

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Физический факультет

Т.С. ШАМИРЗАЕВ

**ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА: ИСТОРИЯ,
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ**

Учебное пособие

Новосибирск

2011

УДК 53.06
ББК
Л

Шамирзаев Т.С. Твердотельная электроника: история, современное состояние и перспективы развития: Учебное пособие / Новосибир. гос. ун.-т. , Новосибирск, 2011. 91с.

Предлагаемое учебное пособие, представляющее собой введение в курс «Физические основы информационных технологий», знакомит студентов с историей, современным состоянием и перспективами развития микроэлектроники

Учебное пособие подготовлено в рамках реализации программы развития НИУ-НГУ на 2009-2018 гг.

© Новосибирский государственный университет, 2011

© Шамирзаев Т.С. 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5		
1.1. История развития электроники.....	5		
1.1.2 Вакуумная электроника.....	5		
1.1.3 Твердотельная электроника.....	9		
1.1.3.1. Биполярный транзистор.....	9		
1.1.3.2. Полевой транзистор.....	14		
2. ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ...17			
2.1. Принцип построения элементарной ячейки ИМС – носитель бита информации.....	21		
2.2. Производительность ИМС и пути ее повышения.....	25		
2.2.1. Масштабирование.....	27		
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ЭКСТЕНСИВНОЕ РАЗВИТИЕ ИМС.....	29		
3.1. Изолирующий слой под затвором.....	29		
3.2. Уменьшение расстояния между истоком и стоком.....	35		
3.2.1. Уменьшение подвижности носителей заряда...35			
3.2.2. Просачивание электронов.....	38		
3.2.3. Сопротивление контактов.....	41		
3.2.4. Генерация дефектов.....	41		
3.3. Мезаскопические эффекты: флуктуация концентрации атомов примеси.....	42		
3.4. Мезаскопически флуктуации порогового напряжения.....	44		
3.5. Тепловые флуктуации порогового напряжения.....	45		
3.6. Организация соединений элементов.....	46		
3.6.1. Паразитные межслойные емкости.....	49		
3.6.2. Проблемы деградации металлических шин межсоединений: электромиграция атомов.....	50		
		3.6.3. Рост эффективного удельного сопротивления проводников.....	51
		3.6.4. Задержки сигналов в соединениях.....	53
		3.6.5. Искажение сигнала.....	54
		3.6.6. Наведенные сигналы (помехи).....	56
		3.6.7. Перспективные методы соединений.....	58
		3.7. Энерговыделение и теплоотвод.....	67
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ НА ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ИМС.....	69		
4.1. Предельные возможности литографии.....	69		
4.1.1. Иммерсионная литография $\lambda = 193$ нм.....	71		
4.1.2. Двойное создание микрорисунка.....	73		
4.1.3. Экстремальная ультрафиолетовая литография.....	74		
4.2. Проблемы травления.....	77		
5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИМС.....	82		
6. ЧТО БУДЕТ ДАЛЬШЕ?.....	83		
6.1. Одноэлектронные туннельные транзисторы.....	83		
6.2. Функциональная электроника.....	85		
		Литература.....	88

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. История развития электроники

Современный научно-технический прогресс в значительной степени определяется уровнем электроники, т.е. той областью науки, техники и производства, которая связана с исследованием, разработкой и изготовлением электронных приборов и устройств. В своём историческом развитии электроника прошла несколько периодов. Основными материалами при экспериментах с электричеством в первой половине 19 века были различные металлы и диэлектрики. Свойства их были достаточно хорошо изучены. Впервые на аномальные по сравнению с металлами свойства сульфида серебра указал Фарадей. Он заметил, что электропроводность этого вещества растёт с повышением температуры, тогда, как у металлов она в этом случае уменьшается. В 1873 году Уолби Смит заметил, что селен при освещении изменяет свою электропроводность. Ещё через год профессор физики в Марбурге - Фердинанд Браун обнаружил выпрямляющие свойства области контакта металлического усика с сульфидом свинца - PbS. Фактически, можно сказать, что это было первое экспериментальное наблюдения явления выпрямления на переходе металл-полупроводник. Однако все эти работы не выходили за рамки лабораторных исследований

1.1.2. Вакуумная электроника

Массовое использование электронных устройств началось с появлением вакуумной электроники. Рождение вакуумной электроники начинается с изобретения электронной лампы, прибора способного усиливать и преобразовывать электрические сигналы. В основе ее

создания лежали работы нескольких выдающихся учёных. В 1883 году Томас Эдисон открыл эффект, названный впоследствии его именем. Поместив в лампу накаливания дополнительный электрод, он обнаружил, что если этот электрод был соединен через гальванометр с положительным концом нити, то через измерительный прибор протекал электрический ток, обусловленный током свободных электронов через вакуум. В течение четверти века эти его наблюдения оставались почти незамеченными. Только в начале XX века на них, наконец, обратили внимание, и «эффект Эдисона» лег в основу создания всех электронных ламп и других электровакуумных приборов «дотранзисторного» периода. Бывшему консультанту эдисоновской компании в Лондоне «Edison Electric Light Company» с 1882 г. по 1895 г. Джону Амброзу Флемингу, пришла мысль провести тщательное исследование «эффекта Эдисона». Изменяя форму электрода, он согнул металлическую пластину в виде цилиндра и расположил его таким образом, что нить накала оказалась внутри его. Соединив металлический цилиндр с плюсовым электродом, он обнаружил, что в этом случае гальванометр показывает самый большой электрический ток в сравнении с другими типами и положениями электродов. Для А.Флеминга стало ясно, что металлический цилиндр с положительным потенциалом способен улавливать наэлектризованные частицы, которые вылетают из разогретой нити накала. Он пришел к выводу, что устройство, состоящее из нити накала и металлической пластины, может быть использовано как выпрямитель не только переменных токов, используемых в промышленности, но также и высокочастотных токов, используемых в радио. Эта первая двухэлектродная лампа получила название «Вентиль Флеминга». Двухэлектродная лампа в роли детектора уступала по чувствительности, хорошо изготовленному кристаллическому детектору, но

превосходила его по стабильности работы, всегда была готова к приему радиосигнала и что важно, не требовала механических регулировок. В 1906 году Ли де Форест, доработал диодный детектор на вакуумной лампе, добавив третий управляющий электрод, выполненный в виде проволочной спирали. Свое детище изобретатель назвал «аудионом» (от латинского «аудио» – слышать и греческого «ион» – идущий). Позже с легкой руки английского электротехника Вильяма Икклза лампы с тремя электродами стали называть триодами. Через шесть лет, в 1912 году, Эдвин Армстронг предложил для повышения усиления триода часть сигнала с анода передавать обратно на сетку. При достаточно большой положительной обратной связи усилитель превращался в генератор электромагнитных колебаний. Именно с этого времени началась эпоха современной электроники, эра электронных ламп, или вакуумной электроники.

Одним из главных преимуществ вакуумных приборов была их надёжность, воспроизводимость параметров и устойчивость в работе. После создания этих приборов как бы само собой отпала необходимость проводить исследования принципов действия и физики эффектов в кристаллическом детекторе. И реальный широкий интерес к полупроводникам, как материалам электронной техники, не возобновлялся вплоть до конца середины 20-х годов XX века.

В 1926 году был обнаружен эффект выпрямления на контакте меди с окисью меди и металла с селеном. На основе этого эффекта удалось создать чрезвычайно надёжные твёрдотельные выпрямители в виде наборных столбиков из медных пластин, каждая из которых окислялась с одной стороны. Многие годы эти выпрямители, были неизменным компонентом всех радиоэлектронных схем и систем заряда аккумуляторных батарей. Причем огромное количество таких

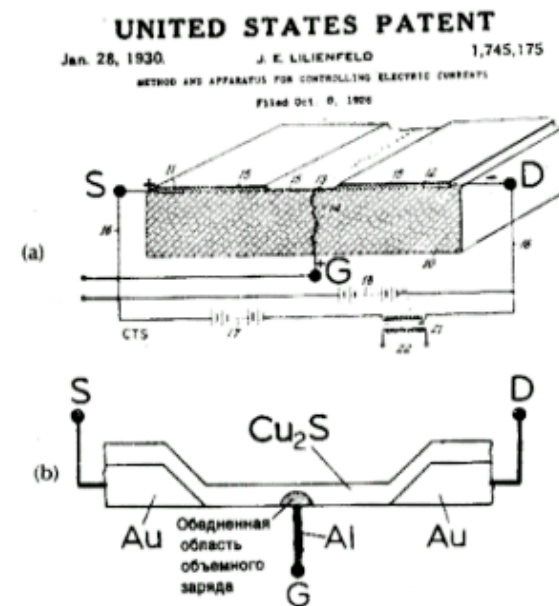


Рис. 1. Схема прибора из первого патента Ю.Э. Лилиенфельда с добавлением современных обозначений D - сток, S - исток и G - затвор

выпрямителей выпускалось промышленностью и применялось без понимания принципа их работы.

Интенсивное развитие физики твердого тела началось после открытия квантовой механики. Повеление зонной теории энергетических состояний электронов в кристаллах, дало возможность понять природу целого ряда электрических и оптических явлений. На ее основе были объяснены электрические свойства металлов, полупроводников и диэлектриков, а также оптические и магнитные свойства твердых тел. Невил Мотт в Англии, Вальтер Шоттки в Германии и Александр Давыдов в России исследовали и объяснили эффект выпрямления в системе металл-полупроводник, связанный с обеднением полупроводника носителями заряда у металлического электрода.

Было показано, что с помощью приложения электрического поля к металлическому электроду на поверхности полупроводника можно изменять концентрацию носителей заряда в приповерхностной области этого полупроводника. Иначе говоря, возникает возможность управления проводимостью полупроводникового материала. После этого у ряда исследователей возникла идея создания твёрдотельного усилителя - некоего подобия уже известного к тому времени усилителя из вакуумных элементов. Чаще всего предлагалось использовать эффект вытеснения носителей заряда из межэлектродного промежутка при приложении напряжения к управляющему электроду.

С начала тридцатых годов XX века начали фиксироваться патенты на полевые твёрдотельные приборы. Первыми из них можно считать патенты Юлиа Эдгара Лилиенфельда [1]. На рис. 1 приведена схема прибора из первого патента Лилиенфельда, который работал сначала в знаменитой фирме «Цеппелин», а затем в США. На рисунке хорошо видно, что у предложенного прибора имеются все составные части современного транзистора, т.е. Лилиенфельд уже чётко и правильно представлял себе принцип работы полевого транзистора.

1.1.3. Твёрдотельная электроника

1.1.3.1. Биполярный транзистор

В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях «Bell Labs» впервые создали действующее полупроводниковое устройство, способное модулировать и усиливать электрический ток [2,3]. Официальное представление изобретения состоялось 23-го декабря, и именно эта дата считается днём изобретения транзистора. Предлагались различные названия полученного прибора «полупроводниковый триод» (semiconductor triode),

«Solid Triode», «Surface States Triode», «кристаллический триод» (crystal triode) и «lotatron», но слово «транзистор» (transistor, образовано от слов transfer — передача и resist — сопротивление), предложенное Джоном Пирсом, победило во внутреннем голосовании.



Рис. 2. Первый транзистор Уильяма Шокли, Джона Бардина и Уолтера Браттейна.

Первый транзистор, показанный на рис. 2, был точечно-контактным и выполнен на германии. Для осуществления точечного контакта, золотая фольга наклеивалась на клин из диэлектрической пластины, а затем бритвой разрезалась от подошвы клина до его очень острой вершины. Прижимая эту конструкцию к поверхности германия и подавая на один контакт прямое смещение, на втором обратном смещенном контакте наблюдалось усиление по мощности. Хотя первые полупроводниковые приборы были созданы на PbS, Cu_2O_3 , Se, изобретатели транзистора остановились на германии. Этот выбор основывался на стабильности свойств этого материала в кристаллическом состоянии.

Можно считать, что именно с этого момента открылась новая эра в электронике – эра твердотельной электроники. Сразу же после изобретения транзистора началось всё более широкое применение этого прибора в электронике. Это и послужило причиной присуждения Нобелевской премии Бардину, Браттайну и Шокли в 1956 году.

Последующие после изобретения транзистора годы были

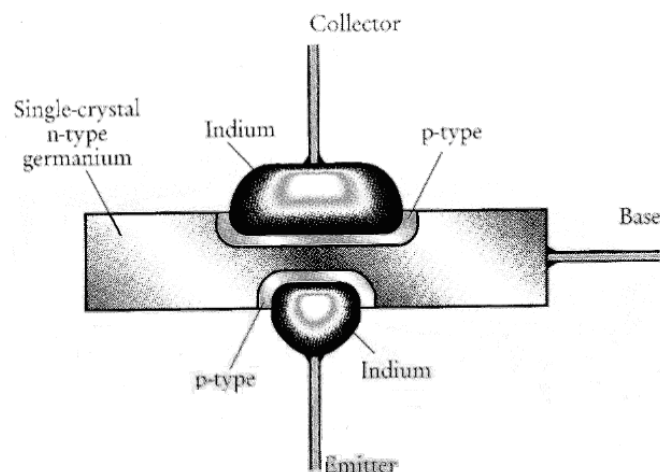


Рис. 3. Схема сплавного биполярного транзистора Дж. Саби.

направлены не только на организацию промышленного выпуска транзисторов и их удешевления, но и на работу по усовершенствованию прибора. Дело в том, что точечно-контактные транзисторы не только были трудны в изготовлении, но и их характеристики были далеки от идеальных. Эти характеристики имели большой разброс, плохо воспроизводились и были нестабильны во времени.

Эти проблемы в значительной мере были преодолены сотрудником «Дженерал Электрик» Дж. Саби, который изобрёл так называемый «сплавной биполярный транзистор», показанный на рис. 3 [4]. Его начальная идея состояла во

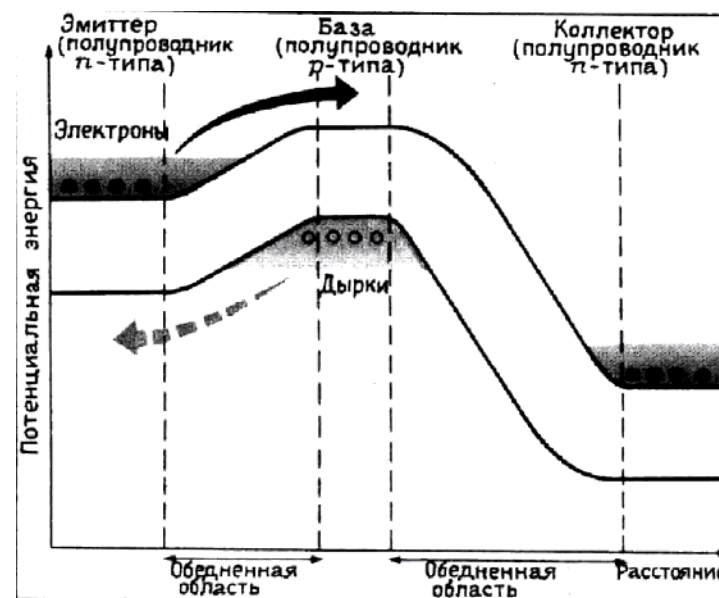


Рис. 4. Энергетическая диаграмма биполярного транзистора.

вплавлении капелек индия с противоположных сторон тонкой пластины германия с электронной проводимостью. Поскольку индий является акцепторной примесью для германия, то с обеих сторон образовывались электронно-

дырочные переходы. Кусочки индия легко позиционировались по шаблону, на пластине, которая вырезалась из легко выращиваемого однородного кристалла. После сплавления пластина разрезалась на индивидуальные приборы, к которым легко припаивались контактные проволочки. Характеристики получаемых таким образом транзисторов были не только воспроизводимы, но и одинаковыми. Очевидно, что такая технология могла быть в достаточной степени автоматизирована и позволяла выпускать значительные партии дешёвых приборов.

Одной из фундаментальных проблем электроники всегда была её быстродействие. Для биполярных транзисторов физическим ограничением по частоте является время пролёта неосновных носителей через область базы, что в свою очередь определяется толщиной базы и уровнем легирования. Сплавные транзисторы с толщиной базы до 10 мкм могли работать до частоты 10 МГц. Ламповая электроника позволяла работать до нескольких ГГц, поэтому военные не спешили их менять и соответственно финансировать разработку твёрдотельных приборов. Эта проблема была решена после разработки процесса диффузии доноров и акцепторов в полупроводниковую поверхность. Подобное решение дало возможность с высокой точностью контролировать глубину диффузионных слоёв до долей микрона. Именно по этой технологии Чарльз Ли изготовил в 1954 году диффузионный германиевый транзистор с толщиной базы 1 микрон, что привело к частоте отсечки 500 МГц [5].

Биполярный транзистор $n-p-n$, как это видно на рис. 4, работает на потенциальном эффекте, поскольку эмиттер отделен от коллектора потенциальным барьером, высота которого изменяется управляющим напряжением на базе. Работе такого транзистора несколько мешает то

обстоятельство, что дырки инжектируются из базы в эмиттер одновременно с эмиссией электронов из эмиттера в базу.

1.2.2. Полевой транзистор

Этих недостатков лишен полевой транзистор. Для получения такого транзистора в кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением (p типа проводимости), который называют подложкой, создаются две сильнолегированные области с противоположным типом проводимости (n типа). На эти области наносятся металлические электроды – исток и сток. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрывается тонким слоем диэлектрика. На слой диэлектрика наносится металлический электрод – затвор. Получается структура, состоящая из слоя металла, диэлектрика и

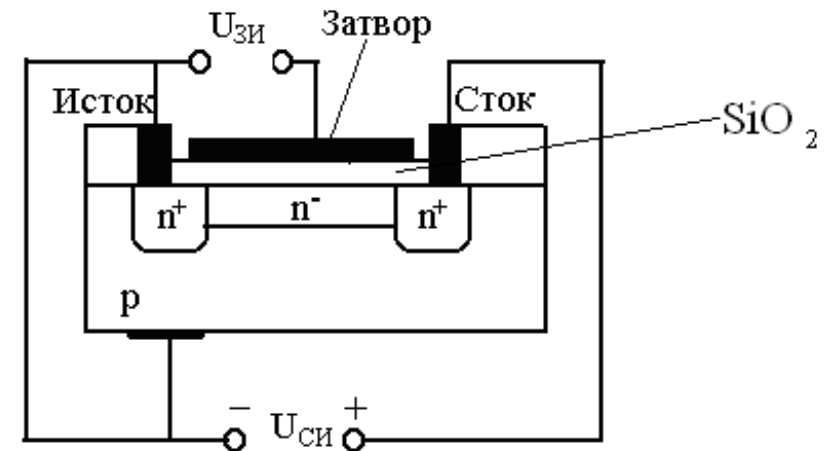


Рис. 5. Схема полевого транзистора с изолированным затвором.

полупроводника. Физической основой работы полевого транзистора со структурой металл-диэлектрик-

полупроводник является *эффект поля*. Напомним, что *эффект поля* состоит в том, что под действием внешнего электрического поля изменяется концентрация свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника. В таком приборе ток, текущий от истока к стоку изменяется в результате действия перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом, приложенному к затвору, как это видно на рис. 5. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы часто включают в более широкий класс униполярных электронных приборов (в отличие от биполярных).

Кроме того, полевой транзистор управляется не током, как биполярный, а напряжением (электрическим полем), это значительно упрощает схему и снижает затрачиваемую на управление мощность. Идея полевого транзистора с изолированным затвором была предложена, как сказано выше, еще Лилиенфельдом. Однако объективные трудности в реализации этой конструкции позволили создать первый работающий прибор этого типа только в 1960 году. Работы, выполненные в лабораториях «Бэлл Телефон» в конце 40-х годов, были первоначально направлены на создание полевого прибора. Однако результаты, полученные Шокли и Пирсоном [6] в 1948 г., разочаровали исследователей. В экспериментах использовались тонкие германиевые пленки, изолированные от управляющего электрода (затвора) тонкой пленкой слюды. Изменение проводимости германия в функции потенциала затвора регистрировалось с помощью двух электродов, присоединенных к образцу. Наблюдавшаяся модуляция проводимости была значительно меньше ожидаемой, поскольку большая часть («90%») индуцированного заряда захватывалась поверхностными состояниями. В результате этих экспериментов, а также

вследствие изобретения точечных и биполярных транзисторов интерес к исследованию приборов с полевым управлением несколько угас. В 1960 г. Канг и Аталла [7] предложили использовать структуру металл — окисел — полупроводник (МОП) на основе кремния, в которой металлический электрод управлял проводимостью между двумя обратнo смещенными диодами, расположенными на поверхности полупроводника. Этот прибор был назван МОП-транзистором. Рост SiO_2 на очищенной поверхности кремния приводит к сильному снижению плотности поверхностных состояний. Снижение концентрации поверхностных состояний было столь значительным, что в этой лаборатории удалось наблюдать значительную модуляцию проводимости электрическим полем.

Хотя все первые полупроводниковые приборы изготавливались из германия, с самого начала было ясно, что кремний для этого более предпочтителен. Это в первую очередь вытекает из большей ширины запрещенной зоны для кремния (1,1 эВ) по сравнению с германием (0,67 эВ). В германии это обуславливает значительную термогенерацию неосновных носителей заряда при комнатной температуре.

Основные проблемы, препятствующие тогда широкому применению кремния, были связаны с более высокой температурой большинства химических и металлургических процессов. Точка плавления кремния 1415°C , а для германия 937°C . Кремний также более химически активен, чем германий, не позволяя выращивать его из кварцевых тиглей, как германий.

Выход из этой тупиковой ситуации произошёл после разработки в 1952 году Х.Тюрером и В.Пфамом метода выращивания монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки [8,9]. Этот метод заключается в создании узкой зоны расплавленного кремния в вертикально стоящем слитке поликремния. Эта расплавленная зона

сохраняет свою целостность только поверхностным натяжением и не соприкасается ни с чем, кроме самого кремния. Передвигая СВЧ контур вдоль слитка, последний перекристаллизовывается и очищается до уровня лучших германиевых монокристаллов.

2. ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ.

Малые габариты транзистора, высокая его надёжность и большой срок службы позволили на его основе создавать сложные электронные системы, в частности бортовые авиационные и космические электронные устройства и электронно-вычислительные машины (ЭВМ). Началась миниатюризация электронных устройств. Усложнение электронной аппаратуры, связанное с реализацией сложных функций обработки информации, привело к существенному увеличению числа электрорадиоэлементов (электронных элементов) и, в особенности, **числа межсоединений**. Создание такой аппаратуры на дискретных приборах не обеспечивало необходимой надёжности систем, да и сами системы становились громоздкими и дорогостоящими.

Поиски решения проблемы межсоединений привели к созданию интегральных микросхем (ИМС) представляющих собой миниатюрные законченные функциональные узлы электронной аппаратуры, в которой активные и пассивные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле на поверхности (или в объёме) подложки и имеют общую герметизацию и защиту от механических воздействий. Изобретение ИМС приписывается Джеку Килби и Роберту Нойсу, которые в 1958 году, работая в совершенно разных местах (Д. Килби в корпорации Texas Instruments, а Р. Нойс в основанной им фирме по производству полупроводников Fairchild Semiconductor), изобрели практически идентичную модель интегральной схемы. Обоих объединил вопрос: «Как в минимум места вместить максимум компонентов?».

Транзисторы, резисторы, конденсаторы и другие детали в то время размещались на платах отдельно, и учёные решили попробовать их объединить на одном монокристалле из полупроводникового материала. Только Килби воспользовался германием, а Нойс предпочёл кремний. В 1959 году они отдельно друг от друга получили патенты на свои изобретения [10,11] — началось противостояние двух компаний, которое закончилось мирным договором и созданием совместной лицензии на производство чипов.

В микросхеме Килби использовалась разработанная им концепция, базирующаяся на принципе изоляции компонентов схемы *p-n*-переходами, изобретённом Куртом Леховеком. Внешний вид новинки, показанной на рис.6 был немного страшноват, но Килби и не предполагал, что показанное им устройство положит начало всем

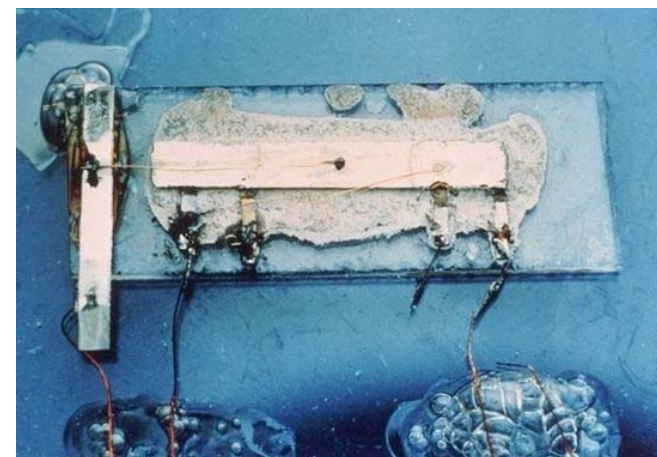


Рис. 6. Изображение первой интегральной микросхемы.

информационным технологиям, иначе, по его словам, он сделал бы этот прототип покрасивее.

Самая первая интегральная микросхема Килби представляла собой маленькую германиевую полосу $11 \times 1,5 \text{ мм}^2$ с одним транзистором, несколькими резисторами

и конденсатором. Несмотря на свою примитивность, эта схема выполнила свою задачу – вывела синусоиду на экран осциллографа. Шестого февраля 1959 года Килби подал заявку на регистрацию патента на новое устройство, описанное им как объект из полупроводникового материала с полностью интегрированными компонентами электронной схемы. Его вклад в изобретение микросхемы был отмечен вручением ему в 2000 году Нобелевской премии в области физики. Идея Нойса смогла решить несколько практических проблем, не поддавшихся интеллекту Килби. Он предложил использовать для микросхем кремний, а не германий, предложенный Килби. В 1968 году Роберт Нойс вместе с Гордоном Муром основали корпорацию Intel, которая сегодня является одним из ведущих производителей чипов и микросхем.

С изобретением микросхемы наступил новый период твердотельной электроники - период интегральных микросхем. Возникли реальные предпосылки осуществления комплексной миниатюризации электронных систем. Началось бурное развитие важнейшего направления современной твердотельной электроники - интегральной электроники, или микроэлектроники.

Приставка «микро» в слове «микроэлектроника» используется для подчёркивания высокой степени миниатюризации электронной аппаратуры, хотя, конечно же, размеры всех компонентов ИМС существенно превышают объекты микромира - атомов и молекул. Таким образом, основная цель разработчиков микроэлектронных устройств - достижение максимального числа логических операций (максимальной интеграции) при максимальной надёжности и минимальном объёме. Развитие интегральных схем шло по следующему пути: Малая степень интеграции (SSI) < 30 приборов на схему, средняя степень интеграции (MSI) 30-10³ приборов на схему, большие интегральные схемы (LSI) 10³ -

10⁵ приборов на схему, сверхбольшие интегральные схемы (VLSI) 10⁵ -10⁷ приборов на схему, современное состояние ультра большие интегральные схемы (ULSI) >10⁷ приборов на схему.

За более чем 50 лет, прошедших после создания первой ИМС, размер транзистора уменьшился с 1 мм до 22 нм (в ~50000 раз!). В 1964 году, спустя шесть лет после изобретения интегральной схемы, Мур, обнаружил зависимость роста производительности запоминающих микросхем от сроков их изготовления: новые модели

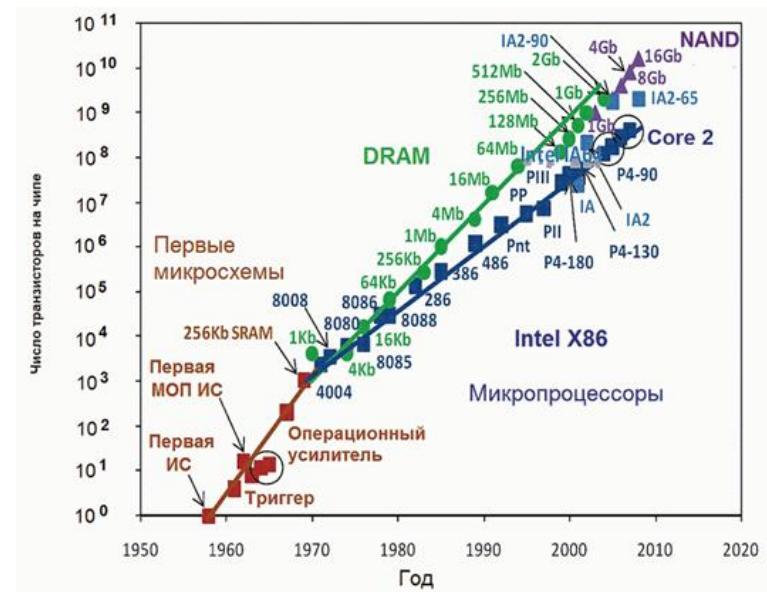


Рис. 7. Иллюстрация «закона» Мура

микросхем каждый раз появлялись через приблизительно равные промежутки времени (18-24 месяца) [12]. При этом их емкость возрастала каждый раз примерно вдвое. Тогда же Мур дал прогноз, согласно которому эта тенденция должна была сохраниться в течение последующих 10 лет, и в

1975 году с удивлением заметил, что он сбился [13]. Это наблюдение получило название «первого закона Мура». Показав. Исходя из этого «закона», легко можно было спрогнозировать, когда какая схема увидит свет.

Термин «закон Мура» стали употреблять для обозначения непрерывного экспоненциального роста функциональности интегральных схем с одновременным снижением их стоимости. Как видно из рис. 7, «Закон» Мура работает и в наши дни. На интуитивном уровне понятно, что такое положение дел не может сохраняться вечно. Однако даже самым проницательным аналитикам до сих пор не удавалось точно спрогнозировать, каким будет предельный минимальный размер транзистора. Этот прогнозируемый предел отодвигался все дальше примерно с той же скоростью, с какой уменьшались реальные размеры транзисторов. Поэтому точность прогнозов относительно будущего технологий КМОП вряд ли будет очень высокой. Однако знание базовых принципов развития технологии позволяет до некоторой степени судить о ее будущем [14]. Для того чтобы ответить на вопрос до каких пределов и как будет осуществляться дальнейшая миниатюризация микросхем, необходимо разобраться в том, какие физические и технологические препятствия могут встретиться на этом пути.

2.1. Принцип построения элементарной ячейки ИМС – носитель бита информации

Перед тем как рассмотреть стоящие перед разработчиками ИМС проблемы, необходимо напомнить об основном материале и основном активном элементе микроэлектроники. Основным материалом современной микроэлектроники остаётся кремний, а основным активным элементом ИМС является транзистор, выполняющий роль электронного вентиля, ключа. Подаваемая на вход

транзистора информация "ДА" - логическая единица

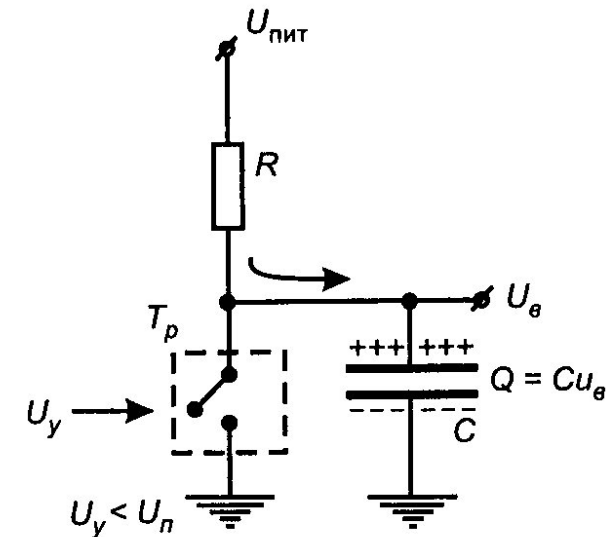


Рис. 8. Логическая ячейка с транзистором в запертом состоянии.

(например, электрическое напряжение 5 В) будет либо сохранена на выходе, либо преобразована в информацию "НЕТ" логический нуль (нулевое электрическое напряжение) в зависимости от электрического напряжения, поданного на управляющий электрод (или базу). Включив в состав ИМС нужное число таких трёхвыводных устройств, можно решать весьма сложные логические задачи [15].

Основным электронным вентиляем, ключём, в микроэлектронике является МОП полевой транзистор. Существуют многочисленные способы объединения транзисторов для осуществления логических операций. Например, самая простая операция "ДА"- "НЕТ" реализуется схемой, которая преобразует высокий потенциал на входе в низкий потенциал на выходе и наоборот. Для реализации

более сложных логических функций несколько таких преобразователей (инверторов) соединяют вместе и составляют сложные интегральные схемы.

Носителем электронной информации в ИМС является некоторый электрический заряд Q , запасённый ёмкостью C . Транзистор обрабатывает эту информацию в переключателе, который образует элементарную ячейку электронной логики. Если мы подадим на транзистор управляющее напряжение

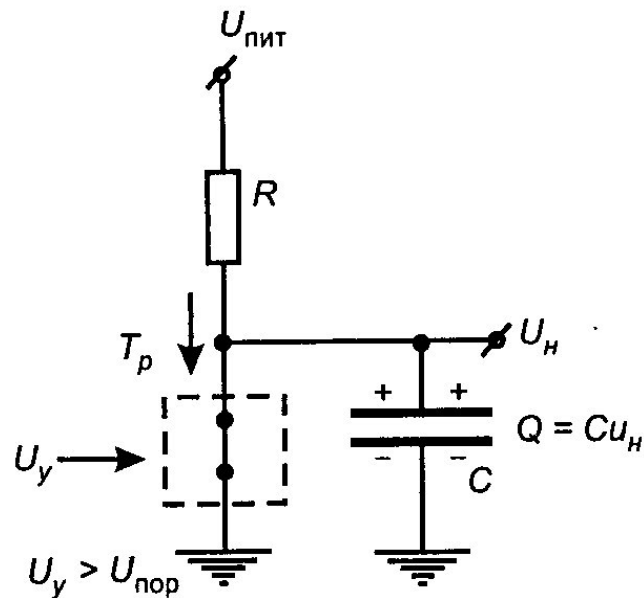


Рис. 9. Логическая ячейка с транзистором в открытом состоянии

U_y , меньше порогового напряжения $U_{П}$, то транзистор находится в запертом состоянии, как это показано на рис. 8. На обкладках конденсатора падает высокое напряжение U_B и накапливается большой заряд $Q = C \cdot U_B$. Если же управляющее напряжение на затворе больше порогового, то как показано на рис. 9, транзистор находится в проводящем

состоянии и на обкладках конденсатора, включённого параллельно транзистору, падает низкое напряжение U_H и накапливается небольшой заряд $Q = C \cdot U_H$.

Такое переключение из высокого напряжения -

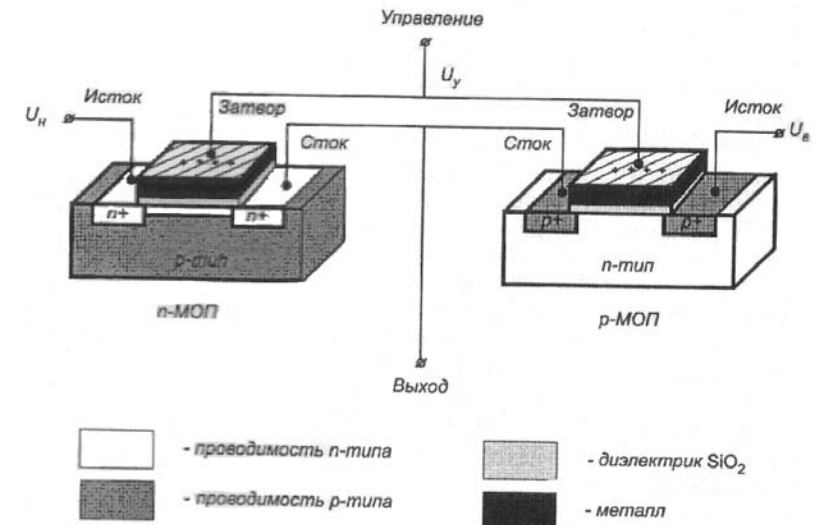


Рис.10. КМОП инвертор.

соответствующего, допустим, логической единице в низкое - соответствующее логическому нулю сопровождается передачей заряда величиной $\Delta Q = C \cdot (U_B - U_H)$ и рассеянием в виде тепла определённой энергии $\Delta W = 0.5 \cdot C \cdot (U_B - U_H)^2 = 0.5 \cdot C \cdot \Delta U^2$. Эта физическая величина называется фактором качества и является определяющей характеристикой электронного ключа. Чем меньше фактор качества, тем больше допустимая степень интеграции. Разность ΔU - называется логическим перепадом. Большим недостатком описанной схемы является выделения тепловой энергии, на резисторе R , включённом для ограничения тока между источником напряжения и зарядным конденсатором. Этот

вид затрат энергии практически исключается в логическом элементе КМОП – инверторе (комплементарной, т.е. дополнительной МОП-структуре), в которой объединены два МОП-транзистора.

Инвертор представляет собой схему, выходной сигнал которой есть инверсия его входного сигнала. Как видно из рис. 10, конструктивно схема построена на использовании последовательного соединения двух транзисторов с индуцированными каналами противоположных типов проводимости.

Когда входной сигнал имеет низкий уровень, затвор прибора с каналом n -типа проводимости можно считать соединенным с истоком, при этом прибор закрыт. Затвор прибора с каналом p -типа соединён в это время с землёй, и поэтому транзистор открыт. При этих условиях выходной сигнал имеет высокий уровень, т.е. он инвертирован по отношению к входному. Когда на входе возникает высокий уровень сигнала, прибор с каналом p -типа проводимости закрывается, в результате чего выходной сигнал приобретает низкий уровень. Поэтому ясно, что в статическом режиме один из транзисторов инвертора всегда выключен и между источником питания и землёй нет цепи для протекания постоянного тока. Поэтому вся мощность, рассеиваемая КМОП - схемами - это мощность, рассеиваемая при переключательных процессах. КМОП технология является одной из основных в производстве ИС в настоящее время.

2.2. Производительность ИМС и пути ее повышения

Вернёмся теперь опять к вопросу быстродействия уже с позиций, что основным прибором микроэлектроники является МОП транзистор. Очевидно, что чем меньше длина затвора, тем быстрее электрон проходит от истока к стоку, и тем выше рабочая частота транзистора и, следовательно, больше некоторая условная производительность

интегральной схемы, под которой можно понимать произведение числа транзисторов N в ИМС на их рабочую

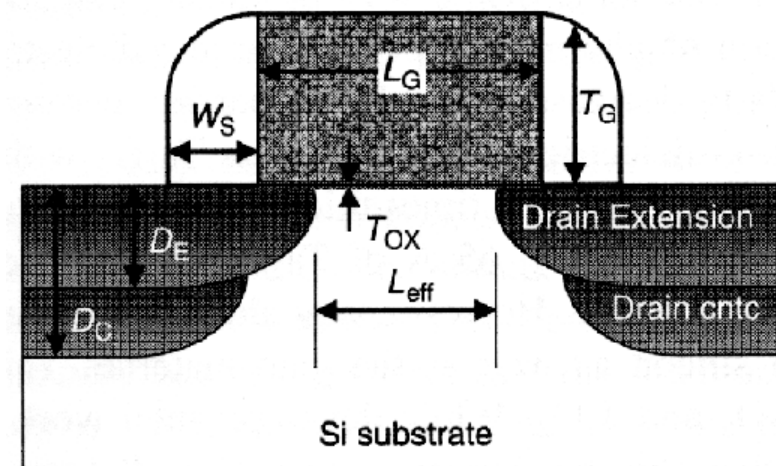


Рис. 11 Дизайн полевого транзистора. Расшифровка обозначений в таблице 1.

частоту f : $P = Nf = N/\tau$, где τ - время переключения.

Конструкция МОП полевого транзистора самосогласованна, поэтому изменением только одного размера (длины затвора) неизбежно приведет к изменению электрических характеристик прибора. Сложившая в начале 1970-х годов структура транзистора обеспечила снижение длины затвора от 10 мкм до 130 нм в 2000-е годы простого масштабирования, то есть уменьшением длины затвора, толщины диэлектрика и глубины залегания p - n -переходов. Дизайн транзисторной структуры показан на рис. 11. Оптимальные размеры транзисторной структуры приведены в таблице 1. Все размеры измеряются в единицах длины затвора – L_G .

Таблица 1

LG - длина затвора	Оптимальные размеры
Leff - эффект. длина канала	0,7 LG
WS - ширина спейсера	0,6 LG
TOX-толщина подзатворного диэлектрика	0,018 LG
DE -глубина области электрода	0,3 LG
DC- глубина контактной области	0,6 LG
TG - высота затвора	

2.2.1. Масштабирование

Чтобы избежать изменения характеристик транзистора при уменьшении длины канала используют пропорциональное изменение всех остальных характерных размеров прибора. Этот приём называется **масштабирование** (scaling). Он позволяет так рассчитать новый прибор, что его выходные характеристики не меняются, за исключением продвижения по частоте.

Масштабирование впервые было предложено Деннардом в 1973 году, и успешно использовалось в течение нескольких десятилетий для повышения производительности ИМС.

Давайте рассмотрим, к чему приведёт простое уменьшение в n раз всех трёх размеров (длины, ширины и высоты) логического элемента ИМС:

1) Движение носителей заряда в канале управляется электрическим полем E , величину которого можно определить как отношения логического перепада к толщине проводящего канала $E = \Delta U/l$. Поэтому для сохранения поведения транзистора при уменьшении размера необходимо сохранить величину управляющего

электрического поля, следовательно, необходимо уменьшить логический перепад в n раз:

$$\Delta U \rightarrow \Delta U_0 n^{-1}$$

2) Носителем бита информации является электрический заряд, равный отношению емкости к логическому перепаду $Q=C/\Delta U$, поэтому нас так же должно интересовать изменение емкости, которая определяется геометрическими размерами (S площадь обкладок, d расстояние между обкладками) и диэлектрической проницаемостью ϵ : $C_0 = \epsilon \cdot S_0/d_0$. Уменьшение геометрических размеров в n раз можно описать следующим образом: $C \rightarrow \epsilon(S_0 \cdot n^{-2})/(d_0 n^{-1}) \rightarrow C_0 n^{-1}$ и, таким образом, заряд уменьшается в n^2 раз:

$$Q \rightarrow Q_0 n^{-2}$$

3) Масштабирование затевалось ради увеличения времени переключения логического элемента. Оценим изменение времени заряда разряда емкости, учетом того, что ток, пропорционален изменению напряжения, т.е. логическому перепаду $I \approx \Delta U$.

$$\tau = C \cdot \Delta U/I \propto C \rightarrow \tau_0 n^{-1}$$

4) Как это будет показано ниже, одной из важнейших характеристик ИМС является рассеиваемая мощность. Поэтому оценим изменение рассеиваемой мощности W при масштабировании. $W = C \cdot \Delta U^2/\tau \rightarrow W_0 n^{-2}$, т.е. рассеиваемая мощность уменьшается как n^2 . Таким образом, при постоянной рассеиваемой мощности, можно увеличить количество элементов в n^2 раз. С учетом

изменения времени переключения производительность ИМС увеличивается в n^3 раз!!!

Итак, простые оценки показывают существенное выигрыш в производительности ИМС при уменьшении размеров. Поэтому неудивительно, что масштабирование долгое время являлось магистральным путем развития ИМС. Однако, справедливости ради, надо отметить, что «золотой век» масштабирования уже пройден, и к настоящему времени (2011 г.) возможности этого приема для дальнейшего развития ИМС практически исчерпаны. На пути дальнейшего уменьшения размеров встают физические и технологические ограничения, преодоление которых требует изменения дизайна транзистора.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ЭКСТЕНСИВНОЕ РАЗВИТИЕ ИМС.

Уменьшение размеров при масштабировании неизбежно должно приводить к:

- 1) уменьшению толщины подзатворного диэлектрика;
- 2) уменьшению расстояния между стоком и истоком, и толщины канала;
- 3) появлению мезаскопических эффектов;
- 4) увеличение длины и уменьшению толщины соединений между отдельными элементами ИМС.

Рассмотрим, к каким последствиям приводят эти изменения.

3.1 Изолирующий слой под затвором

Исходным полупроводником для полевых транзисторов с изолированным затвором в основном является кремний. Поэтому в качестве диэлектрика под затвором используется обычно слой диоксида кремния SiO_2 , выращенный на поверхности кристалла кремния путем

высокотемпературного окисления. Использование этого материала, обусловлено высоким структурным совершенством границы раздела кремний/ SiO_2 .

Будучи объектом волновой природы, электрон характеризуется длиной волны Де Бройля, зависящей от материала и скорости электрона. В частности, в кремнии она составляет несколько десятков ангстрем. Если толщина SiO_2 меньше этого расстояния, то становится заметной вероятность прохождения электрона сквозь диэлектрик и этот слой перестаёт быть изолирующим. Даже простые оценки показывают, что начиная с толщины SiO_2 в 5 нм и меньше вследствие увеличения прямого туннелирования избыточный ток утечки через затвор начнет возрастать. В работе [16], было показано, что теоретический передел минимальной толщины слоя, при котором SiO_2 хоть как то

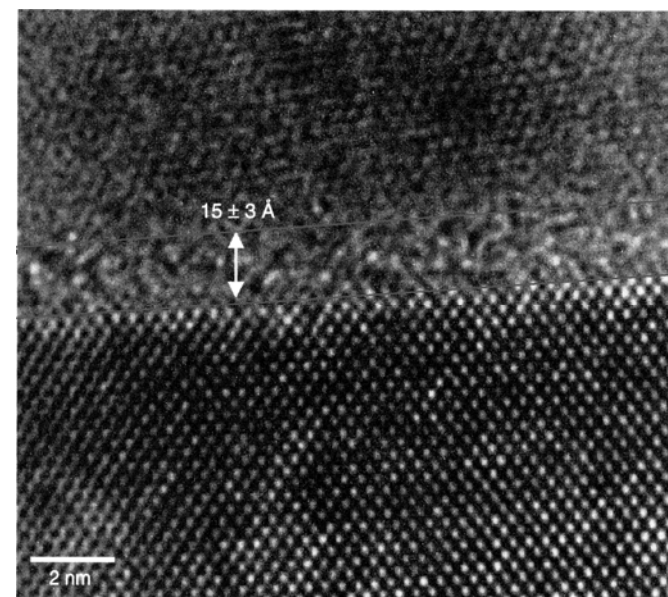


Рис. 12. Полученное в просвечивающем электронном микроскопе изображение поперечного среза структуры SiO_2/Si .

сохраняет свойства диэлектрика, составляет 0,8 нм.

С учетом структуры гетерограницы кремний/SiO₂ реальная толщина диэлектрического слоя должна быть больше и в работе [17] было показано, что технологический предел, при которой SiO₂ начинает проявлять диэлектрические свойства достаточные для изоляции затвора от канала составляет 1,2 нм. На рис. 12 показано полученное в просвечивающем электронном микроскопе поперечное сечение структуры содержащей тонкий слой SiO₂ на кремнии, видно, что использование современных технологий роста тонких пленок позволяют получать слои такой толщины.

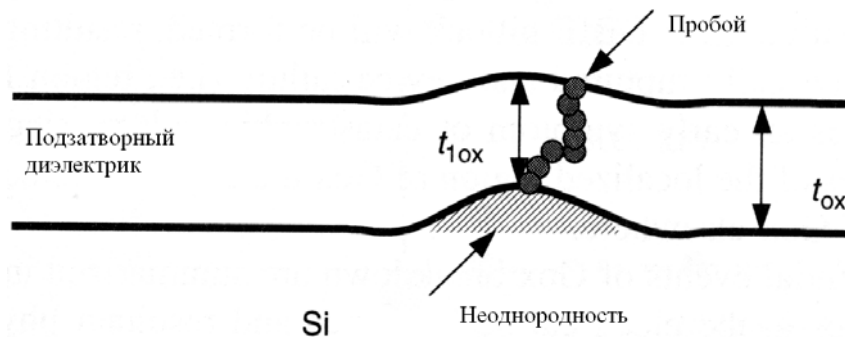


Рис. 13. Пробой тонкого диэлектрического слоя в области неоднородности.

В экспериментах с приборами, имеющими толщину окисла 1,3–1,5 нм [18], было обнаружено, что туннельный ток через подзатворный диэлектрик может быть существенно уменьшен путём повышения однородности плёнки окисла. Это связано с тем, что при малых толщинах диэлектрического слоя любые неоднородности, как показано на рис. 13. приводят к перколяционному пробое диэлектрического слоя. Типичные проблемы при формировании гетерограницы диэлектрик-затвор показаны на рис. 14.

Для получения однородной плёнки в работе [18] использовано селективное эпитаксиальное наращивание нелегированного кремния для получения канала МОП-транзистора, поскольку плёнка окисла на эпитаксиально

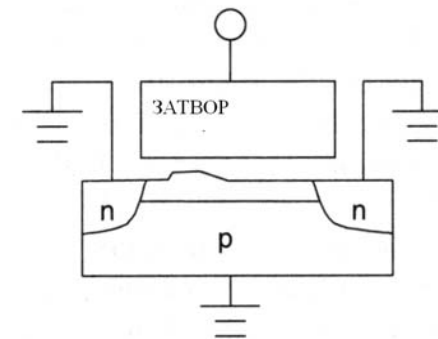
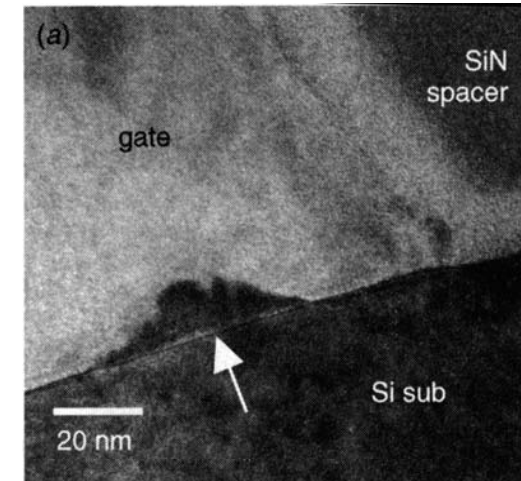


Рис. 14. Образование неоднородности на гетерогранице диэлектрик затвор. Сверху — поперечный срез структуры в просвечивающем электронном микроскопе. Снизу — схематическое изображение неоднородности.

выращенном кремнии получается более однородной. Затвор был выполнен из TiN с малой зернистостью, что заметно улучшило однородность диэлектрика под затвором.

Давайте теперь рассмотрим, какой длине затвора соответствует технологический предел толщины SiO_2 – 1,2 нм для стандартного дизайна транзистора. Как видно из таблицы толщина подзатворного диэлектрика должна быть равна $\text{TOX} = 0,018 \text{ LG}$. Таким образом, минимальная длина затвора в транзисторе с подзатворным диэлектриком SiO_2 не может быть меньше чем 70 нм. На сегодняшний день (2011 г.) достигнутая длина затвора транзистора составляет 22 нм, а ИМС содержащие транзисторы с $\text{LG} = 45$ нм, выпускаются миллионами штук. Толщина подзатворного диэлектрика SiO_2 при уменьшении размера длины затвора до 45 нм должна составлять 0,8 нм, что значительно меньше технологического предела. Так как же удалось достичь столь малых длин затвора в современных транзисторах? Очевидно, что для этого пришлось пойти на некоторое изменение дизайна транзистора.

Текущее решение проблемы с малой толщиной подзатворного диэлектрика включает замену традиционного для кремниевой технологии создания МОП-транзисторов термического оксида SiO_2 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,9$ на диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью, так называемые high- k диэлектрики [19].

Такими диэлектриками являются оксиды некоторых металлов SrTiO_3 [20], Ta_2O_5 , TiO_2 , HfO_x , HfAlO_x [21]. Например, использование Ta_2O_5 или HgO_2 ($\epsilon \approx 25$) вместо SiO_2 позволит увеличить толщину подзатворного диэлектрика в 6,4 раза при фиксированном управляющем напряжении (с 1 нм до 6,4 нм), что уменьшает вероятность туннелирования электронов через подзатворный оксид. Поперечный срез структуры, содержащей слой такого high- k

диэлектрика HgO_2 на кремнии, полученный методом просвечивающей электронной спектроскопии показан на рис. 15.

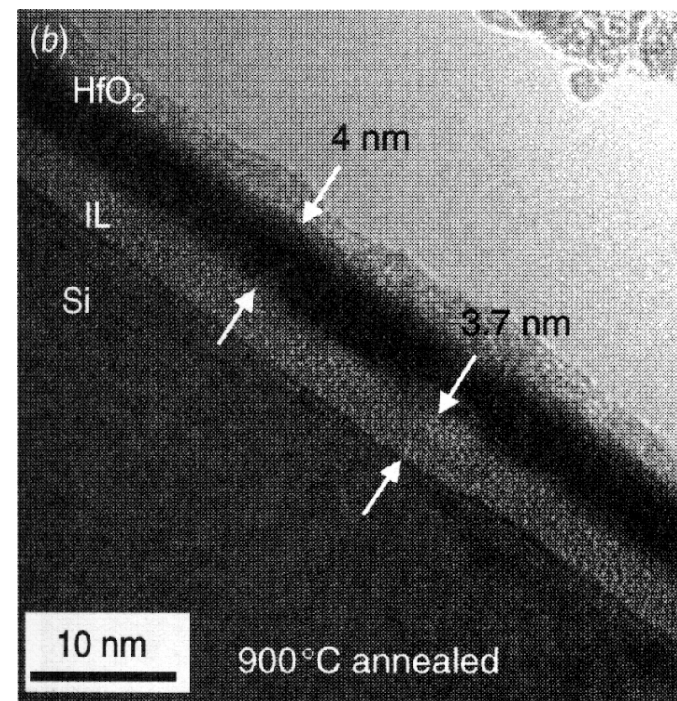


Рис. 15. Полученное в просвечивающем электронном микроскопе изображение поперечного среза структуры HfO_2/Si .

При длине затвора 22 нм толщина диэлектрического слоя Ta_2O_5 будет составлять 2,4 нм, что выше толщины туннельного пробоя. Однако для использования high- k диэлектриков надо решить весьма сложную задачу получения стабильной и бездефектной гетерограниц диэлектрик-канал и диэлектрик-затвор, такой же идеальной как Si/SiO_2 с низкой плотностью поверхностных состояний, малым встроенным зарядом, гладкостью гетерограницы.

3.2. Уменьшение расстояния между истоком и стоком

Уменьшение расстояния между истоком и стоком приводит к появлению целого ряда проблем, связанных с уменьшением подвижности носителей заряда, прямому просачиванию носителей электронов из истока в сток и генерации дефектов, горячими электронами.

3.2.1. Уменьшение подвижности носителей заряда

При уменьшении длины канала в транзисторе сильно увеличивается рассеяние носителей заряда на шероховатостях гетерограницы кремний/подзатворный диэлектрик. Поскольку при масштабировании уменьшение длины канала сопровождается уменьшением его толщины до значений $d_{Si} < 10$ нм, это приводит к тому, что канал становится фактически, квантовой ямой. Таким образом, поверхностное рассеяние в тонких слоях является существенно квантовым эффектом. Квантомеханические расчеты [22] показывают, что падение подвижности с уменьшением толщины слоя кремния $\mu_n \sim d_{Si}^{-6}$. Сильная деградация подвижности в тонких слоях кремния наблюдается и в эксперименте [23].

Другой причиной уменьшения подвижности в каналах маленького размера является увеличение напряженности электрического поля между истоком и стоком, в связи, с чем кинетическая энергия электронов становится большой и не может быстро рассеиваться. Разогрев носителей приводит к уменьшению их подвижности μ_n . Величина подвижности в транзисторах с коротким каналом описывается следующим феноменологическим выражением:

$$\mu_n = \mu_0 \left(1 - \frac{\alpha}{L} \right),$$

где μ_0 подвижность электронов в транзисторах с длинным каналом, α , эмпирически определяемый коэффициент.

Один из путей компенсации падения подвижности носителей заряда, связанной с уменьшением размера проводящего канала состоит в увеличении подвижности носителей заряда за счет введения механических напряжений в область канала. По заявлению сотрудников корпорации Intel, технология напряженного кремния появилась в 90-нм технологическом процессе и обрела свою усовершенствованную версию в 65-нм техпроцессе. Причина увеличения подвижности носителей в напряженных слоях состоит в перераспределении носителей по энергии в пользу носителей с низкой эффективной массой. Рассмотрим, каким образом формируется транзисторная структура с напряженным каналом. На легированные соответствующими примесями области кремния в местах формирования каналов

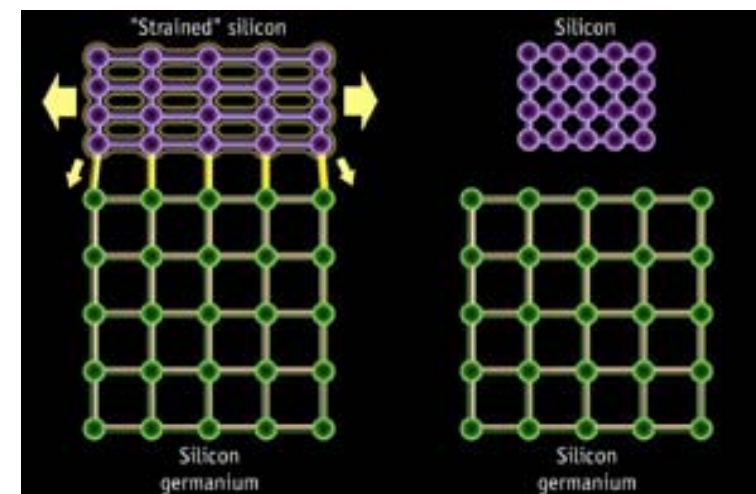


Рис. 16. Разность постоянных решетки кремния и твердого раствора германий-кремний, приводит механическому растяжению слоя Si, выращенного на подслое SiGe.

МОП-транзисторов с помощью ионно-лучевой эпитаксии локально наносится слой твердого раствора SiGe толщиной до 10 нм. Затем на поверхность слоя SiGe наращивается эпитаксиальный слой чистого кремния толщиной 4 нм. И формируется слой подзатворного диэлектрика. Вследствие того, что постоянная кристаллической решётки твердого раствора SiGe больше, чем у Si, слой кремния испытывает механическое растягивающее усилие по двум координатам, как это видно из рис. 16. Подвижность носителей в этом напряжённом слое кремния выше, чем в обычном, не напряженном.

Например, если содержание Ge в слое SiGe составляет 30%, то подвижность электронов в напряжённом слое кремния *n*-канального МОП-транзистора увеличивается примерно на 80%, компенсируя снижения подвижности связанное с уменьшением длины канала. Что касается подвижности дырок в *p*-канальных МОП - транзисторах, то здесь структурная композиция канала работает следующим образом. Между Si и SiGe образуется гетеропереход, который представляет собой потенциальную яму для дырок. Концентрация дырок в ней оказывается больше, чем на границе раздела Si/диэлектрик. Поэтому ток канала обеспечивается током дырок в SiGe, где их подвижность выше. Хотелось особо отметить, что механические напряжения в структурах полупроводниковых интегральных схем всегда относили к дефектам структуры и всячески старались если не исключить полностью, то, во всяком случае, максимально снизить. Здесь же «дефект структуры» используется для улучшения электрофизических свойств структуры. Согласно данным корпорации «Intel», применение «напряжённого» кремния обеспечило 30-процентное увеличение частоты переключения транзисторов без увеличения их тепловыделения.

3.2.2 Просачивание электронов

Предел уменьшения длины канала для полевых транзисторов налагается эффектом просачивания электронов. Известно, что в *p-n* переходе возникает двойной электрический слой толщиной порядка нескольких тысяч ангстрем (область пространственного заряда - ОПЗ), в которой существует электрическое поле, препятствующее носителям заряда свободно переходить из одной области в другую и рекомбинировать друг с другом.

Если сблизить сток и исток (эмиттер и коллектор), то носители проникают (просачиваются) в области противоположной проводимости и взаимно нейтрализуются: высота потенциального барьера, между истоком и стоком уменьшается и через транзистор начинает течь ток утечки. Можно говорить о двух компонентах этого тока – (1) туннельный ток, и (2) самопроизвольное перемещение электронов с отрицательно заряженного истока к положительно заряженному стоку через кремний, находящийся под каналом транзистора, и им уже не контролируемый. Этот эффект известен как подканальная утечка, или утечка в выключенном состоянии. Для компенсации эффекта подканальной утечки приходится поднимать напряжение на затворе, и как следствие, для компенсации уменьшения проводимости в канале рабочий ток (через увеличение напряжения между стоком и истоком). В результате ИМС потребляет, во-первых, слишком много энергии, а, во-вторых, поскольку снижение высоты потенциального барьера приводит к уменьшению порогового напряжения открывания, транзистор не фиксирует два четко различимых положения, соответствующих логическим единицам и нулям.

Минимальную длину канала ограничивает эффект, связанный со смыканием областей истока и стока при приложении напряжения к стоку V_{DS} , необходимое для

смыкания канала. Поскольку ширина $l_{об}$ $p-n$ перехода, смещённого в обратном направлении, равна:

$$l_{об} = \left(\frac{2(2\phi + V_{DS})}{eN_A} \right)^{1/2},$$

где N_A концентрация легирующей примеси, то минимальная длина канала должна быть больше удвоенной ширины $p-n$ перехода и быть прямо пропорциональна корню квадратному от напряжения питания и обратно пропорциональна корню квадратному от уровня легирования подложки.

Минимальная длина канала стандартного транзистора, когда можно пренебречь эффектом туннельного "просачивания" составляет примерно 50 нм.

Для снижения подканальной утечки долгое время ничего не предпринималось. Сейчас ситуация начинает меняться, поскольку рабочий ток, наряду со временем срабатывания затвора, является одним из двух основных параметров, характеризующих скорость работы транзистора, а утечка в выключенном состоянии на нем непосредственно сказывается - для сохранения требуемой эффективности транзистора приходится, соответственно, поднимать рабочий ток, со всеми вытекающими условиями.

Одним из наиболее известных на сегодняшний день способов решения этой проблемы является применение технологии кремний на изоляторе (КНИ). Подложка, выполненная по технологии кремний на изоляторе, представляет собой трёхслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещённого на нём тонкого поверхностного слоя кремния, как показано на рис. 17. В качестве диэлектрика может выступать диоксид кремния SiO_2 . Суть технологии, в общем-то, вполне логична - транзистор отделяется от кремневой подложки еще одним тонким слоем изолятора [24].

Транзисторы с длиной канала 45 нм и 32 нм изготовлены по уже КНИ технологии, как это видно на рис. 17.

Кроме того, использование этой технологии позволяет уменьшить разброс пороговых напряжений и емкость «сток/исток – подложка», перезарядка которой

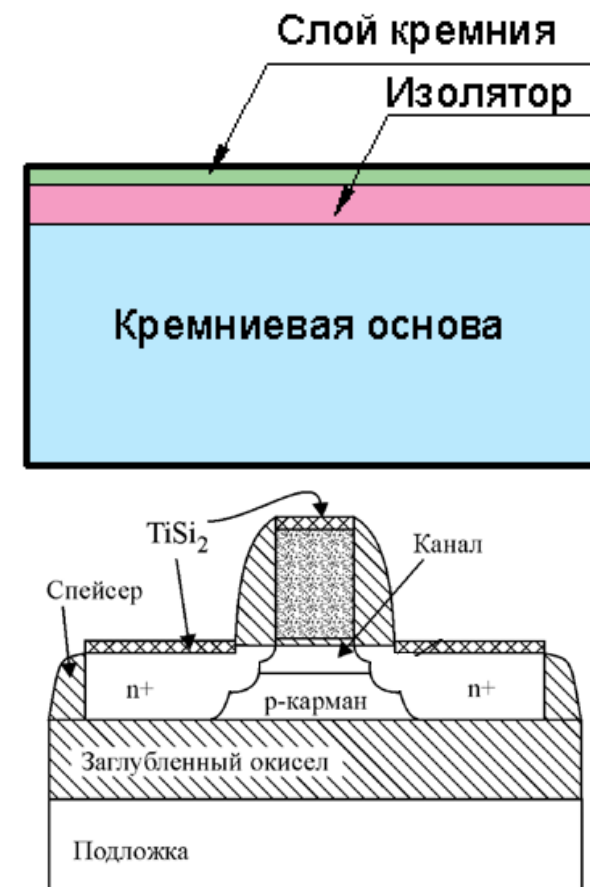


Рис. 17. Сверху - структура кремний на изоляторе. Снизу - транзистор, изготовленный по КНИ технологии.

приводит к дополнительным потерям энергии.

3.2.3 Сопротивление контактов

Одной из проблем изготовления транзисторов на тонких плёнках кремния является высокое последовательное сопротивление областей истока и стока. Для его уменьшения используют так называемый самосовмещённый силицидный процесс, использующий для уменьшения сопротивления в контактной области нанесения промежуточного слоя из силицида титана или кобальта. Однако, если толщина используемой плёнки кремния менее 20 нм, то такой тонкий слой может быть полностью поглощён формирующимся слоем силицида и тогда площадь контакта между кремнием и силицидом резко уменьшается, что приводит к возрастанию сопротивления контакта. Очень малое поглощение кремния происходит при выполнении контакта из вольфрама, однако при контакте к сильнолегированному кремнию р-типа проводимости вольфрам образует контакты с очень плохой стабильностью характеристик. Для решения проблемы контактов может потребоваться эпитаксиальное наращивание плёнки кремния сверху областей истока и стока или, наоборот, стравливание той области кремния, где должен быть сформирован канал транзистора.

3.2.4. Генерация дефектов

Горячие электроны могут генерировать дефекты решётки. Накопление дефектов приводит к изменению порогового напряжения. Эти изменения столь велики, что транзистор может перестать переключаться. Более того, деградация параметров, вызванная горячими электронами представляет основную проблему конструирования транзисторов для аналоговых применений. В изготовленных аналоговых устройствах она проявляется в виде

долговременной нестабильности параметров (старения), которая является очень важным параметром, особенно для измерительных цепей. Одним из методов уменьшения энергии горячих электронов, которые вызывают долговременную деградацию параметров транзистора является уменьшение напряжённости электрического поля в канале возле стока. Понижения напряжённости разгоняющего носители заряда электрического поля исток-сток достигается введением мелких слаболегированных областей (на рис. 11 эти области обозначены как DE), которые удлиняют области истока и стока в сторону канала.

И в заключение параграфа отметим, что независимо от конкретной структуры транзистора оценочные расчеты предсказывают предельное минимальное расстояние между стоком и истоком с отношением тока включения к току выключения, равным 1000, за счет одного только туннельного перехода равное 5 нм. С учетом описываемых в следующем параграфе мезаскопических флуктуаций концентрации примесей, этот предел увеличивается до 10 нм.

3.3. Мезаскопические эффекты: флуктуация концентрации атомов примеси

Для рассмотрения влияния флуктуация концентрации атомов легирующей примеси на параметры полупроводниковых транзисторов необходимо ввести понятие: мезоскопического размер a . Пусть l – размер конструктивного элемента, например область истока или стока полевого транзистора, получаемая путем легирования. При условии, что $l \gg a$, где a – постоянная решетки, равная примерно 3 \AA , дискретность атомов не проявляется. В этом случае размер l макроскопичен, и материал может рассматриваться, как непрерывная среда. При $l \sim a$ размер микроскопичен. В этом случае каждый атом или небольшая

группа атомов рассматривается как самостоятельный объект. А при $l = (10-100) \times a$ объект мезоскопичен. Свойства такого объекта статистически неустойчивы. Или, другими словами: мезоскопические эффекты связаны со статической неопределенностью свойств изучаемых объектов.

Произведем оценку размера конструктивного элемента транзистора, получаемого путем легирования, при котором его свойства статистически устойчивы, т.е. элемент можно считать макроскопическим.

Пусть V объем элемента, N число атомов легирующей примеси, а n концентрация носителей заряда. Для случайного процесса подчиняющегося нормальному распределению, относительная флуктуация обратно пропорциональна корню квадратному от флуктуирующей величины, т.е. для флуктуации концентрации атомов примеси, можно записать:

$$\frac{\Delta N}{N_{\text{ср}}} = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{ср}}}}$$

При $N_{\text{ср}} \cong 10^3$ $\Delta N/N_{\text{ср}} \cong 0.03$ (3%), будем считать это значение границей устойчивости. Т.е., при $N < 10^3$ элемент становится мезоскопическим и его свойства статистически неустойчивы. Оценим размер области истока, содержащего $N=10^3$ атомов примеси и легированного до уровня $n=1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По определению объем, занимаемый этой областью равен $V=N/n$. С другой стороны $V \sim L^3$, где L – линейный размер области истока. Таким образом $L \sim \left(\frac{N}{n}\right)^{1/3} \sim 10^{-5} \text{ см}$, т.е. исток транзистора станет статистически неустойчивым, когда его линейные размеры уменьшатся до величины порядка 100 нм.

3.4. Мезоскопические флуктуации порогового напряжения

Мезоскопические эффекты приводят к флуктуации порогового напряжения МОП-транзистора. В экспериментах с приборами, имеющими толщину подзатворного диэлектрика 1,2–2,8 нм, было показано, что с ростом

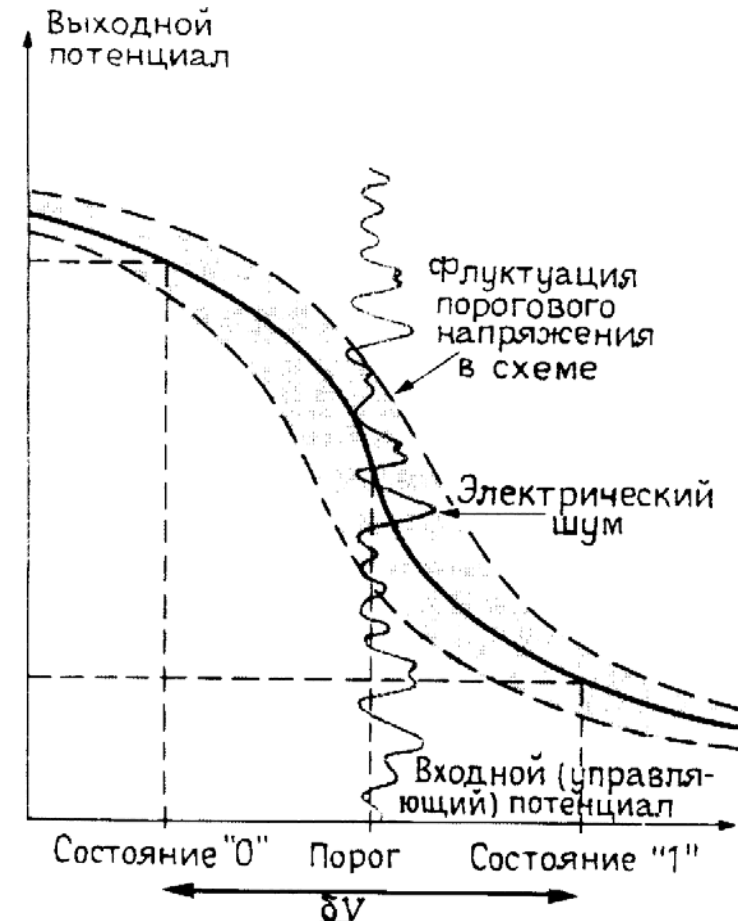


Рис. 18. Влияния флуктуаций и шумов на выбор логического перепада.

туннельного тока увеличивается статистический разброс порогового напряжения. Это объясняется тем, что пороговое напряжение начинает зависеть от падения напряжения на омическом сопротивлении затвора; падение напряжения вызывается прохождением туннельного тока. При этом в разброс порогового напряжения вносится компонента, связанная с разбросом сопротивления затвора.

В настоящее время разброс пороговых напряжений составляет 100 мВ, так что нижняя граница величины логического перепада повышается до одного вольта. С уменьшением размеров МОП-транзисторы становятся ещё более чувствительными к флуктуациям, поэтому величина логического перепада, необходимого для устойчивой работы транзистора не только не снижается, но и может возрастать. Влияние шума и мезаскопических флуктуаций на работу транзистора показано на рис. 18.

3.5. Тепловые флуктуации порогового напряжения

Для уменьшения тепловыделения ИМС желательно снижать напряжение питания. К сожалению, однако, невозможно снижать напряжение до сколь угодно малых значений. Проблема связана с тепловыми флуктуациями потенциала. Пусть E_n энергия, которую носители заряда должны преодолеть, чтобы открыть транзистор. Если U_{Π} – напряжение источника питания схемы, то $E_n = eU_{\Pi}$. Поскольку носители заряда находятся в тепловом движении, то существует вероятность F_n того, что энергия E_n будет набрана в процессе теплового движения. Эта вероятность определяется распределением Гиббса:

$$F_n = A_n e^{-E_n/kT}$$

Если считать, что состояние с $E_n = 0$ осуществляется с вероятностью, равной единице, то $A_n = 1$. Следовательно,

вероятность, того, что цепь переключится в результате теплового движения:

$$F_n = e^{U_{\Pi}/\varphi_T}, \text{ где } \varphi_T = kT/e$$

при $T = 300$ К получаем, что величина шума, обусловленная тепловыми флуктуациями достигает 25 мВ: $\varphi_T = 0.025$ В. Пусть в ИМС 10^6 элементов, каждый из них может переходить в новые состояния 10^9 раз в секунду. Потребуем теперь, чтобы в течение 10^3 секунд в среднем только в одном элементе при одном переключении может произойти сбой. Тогда вероятность переключения равна:

$$F_n = \frac{1}{10^6} \frac{1}{10^9} \frac{1}{10^3} = 10^{-18}$$

Используя распределение Гиббса легко показать, что:

$$10^{-18} = e^{-U_{\Pi}/\varphi_T}$$

Отсюда вытекает требование к напряжению питания:

$$U_{\Pi}/\varphi_T \sim 40,$$

Поскольку при $T = 300$ К, $\varphi_T = 0.025$ В, напряжение питания должно быть не меньше, чем $U_{\Pi} = 1$ В.

3.6. Организация соединений элементов

По мере роста числа элементов ИМС всё более острой становится задача организации соединений элементов. Как показано на рис. 19 эти межсоединения занимают всё большую часть площади кристалла, вследствие чего преимущество дальнейшего повышения уровня интеграции быстро падает. В УБИС с проектной нормой 180 нм на один кристалл приходилось более 10 миллионов транзисторов и для их функционирования в схеме

необходимо было около 50 миллионов соединений. Такое количество «проволочек»-шин уже невозможно без изменения их размера расположить в одной плоскости. Изменять же размер, используя законы масштабирования, невозможно из неизбежного увеличения при этом сопротивления. Всё это привело разработчиков к необходимости применять **многоуровневое соединение** используя изменение сечения проводников на каждом следующем уровне.

Короткие и имеющие наименьшее сечение проволочки на нижнем уровне, ответственны за внутри приборные связи. Более длинные шины в верхних уровнях имеют меньшую плотность и возможность увеличения сечения и таким образом даже при увеличении длины меньше влияют на формирование задержки. Они осуществляют связь между отдельными частями кристалла, соединяя различные функциональные блоки.

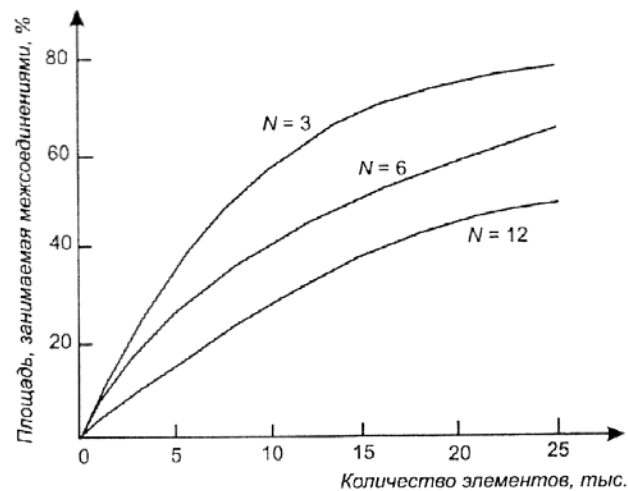


Рис. 19. Возрастание площади ИМС, занятой соединительными шинами при росте числа элементов.

Всё это хорошо иллюстрируется на следующем рисунке 20, где приведена схема поперечного сечения фрагмента ИМС с использованием многоуровневого соединения. Хорошо видно и изменение сечения на каждом уровне и вертикальные соединения. Здесь же можно

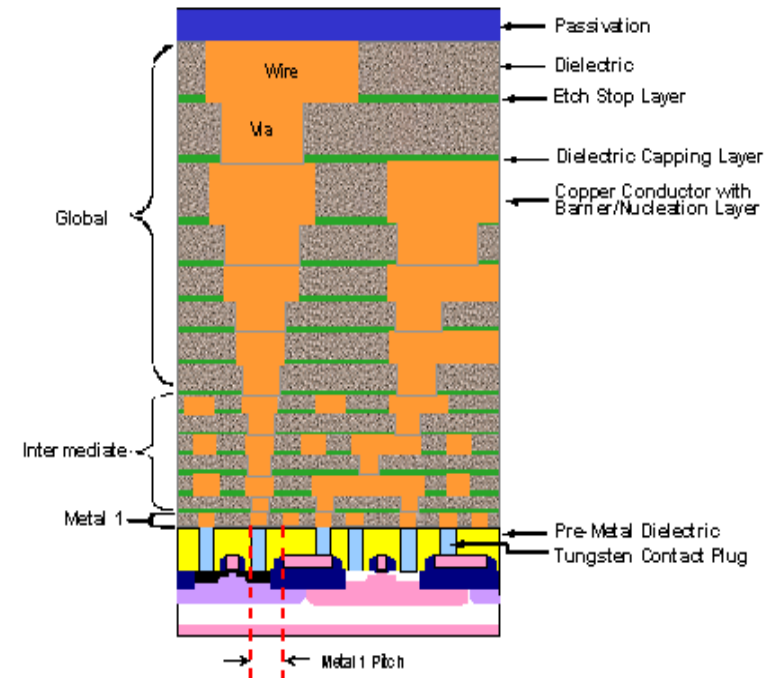


Рис. 20. Многоуровневая разводка в ИМС.

обнаружить многообразие используемых металлов, а также диэлектриков. Общая длина межсоединений на кристалле исчисляется километрами, а сечение проводников — десятими долями микрона. В структуре современной микросхемы уже формируется более 10 слоев металлов, в дальнейшем прогнозируется увеличение их числа до 15 слоев. Архитектура топологии современных микросхем с

многослойной металлизацией по линейным размерам и сечениям проводников представляет собой иерархическую систему. Нижний слой металла, контактирующий с полупроводниковыми областями, имеет минимальный шаг разводки. Сечение проводников верхних слоев металла, называемых глобальными, выбирается максимально возможным для микросхемы данного уровня сложности. Шаг глобальной разводки значительно превышает шаг локальной разводки.

Основные проблемы, возникающие при масштабировании в связи с формированием многослойной металлизации, состоят в следующем:

- 1) увеличение значений паразитных емкостей межслойных композиций;
- 2) рост плотности тока через соединительные шины;
- 3) рост эффективного удельного сопротивления проводников и связанное с этим паразитное падение напряжения при передаче сигнала от одного логического узла к другому;
- 4) увеличение задержки сигнала в проводниках с учетом роста их сопротивления и значений паразитных емкостей двух видов: емкости между параллельными смежными проводниками и межслойной емкости при пересечении проводников соседних слоев;
- 5) возможность возникновения перекрестных помех и искажений сигналов в несогласованных линиях.

3.6.1. Паразитные межслойные емкости

Для уменьшения взаимной емкости соединительных проводников между ними прокладывается материал с низкой диэлектрической проницаемостью так называемые low- k ($2,5 < \epsilon < 3$) и ultra low- k ($\epsilon < 2,5$) диэлектрики. Обычно это полимерные материалы (плохо выдерживают нагревание), нано-пористые материалы. При постоянной площади

кристалла доля вклада паразитных емкостей межслойных композиций может увеличиваться только при уменьшении толщины диэлектрика при масштабировании.

3.6.2. Проблемы деградации металлических шин межсоединений: электромиграция атомов

Необходимо отметить, что при проведении масштабирования плотность тока, определяемая выражением:

$$j_c = \frac{I_c}{S},$$

где I_c ток, а S площадь поперечного сечения проводника увеличивается. Действительно, при уменьшении всех размеров в n раз ток уменьшается в n раз, а площадь поперечного сечения в n^2 раз. Таким образом, плотность тока возрастает в n раз.

При больших плотностях тока возможен перенос атомов металла в сторону одного из электродов. Такой перенос называется электромиграцией. Миграция происходит в сторону положительного электрода. Очевидно, что максимальная допустимая плотность тока, протекающего по проводникам, определяется началом эффекта электромиграции. Электромиграция имеет следующее объяснение. В процессе теплового движения происходит движение ионов по междуузлиям, генерация и заполнение вакансий. Это процесс называется самодиффузия ионов. При наличии дрейфа электронов, они подталкивают ионы, в результате чего происходит направленное движение ионов. Поскольку движение ионов уравнивается тепловой диффузией, можно записать следующее одномерное уравнение, описывающее процесс электромиграции:

$$D \frac{dn(x)}{dx} = \mu_n n(x) E,$$

где D – коэффициент диффузии, μ_n – подвижность увлекаемых электронами ионов, E – напряженность электрического поля, $n(x)$ – число ионов металла на единицу длины токоведущей шины.

Используя соотношение Эйнштейна $D = \mu_n kT/e$ можно записать уравнение в виде:

$$\frac{\mu_n kT}{e} \frac{dn(x)}{dx} = \mu_n n(x) E$$

Откуда следует, что:

$$\frac{dn(x)}{n(x)} = E \frac{e}{kT} dx = \frac{E}{\varphi_T} dx$$

Как видно из решения уравнения, $n(x) = n(0) \exp(x \frac{\varphi_T}{E})$

отношение E/φ_T имеет размерность длины и характеризует длину миграции атомов металла l_M , вдоль токоведущей шины. Для того чтобы электромиграция не приводила к разрушению токоведущей шины l_M должна быть много больше, чем длина проводников в ИМС. Для алюминиевых токопроводящих шин пороговая плотность тока начала электромиграции составляет 10^4 А/см². Медные проводники, более устойчивы. Значение плотности тока, провоцирующего процесс электромиграции меди $\sim 10^6$ А/см².

3.6.3. Рост эффективного удельного сопротивления проводников

При уменьшении линейных размеров проводящих соединений эффективная удельная электропроводность

материала проводников уменьшается. Для повышения удельной электропроводности токоведущих шин, на смену алюминию в качестве материала проводника пришла медь, удельное сопротивление которой на 35 % меньше, чем у алюминия, а порог электродиффузии на порядок выше. Однако, учитывая высокий коэффициент диффузии меди в кремнии и, как следствие, необходимость предотвратить ее попадание в объем кремния, под медные проводники наносится защитный слой материала, окружающий проводник со всех сторон и препятствующий нежелательной диффузии меди. С учетом толщины защитного слоя (первые сотни ангстрем) эффективное сечение медных проводников уменьшается. Более того, при прохождении тока по проводникам столь малого сечения происходит рассеяние электронов вследствие их взаимодействия со стенками проводника и на границах зерен материала. В итоге как видно на рис. 21 эффективное удельное сопротивление материала проводника возрастает. Удельное сопротивление меди без учета механизма рассеяния составляет 2,2 мкОм·см. При шаге металлизации нижнего слоя 90 нм эффективное удельное сопротивление медного проводника более чем в полтора раза превосходит объемное удельное сопротивление меди. А при достижении шага металлизации по 22 нм оно будет превышать объемное сопротивление меди более чем в четыре раза.

Оценки значение падения напряжения на проводниках с малым сечением и высоким удельным сопротивлением показывают, что для проводника нижнего уровня с длиной равной 0,1 мм, и толщиной 0,5 мкм, при текущем токе 1 мА, падение напряжения на нем составит 0,1 В. При логическом перепаде равным 1 В, получаем 10 %-ное изменение уровня входного сигнала группы логических ячеек по отношению к выходному сигналу предыдущей группы. Т.е. падение напряжения на проводниках при передаче логических

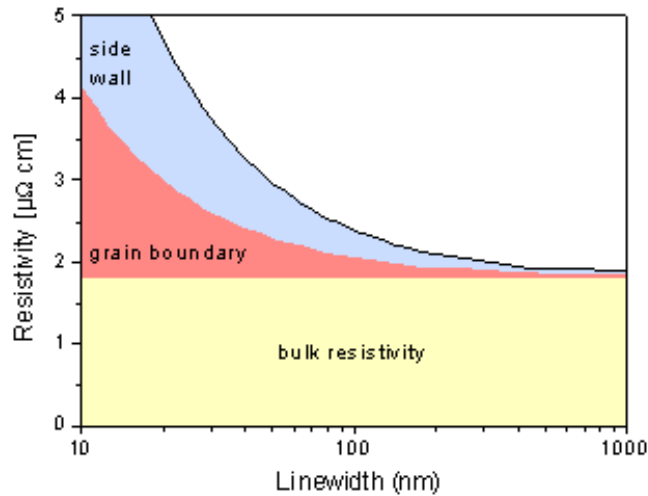


Рис. 21. Зависимость удельного сопротивления от толщины медной токовой шины.

сигналов незначительно влияет на помехоустойчивость работы интегральной схемы.

Ситуация резко меняется при масштабировании. Рассмотрим структуру с той же длиной проводника равной 0,1 мм, при уменьшении его толщины до 0,2 мкм и тока до 100 мкА. В этом случае падение напряжения составляет 0,4 В. Очевидно, что интегральная схема в этом случае практически неработоспособна.

3.6.4. Задержки сигналов в соединениях

Важнейшая характеристика соединения между двумя элементами ИМС – длительность времени τ , в течение которой импульс (или фронт импульса) пробегает по соединению. Эта длительность определяется длиной соединения и скоростью распространения электромагнитной

волны вдоль линии передачи, образованной этим соединением:

$$\tau = \frac{L\sqrt{\varepsilon}}{c}$$

где c – скорость света, ε – эффективная диэлектрическая проницаемость материала окружающего линию передачи, L – длина соединения.

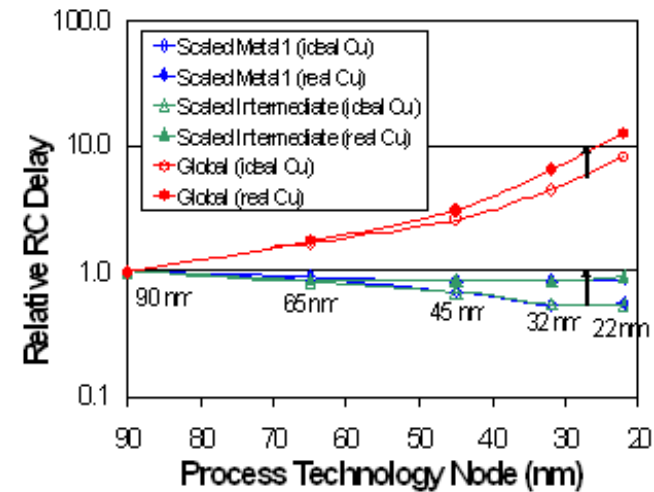


Рис. 22. Зависимость времени задержки сигнала от длины затвора.

Как видно из рис. 22 уменьшение длины затвора от 90 нм до 22 нм, может приводить к 10-кратному увеличению задержек в соединениях.

3.6.5. Искажение сигнала

Для соединительной шины L порядка 1 см и диэлектрической проницаемости ε порядка 10 значение длины задержки получается порядка $\tau = 10^{-10}$ с. Таким образом, при длительности импульса $\tau_{\text{и}} < 10^{-10}$ с (что

соответствует тактовой частоте $f_{\text{такт}} > 3 \text{ ГГц}$) возникает проблема борьбы с отражениями и искажением формы импульсов за счёт дисперсии. Уменьшение размеров ИМС облегчает борьбу с задержкой и дисперсией, поскольку становятся короче все связи внутри ИМС и между различными ИМС. Часть внутренних связей даже при весьма высокой тактовой частоте может рассматриваться RC связи, а другая часть связей, которые имеют большую длину, должны согласовываться как RLC линии передачи. Это создаёт дополнительные трудности при проектировании ИМС с высокой тактовой частотой.

Можно выделить два предельных случая, характеризующих распространение сигнала по соединениям:

- 1) Импульс, несущий информацию ($\tau_{\text{и}}$), длиннее времени пробега по связи. $\tau_{\text{и}} > \tau$. В этом случае соединение может рассматриваться как RC цепь, а задержка сигнала определяется временем заряда ёмкости C через сопротивление R . Очевидно, что это время пропорционально квадрату длины соединения, так как и ёмкость связи и её сопротивление пропорциональны длине.
- 2) Импульс короче времени пробега по связи $\tau_{\text{и}} < \tau$. В этом случае шину следует рассматривать как RLC линию передачи, и тогда практически все вопросы задержки и искажения импульсных сигналов смыкаются с вопросами передачи сигналов по линиям связи, которые решаются техникой сверхвысоких частот (СВЧ).

Если длительность импульса короче, чем время распространения по линии, то возможно возникновение отражения. Многократное отражение импульсов может привести к нарушению работы схемы. При наличии больших полей рассеяния фазовая скорость волны в линии становится

функцией частоты. При этом возникает искажение формы импульса, показанное на рис. 23.

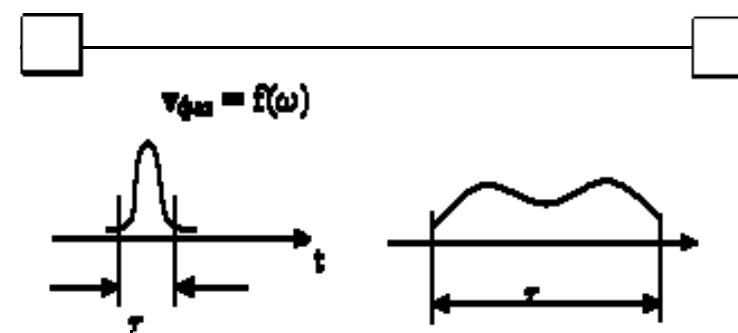


Рис. 23. Искажение формы короткого импульса при его передаче по длинной соединительной шине.

3.6.6. Наведенные сигналы (помехи)

С ростом быстродействия и количества транзисторов, несмотря на снижаемые коммутируемые ими токи, все сильнее начинает проявлять себя генерируемые такими устройствами (процессорами, контроллерами-мостами, памятью) помехи. Импульсы тока создают на индуктивностях цепей, по которым они протекают, ЭДС самоиндукции ($U_{\text{си}}$) имеющую амплитуду определяемую скоростью нарастания тока и индуктивностью цепи, по которой он протекает:

$$U_{\text{си}} = L \, di/dt$$

Это напряжение имеет широкий спектральный состав. Верхняя граница спектра генерируемых процессором помех определяется длительностью фронта импульса тока:

$$f_{\text{гр}} = 1/2\pi \, t_{\text{фр}}$$

Для одиночных импульсов спектр непрерывный и содержит все частоты от $f_{гр}$ до 0, а спектр повторяющихся импульсов содержит множество частот от частоты повторения до $f_{гр}$. Причем $f_{гр}$, уже при 130 и 90 нм техпроцессах, приближается к тактовой частоте ядра процессора. Для множества независимых источников шумов, согласно правилу сложения мощностей, суммарная мощность помехи равна сумме мощностей элементарных источников. Следовательно, мощность генерируемой помехи, пропорциональна числу транзисторов, для данной технологической нормы. Уже в настоящее время максимальная мощность помех генерируемых процессором в худшем случае может достигать 25 процентов потребляемой процессором мощности, реально, когда приняты меры для снижения индуктивности линий распределения питания, она составляет 10-15 процентов. Но при потребляемой мощности современных процессоров 95 – 130 Вт мощность помехи может в принципе доходить до 23 – 32 Вт, а реально составлять 12 – 16 Вт. Помимо наведения помех эта переходит в тепло. Проблема усугубляется по мере углубления масштабирования.

Получены расчетные данные по критическим длинам проводников разводки нижних слоев и глобальной разводки, когда на проводнике за счет перекрестных помех от соседних параллельно расположенных проводников наводится 25 % от величины переключаемого напряжения. Если при шаге металлизации 136 нм критическую длину проводника слоя локальной разводки в 100 мкм еще можно принять как допустимую, то для глобальных соединений, длина которых должна быть соизмеримой с линейным размером микросхемы, критическая длина проводника в 127 мкм при шаге металлизации 210 нм явно недопустима. Проблема усугубляется по мере углубления масштабирования [19].

Таким образом, дальнейший рост производительности и функциональных возможностей микропроцессоров, мультипроцессорных ЭВМ, нейросистем и нейрокомпьютеров сдерживается влиянием межсоединений как внутри кристалла плотноупакованных УБИС, так и между кристаллами.

По всей вероятности, в процессе дальнейшего развития ИМС традиционная разводка будет заменена одним из альтернативных вариантов межсоединений – радиочастотным или оптическим.

3.6.7. Перспективные методы соединений

Одним из вариантов организации глобальных межсоединений может стать радиочастотная передача сигналов от одной части микросхемы в другую. Это приведет к возникновению в микросхеме своего рода локальной сети с передатчиками и приемниками, которые генерируют и принимают сигналы антенн.

Другой возможный и гораздо более перспективный, метод передачи сигналов – оптический. Пример архитектурного решения, в котором используется как металлическая, так и оптическая связь показан на рис. 24. В такой микросхеме отдельные ядра соединены оптическими каналами, а внутри каждого ядра используются металлические соединения. Другой вариант микросхемы будущего, предложенные в работе [25] (см. рис. 25) предусматривает вывод сигнала из микросхемы по оптоволокну.

В идеале для оптической передачи информации в микросхеме должны быть монолитный излучатель, сигнал которого распространяется в свободном пространстве или по оптическим соединениям (волноводам) модулятор сигнала и детектор [26].

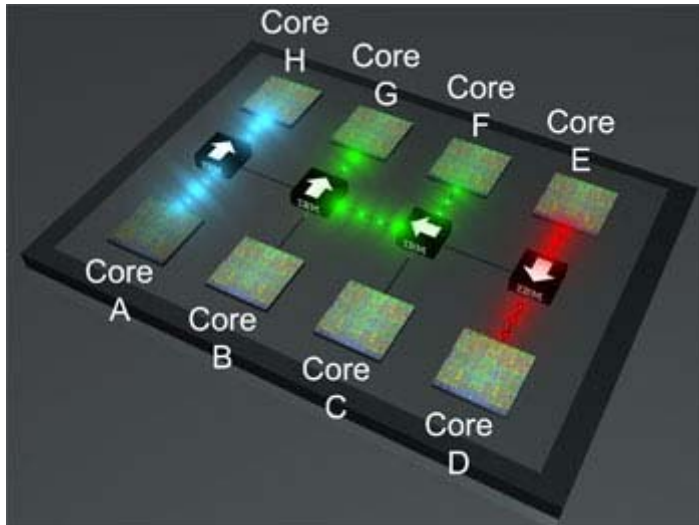


Рис. 24. Оптическая связь между ядрами внутри ИМС.

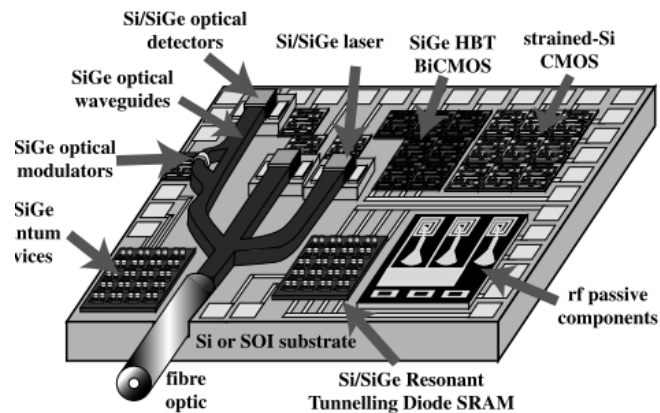


Рис. 25. Оптический вывод сигнала по оптоволокну, предложенный в работе [25].

К настоящему времени почти все эти элементы могут быть изготовлены по технологии, совместимой с изготовлением кремниевых ИМС. Детекторы на основе

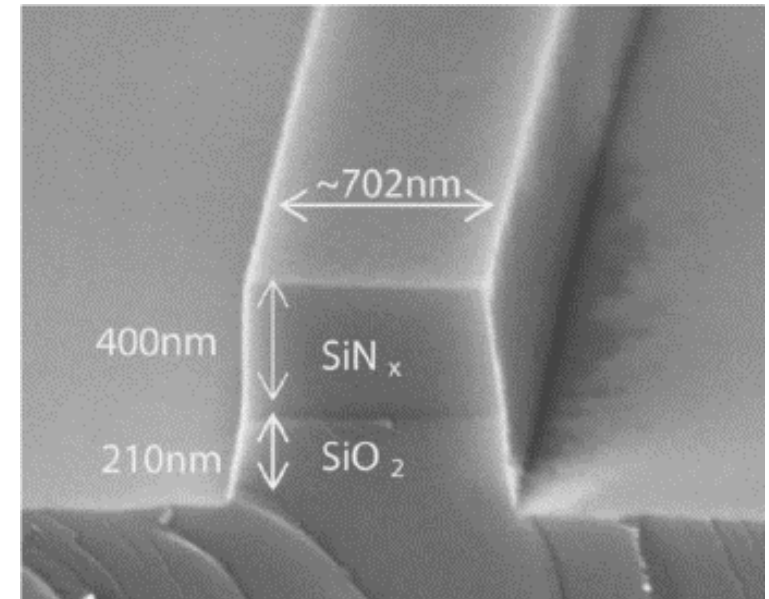


Рис. 26. Поперечный срез волноводной структуры, изготовленной по «кремниевой» технологии, полученный в просвечивающем электронном микроскопе.

кремниевых диодов известны уже более 50 лет. Поперечный срез волноводной структуры на кремниевой подложке, полученный в просвечивающем электронном микроскопе показан на рис. 26. Видно, что все материалы для изготовления этой структуры (SiO_2 , SiN_x) давно используются в технологическом процессе производства ИМС.

Что касается попытки использования кремния для изготовления оптических излучателей и модуляторов, то работы, в ведущиеся в этом направлении долгое время не

приносили ожидаемых результатов. Это связано с тем, что с одной стороны, особенностей структуры запрещенной зоны кристаллической решетки кремния рекомбинация зарядов в нем приводит в основном к тепловыделению, а не к излучению фотонов, что не позволяет использовать его для создания полупроводниковых лазеров, являющихся источниками когерентного излучения. С другой стороны, кремний, к сожалению, не обладает линейным электрооптическим эффектом Поккельса, на основе которого построены традиционные быстрые оптические модуляторы. Эффект Поккельса заключается в изменении коэффициента преломления света в кристалле под воздействием приложенного электрического поля. Именно за счет этого эффекта в таких веществах, как, например, ниобат лития (LiNbO_3), возможно осуществлять модуляцию света, поскольку изменение коэффициента преломления вещества соответствующим образом приводит к изменению фазы проходящего излучения.

Эффект Поккельса проявляется только у пьезоэлектриков и за счет малой инертности теоретически позволяет осуществлять модуляцию света вплоть до частот 10 ТГц. Кроме того, вследствие линейной зависимости между показателем преломления и напряженностью электрического поля нелинейные искажения при модуляции света относительно невелики.

Другие оптические модуляторы основаны на таких эффектах, как электропоглощение (electro-absorption) или электропреломление (electro-refraction) света под воздействием приложенного электрического поля, однако и эти эффекты в кремнии выражены слабо.

Модуляция световой волны в кремнии может быть получена на основе термоэффекта. То есть при изменении температуры кремния меняются его коэффициент преломления и коэффициент поглощения света. Тем не

менее, из-за наличия гистерезиса такие модуляторы достаточно медленны и не позволяют получать скорость модуляции выше нескольких килогерц.

Другой способ модуляции излучения на основе кремниевых модуляторов основан на эффекте поглощения света на свободных носителях (дырках или электронах). Этот способ модуляции также не позволяет получить высоких скоростей, поскольку связан с физическим движением зарядов внутри кремниевого модулятора, что само по себе является медленным процессом. В то же время стоит отметить, что кремниевые модуляторы на основе описанного эффекта теоретически могут поддерживать скорость модуляции вплоть до 1 ГГц, однако на практике пока реализованы модуляторы лишь со скоростью до 20 МГц.

Несмотря на все сложности использования кремния в качестве материала для оптических цепей, в последнее время наметились существенные сдвиги в этом направлении. Как выяснилось, легирование кремния эрбием (Er) позволяет таким образом изменить структуру запрещенной зоны, что рекомбинация зарядов будет сопровождаться излучением фотонов, то есть кремний можно использовать для создания полупроводниковых лазеров. Так, относительно недавно компания ST Microelectronics объявила о создании первого коммерческого лазера на основе кремния. Кроме того, перспективным является применение полупроводниковых перестраиваемых лазеров, продемонстрированных компанией Intel еще в 2002 году. Такие лазеры, использующие в качестве резонатора интерферометр Фабри-Перо, излучают на нескольких частотах (многомодовый режим). Для выделения монохроматического излучения служат специальные внешние фильтры на основе дифракционных решеток (дисперсионные фильтры). Получаемая система лазера с внешним дисперсионным резонатором позволяет перестраивать длину волны

излучения. Традиционно для получения требуемой длины волны используется прецизионная настройка фильтров относительно резонатора. В корпорации Intel смогли создать перестраиваемый лазер, в котором вообще отсутствуют подвижные части. Он состоит из недорогого многомодового лазера с решеткой, внедренной внутрь волновода. Изменяя температуру решетки, можно настраиваться на

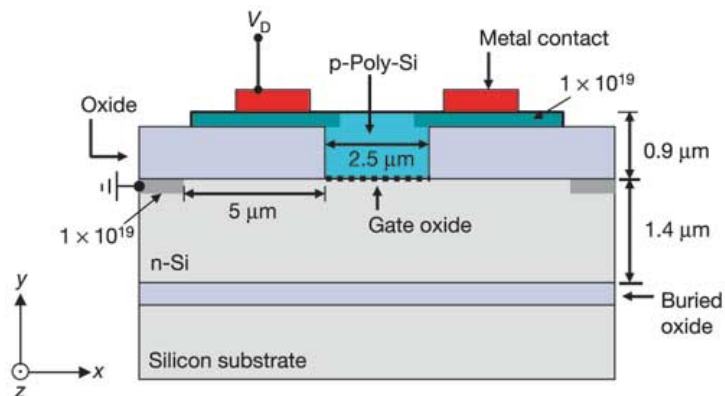


Рис. 27. Оптический фазовый модулятор, изготовленные по кремниевой технологии фирмой Intel.

определенную длину волны, то есть осуществлять переключение между отдельными модами лазера.

Другим перспективным направлением создания светоизлучающих элементов в ИМС является внедрение в существующие кремниевые схемы устройств из полупроводников группы III–V. Одной из основных проблем, на этом пути является высокая температура. Выращивание полупроводников группы III–V традиционно проводится при высоких температурах – порядка 700 °C или больше; кремниевые схемы при такой температуре были бы просто уничтожены.

Тем не менее, в работе [27] удалось найти метод позволяет выращивания наностержней из арсенида индия и галлия (полупроводник группы III–V) на поверхности кремния при относительно низкой температуре в 400 °C. Для этого использовалась химическая технология осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы, уже хорошо отработанная индустрией при создании тонких полупроводниковых плёнок для солнечных батарей и современных светодиодов.

Расположенные на кремниевой подложке наностержни способны генерировать лазерное излучение в ближней инфракрасной области спектра. Эти шестиугольные (что обусловлено атомной структурой арсенида индия и галлия) структуры шириной порядка 500 нм и высотой в несколько микрометров работают как относительно эффективные оптические резонаторы. Свет, пойманный в такой резонатор, отражается между «верхней» и «нижней» частями структуры, при этом его интенсивность увеличивается. Маленький размер позволит плотно упаковывать нанолазеры на оптической схеме. Система с высокой производительностью будет занимать очень мало места и потреблять мало энергии. Это первый в истории опыт интеграции нанолазеров на основе полупроводников III–V в кремниевые схемы по методу сборки «снизу вверх», способен подстегнуть назревающую оптоэлектронную революцию в вычислительной технике.

Кроме того, Intel удалось создать кремниевый сверхскоростной оптический модулятор. Этот модулятор основан на эффекте рассеивания света на свободных носителях заряда и по своей структуре во многом напоминает CMOS-транзистор на основе технологии кремний на изоляторе. Структура оптического фазового модулятора показана на рис. 27.

На подложке кристаллического кремния со слоем изолятора (диоксида кремния) располагается слой кристаллического кремния n -типа толщиной 1,4 мкм. Далее следует слой диоксида кремния толщиной 0,9 мкм, в центре которого располагается слой поликристаллического кремния p -типа толщиной 0,9 мкм и шириной 2,5 мкм, который выполняет функцию волновода. Этот слой отделен от кристаллического кремния n -типа тончайшим слоем изолятора (диэлектрик затвора), толщиной всего 12 нм. Для того чтобы минимизировать рассеивание света за счет контакта с металлом, металлические контакты отделены от слоя оксида кремния тонким слоем поликристаллического кремния шириной 10,5 мкм с обеих сторон от волновода. Когда к управляющему электроду прикладывается положительное напряжение, по обеим сторонам диэлектрика затвора индуцируется заряд, причем со стороны волновода (поликристаллический кремний p -типа) — это дырки, а со стороны кремния n -типа — свободные электроны. Концентрация индуцированных под воздействием поля дырок и электронов одинакова и прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна толщине слоя диэлектрика затвора:

$$\Delta n = \Delta p = \frac{\varepsilon}{e \cdot t_{ox} \cdot t} [V - V_{FB}]$$

где t_{ox} — толщина слоя диэлектрика затвора, $t \gg 10$ нм — толщина слоя индуцированного заряда, а $V_{FB} = 1,25$ В — пороговое напряжение.

В присутствии свободных зарядов в кремнии изменяется коэффициент преломления кремния. Причем изменение коэффициента преломления при прохождении света с длиной волны 1,55 мкм (инфракрасное излучение, прозрачное для кремния), вызванное избыточной концентрацией дырок и электронов, различное. Изменение коэффициента

преломления вызывает, в свою очередь, фазовый сдвиг проходящей световой волны:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L$$

где L — длина активной части оптического модулятора, — λ — длина волны света, n_{eff} — эффективное изменение коэффициента преломления кремния, которое определяется как разность коэффициентов преломления до и после накопления заряда.

Рассмотренный выше модулятор позволяет производить именно фазовую модуляцию опорного сигнала. Для того чтобы превратить фазовую модуляцию в амплитудную

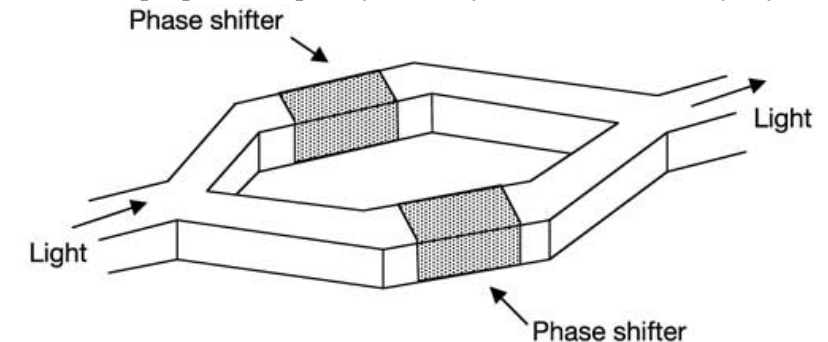


Рис. 28 Интерферометр Маха-Зендера (MZI), состоящий из двух плеч, в каждом из которых интегрирован фазовый оптический модулятор.

(сигнал, модулированный по фазе, трудно детектировать в отсутствие опорного сигнала), в оптическом модуляторе дополнительно используется интерферометр Маха-Зендера (рис. 28), состоящий из двух плеч, в каждом из которых интегрирован фазовый оптический модулятор.

Использование фазовых оптических модуляторов в обоих плечах интерферометра позволяет обеспечить равенство

оптических длин плеч интерферометров. Опорная световая волна, распространяющаяся по оптоволокну, разделяется с помощью Y-разветвителя на две когерентные волны, каждая из которых распространяется по одному из плеч интерферометра. Если в точке соединения плеч интерферометра обе волны синфазны, то в результате сложения этих волн получится та же волна (потери в данном случае пренебрегаем), что и до интерферометра (конструктивная интерференция). Если же волны складываются в противофазе (деструктивная интерференция), то результирующий сигнал будет иметь нулевую амплитуду. Такой подход позволяет осуществлять амплитудную модуляцию несущего сигнала — прикладывая напряжение к одному из фазовых модуляторов, фазу волны в одном из плеч интерферометра меняют на π или не меняют вовсе, обеспечивая тем самым условие для деструктивной или конструктивной интерференции.

Таким образом, прикладывая напряжение к фазовому модулятору с частотой f , можно осуществлять амплитудную модуляцию сигнала с той же самой частотой f . Как уже отмечалось, оптический модулятор компании Intel способен модулировать излучение на скорости 1 ГГц. Однако это не предел. В корпорации Intel полагают, что в недалеком будущем полоса пропускания оптических систем на кремниевой основе составит 40 Гбит/с.

3.7. Энерговыделение и теплоотвод

Повышение степени интеграции связанное с уменьшением, как размеров самих элементов, так и расстояний между ними, что ведет к увеличению удельной мощности рассеивания и ограничивает плотность размещения элементов на подложке. Суммарная мощность, рассеиваемая ИМС определяется суммой [28]:

$$P_{\Sigma} \approx N C_{\Sigma} f U_{\Pi}^2 + I_{T} U_{\Pi}$$

Первый член описывает выделение мощности при переключении N транзисторов (C_{Σ} суммарная емкость транзистора) с частотой f и напряжением питания U_{Π} , второй выделение мощности за счет всевозможных токов утечки,

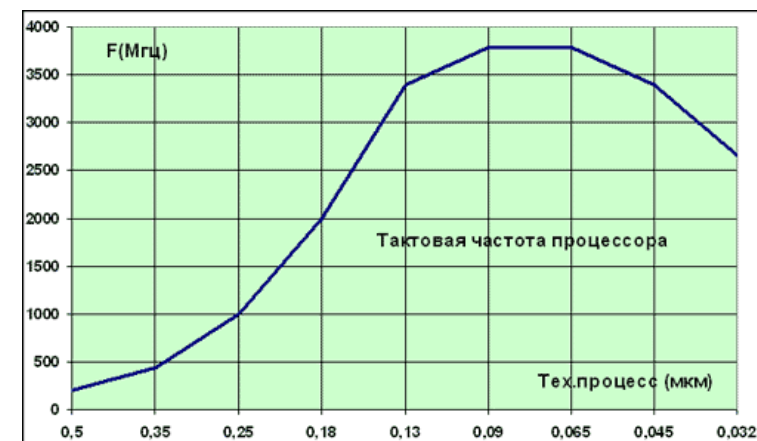


Рис. 29. Зависимость тактовой частоты процессора от размера транзистора.

состоящих главным образом из I_3 - тока прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик и $I_{и-с}$ - тока прямого туннелирования «исток-сток». Оценки показывают, что основной вклад в тепловыделение вносит первый член. При $N=10^9 \text{ см}^{-2}$ и $C_{\Sigma} = 5 \times 10^{-17} \text{ Ф}$, $U_{\Pi}=1 \text{ В}$, $f=1 \text{ ГГц}$, выделение тепла получается 50 Вт/см^2 , и это при том, что без принудительного охлаждения материал ИМС кремний позволяет отводить не более 1 Вт/см^2 . Именно тепловыделение главным образом ограничивает в настоящее время рост частоты микропроцессоров как это видно на рис. 29, несмотря на то, что уменьшение длины затвора

транзистора в ИМС влечет за собой увеличение скорости его переключения.

Пассивное воздушное охлаждение с использованием радиаторов, позволяет снимать с ИМС мощность до $P = 60-85 \text{ Вт/см}^2$. А принудительное водяное охлаждение кристалла процессора водой (например, система Power 6,65 нм, состоящая из 5104 микроканалов шириной 30-50 мкм) позволяет повысить теплотем до $P = 400 \text{ Вт/см}^2$. Между тем, повышение количества транзисторов до $5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ при частоте работы 4 ГГц приведет к росту тепловыделения до 1 кВт/см^2 , что сравнимо с тепловыделением топливного элемента ядерного реактора.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ НА ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ИМС.

4.1. Предельные возможности литографии.

Одним из основных приёмов планарной технологии, используемой в производстве полупроводниковых приборов является литография. Литография – это метод переноса

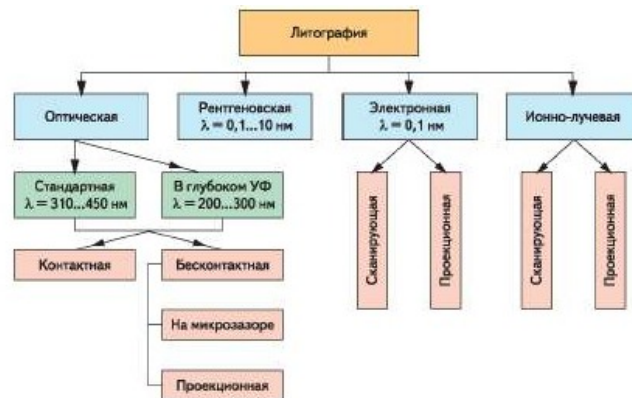


Рис. 30. Классификация литографических схем.

рисунка с шаблонов на кремниевые пластины. В зависимости

от длины волны применяемого излучения различают оптическую, рентгеновскую, электронную или ионную литографию. Как показано на рис. 30. Несмотря на разнообразие литографических схем (фотолитография, ионная литография, электронная литография) основа процесса везде одна и та же. Структура покрывается тонким (0,1 –10 мкм) слоем резиста – сложной полимерной свето-(ионо-, электроно-) чувствительной композиции. При фотолитографии пучок видимого или ультрафиолетового свет падает на резист через маску нужной формы. При электронной (ионной) литографии пучок электронов (ионов) фокусируется в точку малого диаметра (1-100 нм) с помощью магнитных линз и затем сканирует по поверхности, покрытой резистом отрисовывая необходимую конфигурацию наноструктуры. Резист, у которого растворимость обработанного участка в органических растворителях уменьшается, называется негативным, а резист, растворимость которого после облучения возрастает – позитивным. После обработки, структура помещается в растворитель удаляющий растворимые участки резиста. В результате на поверхности структуры образуется рельефное изображение, устойчивое к воздействию технологических факторов, в частности кислот, с помощью которых стравливается полупроводниковая структура. Наименьшие размеры отдельных деталей, которые требуются для изготовления наноструктур, ограничены разрешающей способностью литографических устройств [29].

На протяжении всего времени существования и развития микроэлектроники прогресс в уменьшении размеров транзисторов достигался исключительно применением фотолитографии. Ее совершенствование — основная движущая сила уменьшения размера транзисторов. Степень владения методами фотолитографии в настоящее время предопределяет технический уровень и производственные

возможности фирм, разрабатывающих и выпускающих интегральные схемы и другие полупроводниковые электронные приборы. Важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования изображений является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов. Наиболее успешным методом создания микрорисунка оказался проекционный перенос изображения с уменьшением масштаба. Минимальная ширина линии в нём определяется дифракционным пределом оптической системы, описываемым критерием Релея-Аббе. Реальное пространственное разрешение R литографической системы может быть описано формулой:

$$R = \frac{k_1 \cdot \lambda}{NA},$$

где k_1 коэффициент, отражающий несовершенство систем передачи изображения, дифракционные эффекты, несовершенство регистрирующей среды (резиста), NA численная апертура. Для широко используемого в настоящее время излучения эксимерного ArF лазера с длиной волны 193 нм удается получить $NA = 0,95$ и $k_1 = 0,25$. При этих значениях пространственное разрешение $R = 50$ нм, т.е. $R \approx \lambda/4$.

4.1.1. Иммерсионная литография $\lambda = 193$ нм

Для повышения пространственного разрешения литографического процесса широко используется способ, основанный на увеличении NA . Он заключается в том, что в литографическом процессе применяют иммерсионные объективы. В этом случае между объектом и объективом помещают жидкость с высоким показателем преломления (n),

как показано на рис. 31. Принято считать, что первыми добиться успеха здесь удалось группе профессора Рочестерского технологического института Брюса Смита [30], показавшей, что вполне применимой иммерсионной жидкостью является простая вода. Вода прозрачна на длине волны 193 нм и имеет коэффициент преломления 1,44. Соответственно, длина волны эксимерного лазера в иммерсионной среде составляет не 193 нм, а 134 нм. Числовая апертура объектива может быть сосчитана как $NA = n \sin \alpha$. Для воды $NA_{im} = 1,35$, что приводит к уменьшению R до ~ 37 нм, т.е. $R \approx \lambda/5$.

Применение жидкостей с большими $n \sim 1,8$, позволяет

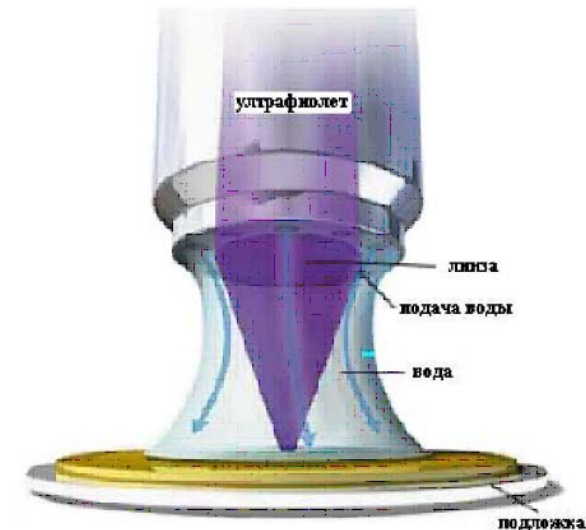


Рис. 31. Иммерсионный объектив.

уменьшить R до ~ 28 нм, т.е. $R \approx \lambda/6$.

Однако при использовании иммерсионных объективов возникают дополнительные источники дефектов, такие как пузырьки и капли как это видно из рис. 32.

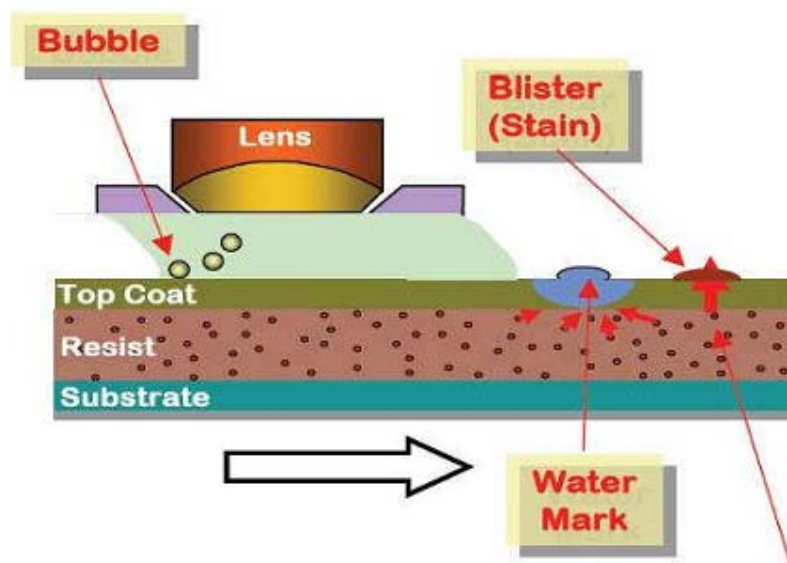


Рис. 32. Источники образования дефектов, при использовании иммерсионной фотолитографии: пузырьки растворенных в жидкости газов и водяные капли на резисте.

Использование воды привело к существенному падению выхода годных чипов по причине выделения растворённых в ней газов в форме пузырьков, что заставляло некоторые фирмы до последнего времени воздерживаться от иммерсирования – пока не нашлись достаточно эффективные средства борьбы их образованием.

4.1.2. Двойное создание микрорисунка

Наилучшие достижения в уменьшении критических размеров элементов ИМС связано с применением двойного экспонирования и двойного «паттернирования» [31]. Схемы процессов показаны на рис. 33. Двойное экспонирование сводится к применению двух фотошаблонов с различными, дополняющими друг друга микрорисунками при

экспонировании одного и того же слоя фоторезиста. Двойное «паттернирование» это более радикальный приём, он состоит в поочерёдном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, задаваемых парой согласованных фотошаблонов, притом фоторезист наносится, экспонируется и проявляется дважды, образуя два встроенных один в другой микрорисунка («pattern»). С использованием двух

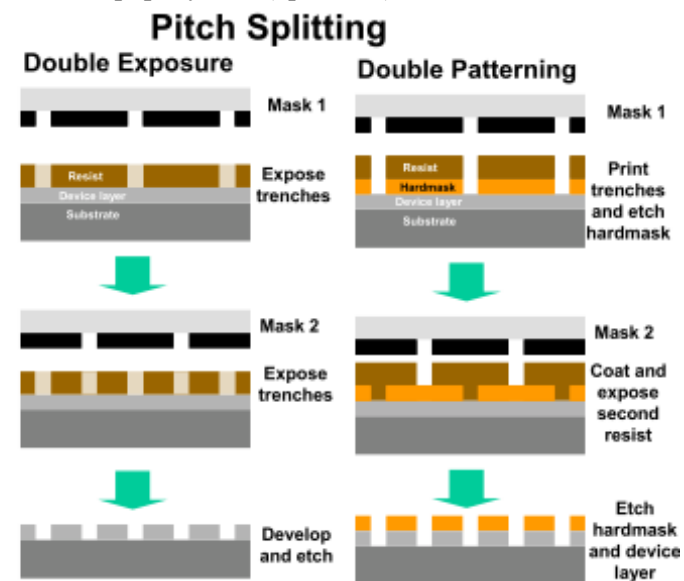


Рис. 33. Схема двойного экспонирования (1) и двойного «паттернирования» (2).

двойных экспозиций удалось получить длину канала 9 нм. Этот результат показывает, что практически любой стандарт, начиная от 10 нм, может быть, в принципе, реализован в рамках традиционной оптической литографии.

4.1.3. Экстремальная ультрафиолетовая литография

Для дальнейшего уменьшения R предлагается применение источников излучения с длиной волны

13,5 нанометров (extreme ultraviolet lithography – экстремальная ультрафиолетовая литография ЭУФЛ), получаемое при лазерном возбуждении плазмы в электрическом разряде [32]. Схема получения такого излучения показана на рис. 34.

DISCHARGE-PRODUCED PLASMA

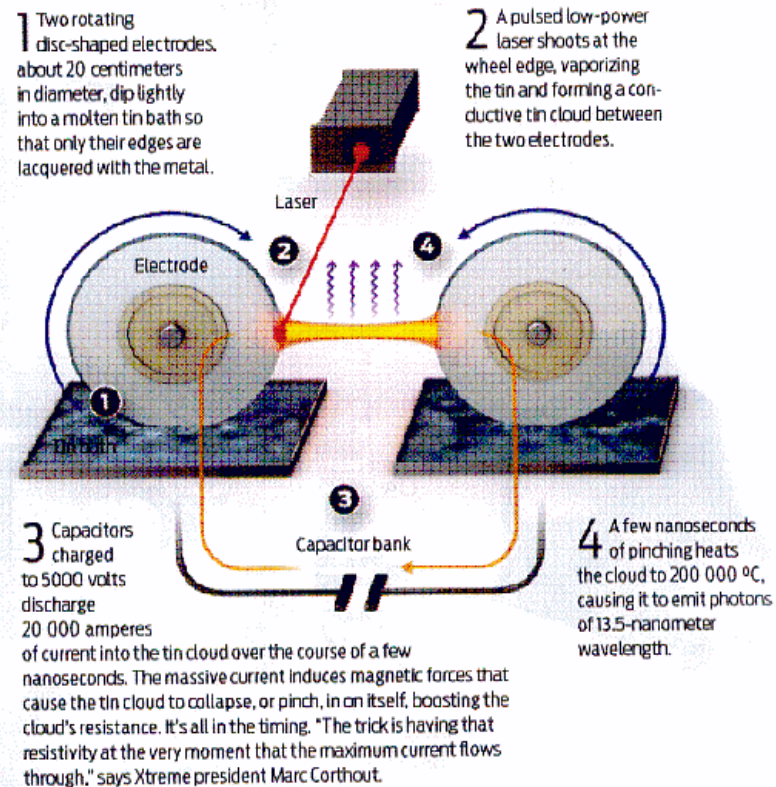


Рис. 34. Установка для получения экстремального ультрафиолетового излучения.

Электрический разряд, создающий высокоионизированную плазму с характерной температурой

превышающей 10 эВ загорается между двумя дисковыми электродами, вращающимися в ёмкостях с жидким оловом. К сожалению, предложенная конструкция работает только в лабораторном варианте. Высокая нестабильность излучения препятствует ее внедрению в массовое производство. Однако работа над ЭУФЛ продолжается, поскольку она обладает несомненными преимуществами, поскольку является оптической и проекционной, и может быть использована для нескольких новых поколений ИМС. Ожидаемые значения параметров для ЭУФЛ: $NA = 0,25 - 0,40$; $k_1 = 0,6 - 0,4$, что позволит получать значения $R = 32 - 12$ нм.

Изучается возможность применения неоптических методов литографии. В частности, очень маленькие элементы позволяет формировать электроннолучевая литография, так как длина волны электронов составляет всего около 0,01 нм. Электроннолучевая литография давно используется для изготовления масок и низкоскоростного экспонирования.

Однако изготовление сложных схем с применением электроннолучевой литографии потребует гораздо большей скорости экспонирования. Основные проблемы, подлежащие решению, связаны с совмещением полей (для покрытия одного кристалла требуется несколько масок), целостностью масок и их стоимостью.

Вероятность широкого применения других литографических методов: ионно-лучевой литографии и литографии, основанная на излучении быстрых электронов в производстве ИМС мала, а на осуществление соответствующих проектов требуются крупные инвестиции. Вывод – развитие литографии, основной составляющей закона Мура, столкнется в ближайшие годы с огромными проблемами. В частности, потребуются радикальные изменения, чтобы перейти к меньшим длинам волны излучения в оптических видах литографии. Исследования в области неоптических типов литографии пока находятся на

слишком ранней стадии. Наибольший риск здесь в том, что стоимость новой системы перекроет обеспечиваемые ею преимущества в плотности упаковки элементов. В то время как стоимость излучающей системы может быть амортизирована за счет массового производства, расходы на изготовление масок должны окупаться на каждом изделии.

4.2. Проблемы травления

Одной из ключевых операций в производстве полупроводниковых транзисторов и интегральных микросхем является формирование микроструктуры различных функциональных слоев при помощи травления через маску, сформированную в слое фоторезиста, причем в последние годы в большинстве технологических операций произошло вытеснение традиционного жидкостного химического травления различными методами “сухого” ионно-плазменного травления в вакууме.

Наиболее распространенными из них являются ионно-лучевое травление (ИЛТ), реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ), плазмо-химическое травление (ПХТ) [33]. В качестве рабочих веществ для травления используются главным образом галогеносодержащие газы (или легколетучие жидкости), а также кислород и водород. Кислород и галогены – сильные окислители, водород – эффективный восстановитель. Реактивные частицы, образующиеся в плазме этих веществ, способны взаимодействовать практически со всеми материалами. Для наиболее востребованного для производства микросхем метода ПХТ часто используют смеси химически активных газов или смеси химически активных и инертных газов.

Травление материалов (твердых тел) осуществляется в результате гетерогенных химических реакций на границе раздела фаз: газоразрядная плазма – поверхность

обрабатываемого материала. Эти процессы состоят из следующих стадий:

- 1) транспорт реактивных частиц плазмы к поверхности обрабатываемого материала;
- 2) адсорбция реактивных частиц на поверхности;
- 3) собственно химическая реакция с образованием летучего

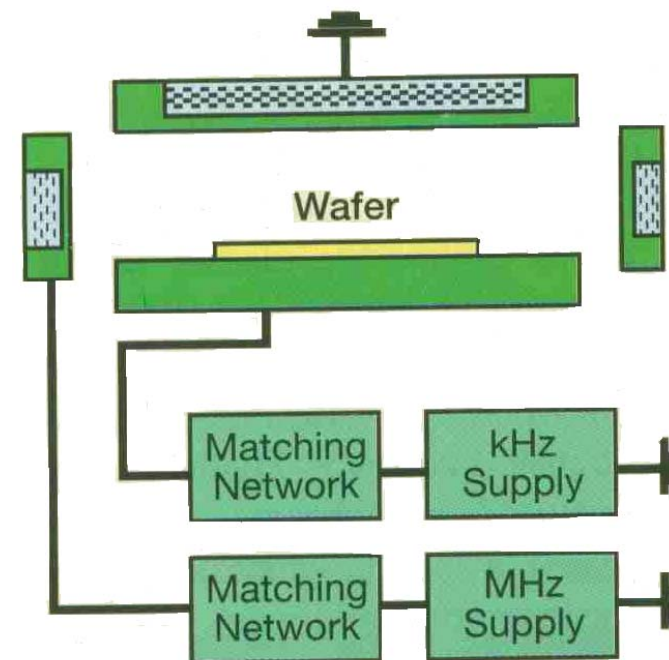


Рис. 35. Плазмохимический реактор: стенки реактора заземлены.

- соединения;
- 4) десорбция молекул продукта реакции с поверхности;
- 5) удаление молекул продукта реакции из приповерхностной области.

Скорость процесса в целом определяется скоростью наиболее медленной (лимитирующей) стадии.

В производстве травление в плазме осуществляется, как правило, плазмохимическом реакторе, (рис. 35). Основными параметрами процесса травления, которые определяют его скорость и селективность являются рабочее давление p , расход рабочих газов Q , мощность W источника высокочастотного электромагнитного поля и температура обрабатываемого материала T .

Уменьшение минимального размера элементов ИМС и применение многослойной системы разводки соединений предъявляют все более сложные требования к параметрам технологических процессов. Это, прежде всего процессы размерного травления отдельных слоев субмикронных структур, когда травится пленка материала на подложке из другого материала через маску из третьего материала, а также травление глубоких канавок в кремнии. Основные проблемы, которые при этом возникают селективность (избирательность) и анизотропность (направленность) травления, скорость травления и радиационные повреждения приповерхностного слоя монокристаллического полупроводника.

Высокая селективность может быть достигнута только точным подбором взаимодействующих с материалом химически активных частиц и соответствующих условий проведения процесса. Получение высокой селективности процессов ПХТ является достаточно сложной задачей, что связано с многообразием образующихся в плазме химически активных частиц и трудностью управления их концентрациями.

Анизотропность (направленность) процесса травления может быть определена как отношение глубины травления к размеру подтравливания под маску, через которую травится структура, или как отношение скоростей травления материала в направлениях перпендикулярном V_x и параллельном V_z поверхности, которое называется

показателем анизотропии $A = V_x/V_z$. В идеале желательно иметь профиль травления структуры с вертикальными

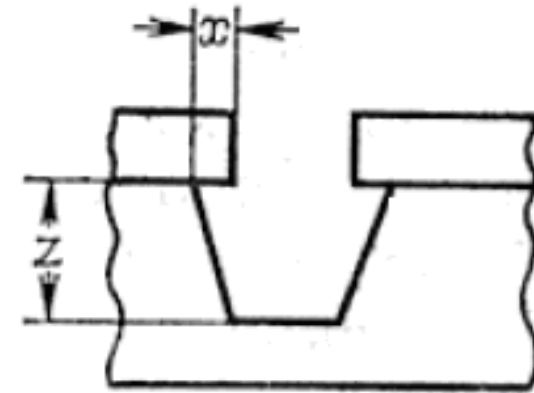


Рис. 36. Профиль канавки при анизотропном травлении.

стенками. Практически реализуется профиль, в котором стенки вытравленной структуры имеют определенный (в зависимости от показателя анизотропии) наклон относительно нормали к поверхности (рис. 36) [34].

В связи с необходимостью создания глубоких канавок, для боковой диэлектрической изоляции, формирования в них конденсаторов в УБИС и других целей, появилась проблема глубокого анизотропного травления кремния. К форме глубоких канавок предъявляются весьма жесткие требования, обусловленные последующими технологическими процессами окисления стенок канавки и/или их заполнением, например, поликристаллическим кремнием. Поэтому стенки канавок должны быть гладкими, вертикальными, а дно должно быть закругленным без острых углов. Из указанных требований следует, что основной проблемой создания глубоких канавок является реализация высокой анизотропии

травления. Другой проблемой при получении глубоких канавок является ограничение глубины травления при фиксированной ширине канавки. Основные механизмы, ограничивающие глубину травления аппретурный эффект, заключающийся в уменьшении скорости травления с увеличением отношения глубины канавки к ее ширине, и эффекты локального электрического поля, такие как, например, влияние электрического поля, создаваемого краем канавки на проникновение в канавку заряженных ионов.

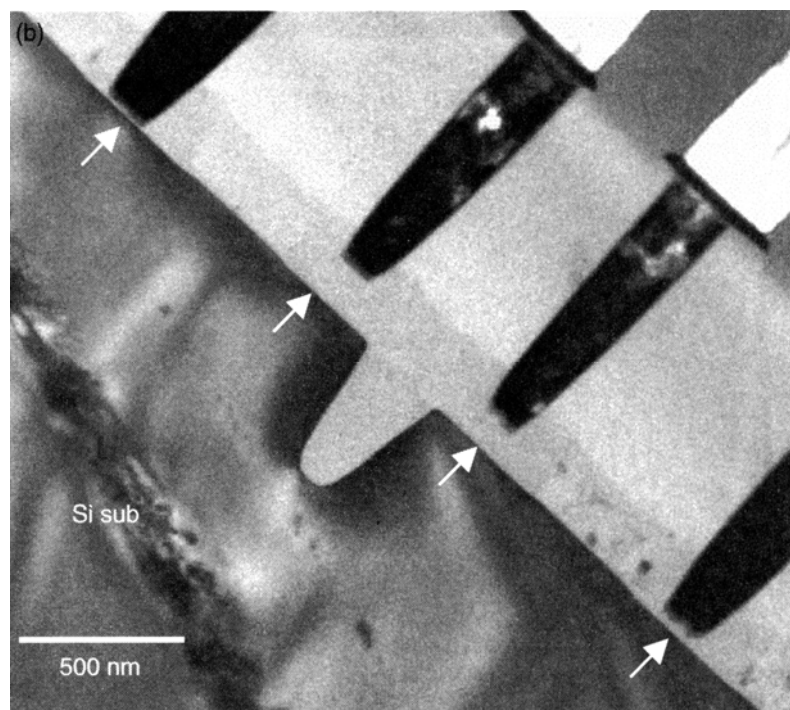


Рис. 37. Неоднородность глубины травления канавок в различных точках структуры.

Типичной проблемой при производстве интегральных схем является определение момента окончания процесса травления. Это особенно важно при создании приборов с

субмикронными размерами, где требуется травление с очень малыми допусками. Отсутствие повторяемости характеристик образцов и условий обработки не позволяют с достаточной точностью определять момент завершения процесса по времени обработки.

Широко распространенным методом контроля процесса травления является оптическая эмиссионная спектроскопия. Этот метод основан на регистрации оптического спектра собственного излучения возбужденных в плазме атомов и молекул. Основное преимущество эмиссионной спектроскопии состоит в том, что излучение плазмы может наблюдаться вне реакционной камеры через кварцевые или стеклянные окна без вмешательства в физико-химические процессы, происходящие внутри камеры. Для контроля процесса регистрируются эмиссионные линии реагентов или продуктов реакции. Момент окончания травления фиксируется по изменению интенсивности соответствующих эмиссионных линий, т.е. по изменению концентрации реагентов или продуктов реакции.

Еще одной проблемой является неоднородность травления по площади структуры. На рис. 37 видно. Что глубина травления канавок в различных точках структуры слегка отличается.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИМС

Общий вывод, который очевиден после рассмотрения только части проблем, возникающих при глубоком масштабировании интегральных схем, заключается в том, что пятидесятилетняя эра классической микроэлектроники завершается, и на смену ей должна прийти электроника, основанная на квантоворазмерных эффектах. Микроминиатюризация интегральных схем потребовала колоссальных усилий разработчиков в области всех аспектов развития изделий: проектирования, технологии, создания

нового оборудования, применения новых материалов, организации производства. Тем не менее, сегодня все яснее проявляется предел "работы" физических принципов, на которых основана классическая микроэлектроника. Этот предел может быть достигнут к началу третьего десятилетия XXI века. Прогноз развития полупроводниковой технологии периодически публикуется в International Technology Roadmap for Semiconductors [35]. В этом документе приведены ожидаемые параметры интегральных схем с учетом их масштабирования. Однако технических решений реализации большинства параметров, прогнозируемых на конец рассматриваемого срока еще нет.

6. ЧТО БУДЕТ ДАЛЬШЕ?

6.1. Одноэлектронные туннельные транзисторы

Большой интерес у исследователей вызывают также так называемые одноэлектронные явления, устройства и

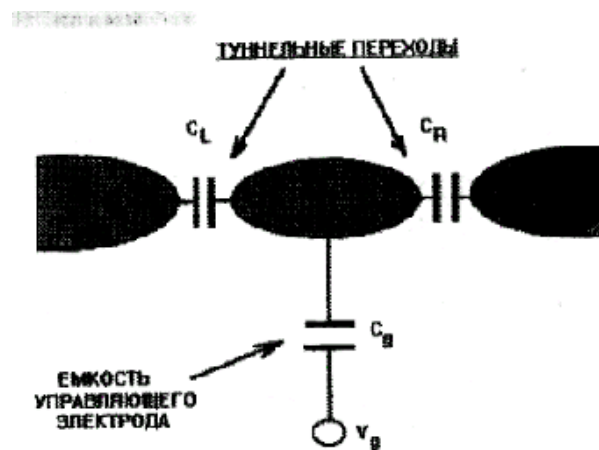


Рис. 38. Одноэлектронный транзистор.

приборы, получившие в настоящее время обобщенное название одноэлектроника. В основу этих работ заложены

идеи наших соотечественников [36]. Они предположили, что между двумя близко расположенными очень малыми площадками металла или вырожденного полупроводника с общей ёмкостью на уровне $\sim 5 \times 10^{-18}$ Ф, можно ожидать новый эффект - дискретное туннелирование одиночных электронов. Это означает, что в структурах с малой собственной ёмкостью туннелирование одиночного электрона заметно изменяет заряд и напряжение на переходе. Это в свою очередь приводит к тому, что следующий электрон уже не может перейти без дополнительного увеличения напряжения. Возникает явление получившее название кулоновской блокады. Доказана возможность управления такими переходами с помощью третьего такого же микроскопического электрода, значит можно думать об одноэлектронном транзисторе, схема которого показана на рис. 38.

Самый важный вывод из их работы заключался в том, что эффект одноэлектронного туннелирования принципиально может проявляться при комнатной температуре.

Первый работающий при комнатной температуре одноэлектронный транзистор был создан в 1996 г. на основе молекулярных нанокластеров [37].

Одноэлектронные приборы обладают очень высоким быстродействием (в пределе это время туннелирования одного электрона) и очень низким энергопотреблением (порядка 10^{-8} Вт). Продолжаются исследования молекулярных, в том числе одномолекулярных транзисторов, привлекательность которых заключается прежде всего в полной идентичности размеров молекул определенного типа, т. Е. 100 %-ная воспроизводимость их размеров. Однако в этой области пока больше вопросов, чем ответов.

6.2. Функциональная электроника.

До последнего времени основные тенденции развития микроэлектроники были обусловлены идеологией больших и сверхбольших интегральных схем. Развитие интегральных схем идет в направлении освоения субнаносекундных времен срабатывания и субмикронных размеров компонентов сверхвысоких уровней интеграции. Эти достижения реализуются на основе транзисторной схемотехники. Интегральная электроника использует классические методы схемной радиотехники, теорию электрических цепей и основана на принципе технологической интеграции статических неоднородностей – потенциальных барьеров, к которым относятся легированные разными примесями полупроводниковые области активных компонентов интегральных схем (диодов, транзисторов), металлические и диэлектрические участки кристалла. Функциональными идеями современной микроэлектроники являются микроминиатюризация и интеграция. Обе эти идеи – идеи технологические. Их пределы ограничены физико-техническими принципами сохранения работоспособности основной транзисторной структуры.

В настоящее время микроэлектроника достигла столь высокого уровня технологической интеграции, что дальнейшее ее повышение наталкивается на ряд принципиальных физических и технологических ограничений [15, 38].

Уменьшение топологических размеров активных областей до величин порядка десятков нанометров приводит к появлению квантово-размерных эффектов, проявляющихся в электронных системах пониженной размерности. Достижение таких размеров связывают с началом эры нанозлектроники как дальнейшего этапа развития микроэлектроники.

Альтернативным направлением развития твердотельной электроники, свободным от ограничений интегральной микросхемотехники, является функциональная электроника. Суть функциональной электроники определяется принципами физического моделирования, реализуемого преимущественно на базе твердого тела. Интеграция в функциональной электронике параметрическая, интегрируются функции преобразования, что исключает схемотехнический принцип их формирования, а, следовательно, компонентную и элементную интеграцию в нем.

Основу функциональной электроники составляет физика твердого тела. Физические процессы и явления, происходящие в твердом теле, моделируют функции передачи и преобразования, определяемые алгоритмами обработки массивов информации. Другими словами, функциональная электроника основана не на схемной радиотехнике с использованием статических неоднородностей (потенциальных барьеров) и технологической интеграции, характеризующих интегральную электронику, а на физических принципах интеграции динамических неоднородностей (электрические и магнитные домены, магнитные вихри, волны деформации, зарядовые пакеты и др.), возникающих в процессе эксплуатации электронной системы.

Статические неоднородности играют в функциональной электронике лишь вспомогательную роль, чаще всего при вводе и выводе информации.

Динамические неоднородности в однородном объеме твердого тела являются непосредственными носителями информации и в отличие от статических неоднородностей создаются не в процессе изготовления электронного устройства, а под действием внешних факторов при функционировании электронного устройства.

Кинетика динамических неоднородностей не вызывает дефектообразования в кристалле, поэтому в принципе устройства функциональной электроники более надежны, чем устройства интегральной электроники. Кроме того, мир физических явлений и процессов в твердом теле столь богат и разнообразен, что практически любая функция передачи может быть реализована методами функциональной электроники.

Таким образом, одним функциональная электроника – это перспективное направление развития электроники, основанное на физике твердого тела и принципе физического моделирования при осуществлении приема, переработки, хранения, передачи и отображения информации, при этом принцип физического моделирования реализуется с помощью физической интеграции динамических неоднородностей.

Литература

- [1] J.E. Lilienfeld , «Method and apparatus for controlling electric currents», U.S.Patent 1745 175. Application filed Oct. 8, 1926, granted jan.18 1930.
- [2] W.B. Shokley, « Circuit element utilizing semiconductive material» . U.S. Patent 2 259 347. Application field June 26 , 1948 , granted Sept.25, 1951 .
- [3] J. Bardeen, W.H. Brattain, « Three electrode circuit element utilizing conductive materials». U.S.Patent 2 524 035, Appl.field June 17 , 1948 , granted Oct. 3 , 1950 .
- [4] J. Saby, «Fused Impurity PNP Junction Transistors» Proc IRE v.40 p.1358-1360 (1952).
- [5] C.A. Lee, «A High-Frequency Diffused Base Germanium Transistor» Bell System Technical Journal, Vol. 35, No. 1, pp. 23–34. (1956).
- [6] W. Shockley and G.L. Pearson, «Modulation of conductance of thin films of semiconductors by surface charges», Phys. Rev. Vol.74., P.232-233 (1948).
- [7] D. Khang and M.M. Atalla, «Silicon-silicon dioxide field induced surface devices» IRE Solid-State Device: Proc. Int. Conf., Carnegie Institute of Tegnology, Pitsburg, (1960).
- [8] H.C. Theuerer, «Method of processing semiconductive materials»U.S.Patent 3 060 123 Appl.Field Dec.17, p.1952 , Granted Oct., 23, (1962) .
- [9] W.G. Pfamm, «Techniques of zone melting and crystal growth» . Solid State Phys. V.1,pp. 423-451, (1957).
- [10] J. St. C. Kilby, «Miniaturized Electronic Circuits » U.S. Patent 3138743 Appl.Field February 6, 1959, issued June, 1964.
- [11] R.N. Noyse, Semiconductor device – and – lead structure» U.S.Patent 2 981 877, Appl. Field July 30, 1959 , Gr. April 25 1961.

- [12] G. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics Magazine* Vol. 38, No. 8 (April 19, 1965).
- [13] G. Moore, "Progress in Digital Integrated Electronics" *IEEE, IEDM Tech Digest* pp.11-13 (1975).
- [14] А. Рэндэлл, «Будущее технологии КМОП» Журнал «Открытые системы», №10, (2000).
- [15] А.Ф. Кравченко, «Физические основы функциональной электроники», Новосибирск, НГУ, 2000.
- [16] D. A. Muller, T. Sorsch, S. Moccio, F. H. Baumann and G. Timp, «The Electronic Structure At The Atomic Scale Of Ultrathin Gate Oxides» *Nature* 399(24) 758-761, (1999).
- [17] J. B. Neaton, D. A. Muller, N. W. Ashcroft, «Electronic properties of the Si/SiO₂ interface from first principles» *Phys.Rev. Lett.* 85(6) 1298-1301, (2000).
- [18] H. S. Momose, T. Ohguro, E. Morifuji, H. Sugaya, S. Nakamura, H. Iwai «Ultrathin Gate oxide CMOS with nondoped selective epitaxial Si channel layer». *IEEE Trans. ED.* Vol. 48.. № 6. P. 1136–1144 (2001).
- [19] В.Цветов, «Развитие классической Микроэлектроники, ожидаемые физико-технические пределы», *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес* 3/2010.
- [20] R.A. McKee, F.J. Walker, M.F. Chisholm, «Crystalline oxides on silicon: the first five monolayers» *Phys Rev. Lett.* 81(6) 3014-3017, (1998).
- [21] D. Shamiryan, M. Baklanov, M. Claes, W. Boullart, V. Paraschiv, «Selective Removal of High-k Gate Dielectrics» *Chem. Eng. Comm.*, V.196 p.1475–1535 (2009).
- [22] S. D. Ananiev, S. D. V'yurkov, V. F. Lukichev, «Surface scattering in SOI field-effect transistor» *Proc. SPIE.* 2006. Vol. 6260 P.00.
- [23] K. Uchida, S. Takagi, «Carrier scattering induced by thickness fluctuation of silicon-on-insulator film in ultrathin-body metal-oxide-semiconductor field-effect transistors» *Appl. Phys. Lett.* Vol. 82. Vol. 2916-2918 (2003).
- [24] В. Денисенко, «Особенности субмикронных МОП-транзисторов», <http://chipnews.ru>
- [25] D.J Paul, «Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits» *Semicond. Sci. Technol.* 19 R75–R108 (2004).
- [26] С. Пахомов, «Триумф кремниевой фотоники» *КомпьютерПресс №3'* (2004).
- [27] Roger Chen, Thai-Trung D. Tran, Kar Wei Ng, Wai Son Ko, Linus C. Chuang, Forrest G. Sedgwick and Connie Chang-Hasnain, «Nanolasers grown on silicon», *Nature Photonics* 5, 170-175, March 2011.
- [28] А.А. Орликовский, В.В. Вьюрков, В.Ф. Лукичев, К.В. Руденко, «Физико-технологические проблемы создания интегральных схем с минимальными размерами в глубокой суб-100 нм области», *Труды 15-го международного симпозиума Нанопизика и Наноэлектроника*, 14 – 18 марта 2011 г., Нижний Новгород Т.1. стр.31.
- [29] Р. П. Сейсян «Нанолитография в микроэлектронике» Для сайта <http://www.electrosad.ru> "Загадочный компьютер и не только ..."
- [30] Anatoly Bourov, Yongfa Fan, Frank C. Cropanese, Neal V. Lafferty, Lena Zavyalova, Hoyoung Kang, Bruce W. Smith, «Immersion microlithography at 193 nm with a Talbot prism interferometer», *Proc. SPIE* 5377, 1573-1578 (2004).
- [31] Fabian Pease, and Stephen Y. Chou, «Lithography and Other Patterning Techniques for Future Electronics» *Proceedings of the IEEE*, v. 96, No. 2, p. 248, February (2008).
- [32] David C. Brandt, Igor V. Fomenkov, Alex I. Ershov, William N. Partlo, David W. Myers, Norbert R. Böwering, Nigel R. Farrar, Georgiy O. Vaschenko, Oleh V. Khodykin, Alexander N. Bykanov, Jerzy R. Hoffman, Christopher P.

- Chrobak, Shailendra N. Srivastava, Imtiaz Ahmad, Chirag Rajyaguru, Daniel J. Golich, David A. Vidusek, Silvia De Dea, Richard R. Hou, «LPP Source System Development for HVM», Proc. of SPIE Vol. 7271, 727103 (2010).
- [33] M.A Lieberman, and A.J. Lichtenberg, «Principles of Plasma Discharges and Materials Processing» New York: Wiley (1995).
- [34] Ф.И. Григорьев «Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники» Учебное пособие / Московский государственный институт электроники и математики. М. 2003. 48 с.
- [35] International Technology Roadmap for Semiconductors - <http://public.itrs.net/>
- [36] Д.Б. Аверин, К.К. Лихарев, «Когерентные колебания в туннельных переходах малых размеров» ЖЭТФ т.90, № 2, с.733 (1986).
- [37] С.П. Губин, В.В. Колесов, Е.С. Солдатов, А.С. Трифонов, В.В. Ханин, Г.Б. Хомутов и С.А. Яковенко «Способ изготовления туннельного прибора», Патент РФ № 2106041, дата публикации 27.02.1998., S.P. Gubin, V.V. Kolesov, E.S. Soldatov, A.S. Trifonov, V.V. Khanin, G.B. Khomutov, S.A. Yakovenko, Tunneling device and method of producing a tunneling device, Patent PCT WO/1997/036333, Publication Date 02.10.1997.
- [38] А.А. Шука, «Функциональная электроника» М.: МИРЭА. 1998