используют оксидный слой под слоем поликремния. Следует отметить, что отличительной особенностью гидроксида калия является то, что он воздействует на разные кристаллографические направления кремния с разной скоростью травления. Например, коэффи-

коэффициент дифференциального травления для направлений $\langle 100 \rangle : \langle 111 \rangle$ может достигать 400:1. Это означает, что если вскрыть окно в оксидном ограничителе для травления на поверхности кремниевой пластины и просто подвергнуть пластину воздействию КОН, то можно легко вытравить глубокие V-образные углубления в самом кремнии. Если вместо этого использовать более широкий шаблон прямоугольной формы, можно контролировать глубину травления независимо от времени, создавая самоограничивающееся глубокое травление. Подобные методы травления с самоограничением составляют основу так называемых микрообработывающих устройств, используемых в технологии MEMS/NEMS.

Тем не менее химическое травление в современной технологии производства СБИС используется гораздо реже, чем сухое. В первую очередь это связано с необходимостью получения точного желаемого профиля травления. Как показано в таблице 4, химическое травление обычно имеет изотропный профиль (т. е. травление одинаково во всех направлениях), тогда как сухое травление может быть легко адаптировано для создания ряда необходимых профилей, от изотропного до анизотропного (травление только в одном направлении) для травления узких, но глубоких отверстий в различных материалах.

Анизотропное травление становится особенно важным по мере того, как размеры элементов, подлежащих травлению, становятся все более и более мелкими, а элементы ИМС становятся все более плотно упакованными. Это вызвано тем, что химическое травление имеет тенденцию подрезать маску травления, размывая рельеф и ограничивая минимальную дистанцию, на которой могут располагаться участки пластины, подвергаемые травлению. Это существенно ограничивает возможность снижения размера транзисторов и, следовательно, количество транзисторов на чипе.

Таблица 4 – Боковые профили при химическом и сухом травлении кремния

| Тип травления | Боковой профиль | Визуализация профиля |
|---------------|-------------------------------|---|
| Химическое | Изотропный |  |
| Сухое | Изотропный |  |
| | Анизотропный |  |
| | Анизотропный (конусообразный) |  |
| | Траншееобразный |  |

Сухое травление осуществляется, как правило, посредством помещения пластины в реактивную плазму. Плазма – это, по сути, газ, к которому была приложена энергия в той или иной форме (обычно электрическая), удаляющая валентные электроны из молекул и таким образом создающая ионизированный газ (буквально: газ ионов). Если правильно выбрать исходный газ для ионизации, то результирующая плазма может быть очень химически активной – т. е. являться отличным травителем.

В типичной системе плазменного травления в камеру вводится соответствующий газ, который затем ионизируется с помощью источника мощности на частоте 13,56 мегагерц. Затем энергетические ионы плазмы бомбардируют соответствующим образом защищенную маской для травления поверхность в тех областях, которые не должны быть подвергнуты травлению. Ионы связываются с атомами мишени, подлежащими травлению, и откачиваются из камеры вакуумным насосом. Схематически этот процесс показан на рисунке 36. Поскольку к плазме прикладывается постоянное электрическое поле, которое воздействует на движение ионов как заряженных частиц, создаются предпосылки для управляемого процесса направленного травления в плазме, что позволяет получать профили травления с очень высокой степенью анизотропии. Такую систему плазменного травления часто называют инструментом для реактивного ионного травления (РИТ). Типичные газы для РИТ включают гексафторид серы (SF_6) и кислород (O_2) для органических пленок, тетрахлорметан (CCl_4) и тетрафторметан (CF_4) для поликремния, гексафторэтан (C_2F_6) и трифторметан (CHF_3) для оксидов. Более сложные инструменты РИТ, используемые для травления очень глубоких (более 100 микрон) траншей с высоким соотношением сторон (глубоких, но узких), включают инструменты с индуктивно связанной плазмой. Подобные системы применяются для создания микросхем MEMS/NEMS.

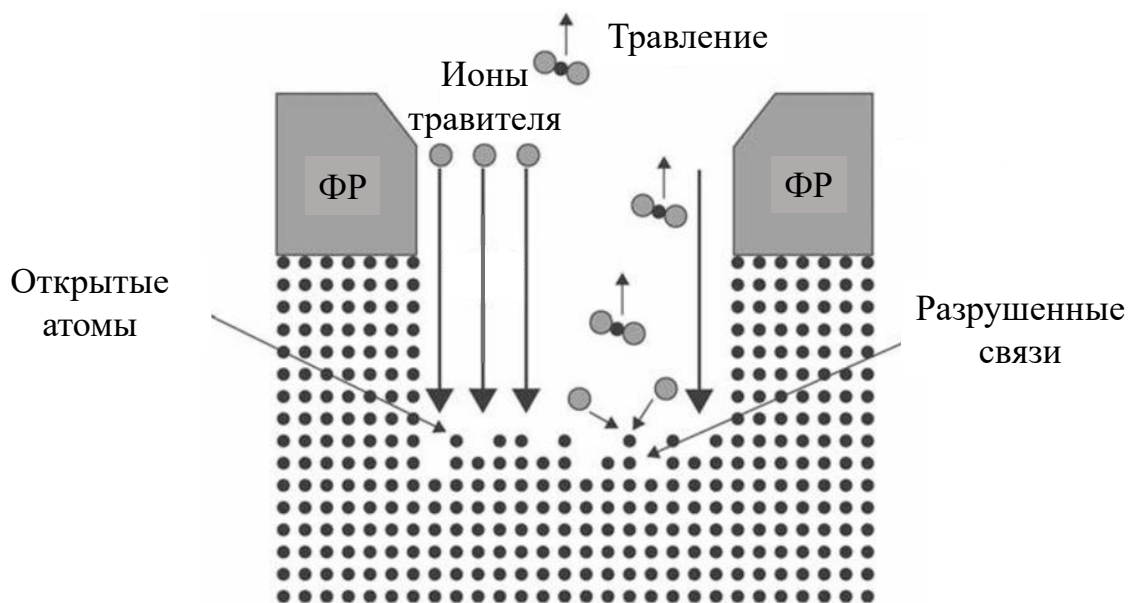


Рисунок 36 – Схематическое изображение процесса сухого плазменного травления

Помимо вышеназванных методов в современной технологии СБИС широко используется метод травления, представляющий собой комбинацию как химического травления, так и механического стирания. Подобный метод называется химико-механической полировкой (ХМП). Он появился в 1990-е годы и в настоящее время широко используется в современном производстве СБИС. Необходимость его применения вызвана тем, что, по мере того как наращивается множество уровней металл – диэлектрик – металл – диэлектрик, необходимых для создания современных микросхем (это может быть 8–14 уровней), наносится много дополнительных новых слоев. Если исходная поверхность для этого процесса не идеально ровная, эти неровности оказывают заметное влияние на плотность металлических слоев, которые размещаются поверх данного слоя. Возникает необходимость выравнивания поверхности всей 300- или 450-миллиметровой пластины, не повредив при этом конструкций, которые уже сформированы в нижележащих слоях. Ни химическое, ни сухое травление не в состоянии выполнить эту задачу планаризации. Ее может решить исключительно процесс ХМП. При этом в качестве травителя, или абразива, используется химический растворитель, пластина переворачивается, медленно вращается, в то время как давление с обратной стороны прижимает пластину к абразиву, чтобы эффективно стереть рельеф поверхности. В этом смысле процесс напоминает шлифование и полировку оптических линз. Скорость удаления материала, как правило, низкая, составляет порядка 100 нанометров в минуту, и ее можно точно регулировать путем изменения расхода суспензии и химического рН, приложенного давления, скорости вращения и температуры. ХМП также используется для полировки рабочей поверхности кремниевых пластин для достижения атомно гладкой плоскостности, необходимой на начальных стадиях производства СБИС.

18 ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Важной операцией на всех этапах производства СБИС является процесс переноса рисунка с маски на пластину, о котором уже упоминалось выше. Этот процесс называется фотолитографией (ФЛ). Производство современной СБИС может потребовать до 40 различных этапов ФЛ. Учитывая масштаб, связанный, скажем, с созданием микропроцессора, который может потребовать формирования 500 000 000 прямоугольников со стороной 32 нанометра на одной микросхеме за один этап литографии, очевидно, что этот процесс является наиболее деликатным и, следовательно, дорогостоящим этапом, используемым в производстве полупроводниковых интегральных схем сверхбольшой степени интеграции. Как результат, классификация микроэлектронных предприятий в настоящее время происходит по их технологическим возможностям: 7-нанометровая технология, 32-нанометровая технология, 180-нанометровая технология и т. д.

Для изготовления микросхемы на пластину должны быть нанесены тонкие пленки (толщиной в доли микрона) из различных материалов, которые будут действовать как ограничители травления, барьеры для ионной имплантации или диффузии, проводники, изоляторы между проводниками и т. д. Эти пленки, как правило, должны иметь определенную форму на пластине, или в них должны быть вытравлены отверстия (окошки), чтобы либо пропускать легирующие примеси, либо создавать электрический контакт между двумя разными слоями. Подобная многоуровневая сложная топология вначале разрабатывается на компьютере с помощью специального программного обеспечения, потом переносится на фотолитографическую маску, а затем уже на поверхность пластины. ФЛ фактически использует процесс фотогравировки, очень похожий на тот, который используется в обычной пленочной фотографии. Рисунок маски сначала переносится с маски на светочувствительный органический материал, называемый фоторезистом, а затем используется сухое или химическое травление для переноса окончательного рисунка с резиста на пленку.

Каждый этап ФЛ (последовательность переноса рисунка) сам по себе состоит из ряда отдельных этапов обработки, показанных на рисунке 37. Рассмотрим пример формирования прямоугольника в слое поликремния.

Перечислим основные этапы фотолитографического процесса:

- 1) нанесение слоя поликремния с помощью НДХПО по всей поверхности пластины кремния;
- 2) нанесение фоторезиста (ФР) на всю поверхность пластины;
- 3) центрифугирование для равномерного распределения слоя ФР по всей поверхности пластины. Скорость вращения составляет порядка 1000–5000 оборотов в минуту. Толщина резиста достигает нескольких микрон;
- 4) отжиг ФР при низкой температуре, порядка 80 °С;
- 5) установка фотошаблона;
- 6) выравнивание фотошаблона относительно пластины с использованием специальных предварительно нанесенных меток совмещения;

7) облучение пластины ультрафиолетовым излучением. Там, где фотошаблон прозрачен, ФР будет подвергаться воздействию света, химически изменяя свою полимерную структуру;

8) удаление фотошаблона;

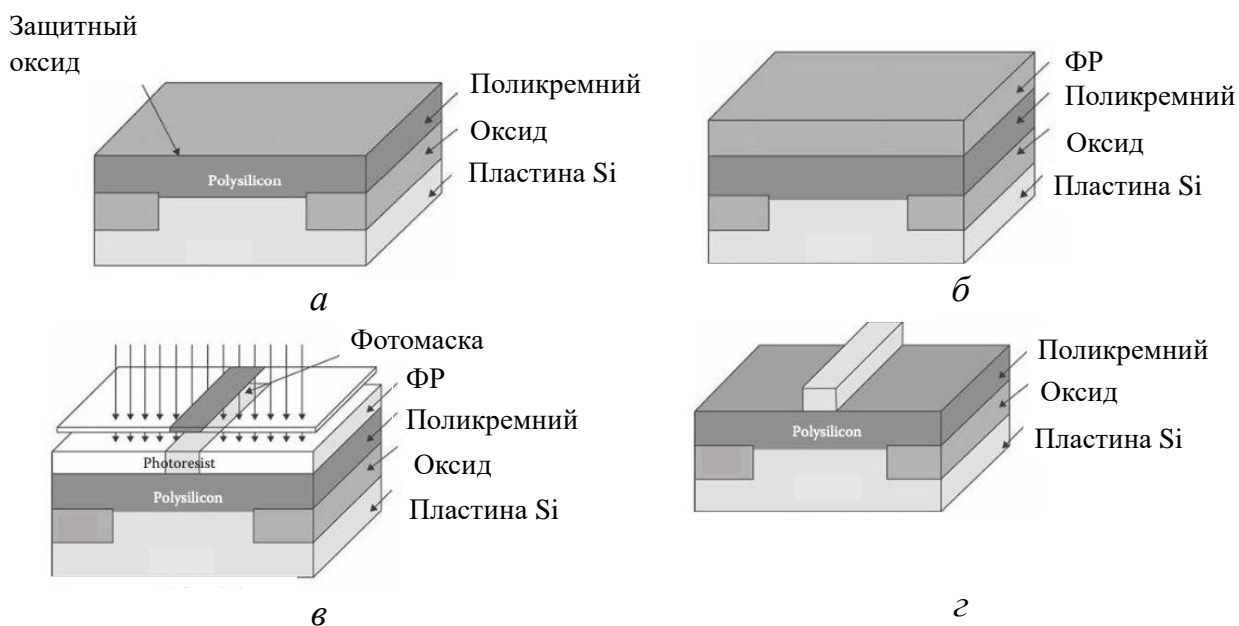
9) отжиг фоторезиста;

10) проявление фоторезиста. При этом весь ФР, подвергшийся воздействию ультрафиолетового света, удаляется;

11) обработка ФР при температуре 150 °С для повышения стойкости к плазменному травлению;

12) контроль сформированного рисунка в ФР с помощью микроскопа. В случае обнаружения дефектов в рисунке ФР удаляется и все операции проводятся заново.

Таким образом, требуется двенадцать шагов для того, чтобы перенести изображение с маски на резист. После того как предполагаемый рисунок надежно и контролируемо перенесен на ФР, пластина подвергается плазменному травлению для того, чтобы удалить материал везде, кроме как под ФР. После этого используется влажное травление (или сухое плазменное) для удаления ФР. На завершающем этапе проводится визуальный контроль получившегося рисунка СБИС под микроскопом.



а – исходная пластина; *б* – нанесение фоторезиста;

в – нанесение шаблона и засветка; *г* – полученная топология

Рисунок 36 – Схематическое представление процесса фотолитографии

Кратко остановимся на вопросе, почему при засветке фоторезиста используется именно ультрафиолетовое излучение. Для того чтобы засветить в ФР объект площадью 1 квадратный микромметр, лучше использовать свет с длиной волны намного меньше микромметра, т. е. меньше длины волны видимого света,

которая лежит в диапазоне 0,4–0,7 микрон. В противном случае у изображения будут нечеткие, размытые края. Типичным источником света в современной оптической системе фотолитографии является эксимерный лазер KrF, который может генерировать чистый и интенсивный глубокий ультрафиолет с длиной волны 193 нанометра.

Для формирования рисунка с точностью до 10 нанометров необходимо перейти к гораздо более коротким длинам волн. В этом случае наиболее распространенным выбором является использование электронно-лучевой литографии. В электронной литографии шаблон как таковой не всегда требуется, что может показаться огромным преимуществом в стоимости по сравнению с оптической литографией. Однако вследствие того, что время записи изображения с помощью электронного луча намного больше, чем для оптических систем, создается узкое место в пропускной способности технологического процесса. Электронный луч должен буквально проследить каждую деталь при создании рисунка, тогда как в оптической системе вся матрица экспонируется за один раз. Тем не менее электронная литография является незаменимым инструментом для изготовления наноразмерных изделий.

Список использованных источников

1. Dizard, W. P. The Coming Information Age: an Overview of Technology, Economics, and Politics / W. P. Dizard. – Longman Publishing Group, 1982. – 213 p.
2. Cressler, J. D. Silicon Earth. Introduction to Microelectronics and Nanotechnology / J. D. Cressler. – CRC Press, 2016. – 618 p.
3. Moore, G. E. Cramming More Components onto Integrated Circuits / G. E. Moore. – Electronics Magazine. – 1968 – Vol. 38. – P. 114–117.
4. Semiconductor Industry Association (SIA) [электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: <http://www.semiconductors.org>.
5. Warner, R. M. Transistors: Fundamentals for the Integrated-Circuit Engineer / R. M. Warner, B. L. Grung. – Wiley, 1983. – 875 p.
6. Riordan, M. Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age / M. Riordan, L. Hoddeson. – W. W. Norton Company, 1998. – 366 p.
7. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. ГОСТ Р ИСО 14644–5–2005. – Введ. 2005–03–11. – М. : Стандартиформ, 2005.
8. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 395 с.
9. Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2013. – 188 с.
10. Зацепин, Д. А. Ионная модификация функциональных материалов : учеб. пособие / Д. А. Зацепин, И. А. Вайнштейн, С. О. Чолах. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 104 с.
11. Данилина, Т. И. Технология СБИС : учеб. пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей. – Томск : Изд-во ТГУ, 2007. – 287 с.
12. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем на кремнии. В 3 т. Т. 3 / О. Ю. Наливайко [и др.]. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 784 с.

Учебное издание

Прищепа Сергей Леонидович

**АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ
СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *С. Г. Девдера*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 31.01.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,53. Уч.-изд. л. 4,1. Тираж 30 экз. Заказ 43.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск