

№ 5224  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южный федеральный университет»

**Технология микросхем с проектными нормами  
90 нм и менее  
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Ростов-на-Дону  
Издательство Южного федерального университета  
2014

УДК 621.382.81(075)

Рецензенты:

доктор технических наук, зам. директора по инновациям и науке ООО «Саунд» профессор **Филатов К.В.**

кандидат технических наук, доцент кафедры Конструирование электронных средств **Замков Е.Т.**

Наумченко А.С., Светличный А.М. Технология микросхем с проектными нормами 90 нм и менее: учебное пособие по дисциплине «Процессы микро- и нанотехнологии». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 44 с.

В учебном пособии рассмотрены основные технологии современной микроэлектроники, позволяющие организовать производство СБИС и УБИС с проектными нормами менее 90 нм: технология получения структур кремний - на - изоляторе (SOI), использование напряжённого кремния, медной многослойной коммутации. Кроме того при производстве наноразмерных микросхем применяется ультрафиолетовая фотолитография высокого разрешения (экстремальная фотолитография) с длиной волны актиничного излучения 193 нм и менее (до 13,5 нм). Для повышения быстродействия микросхем и их функциональной надёжности в современных СБИС применяются для межслойной изоляции диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью, а в качестве подзатворного диэлектрика – изоляционные материалы с высокой диэлектрической проницаемостью. Использование в технологии СБИС (УБИС) супертонких пластин кремния и методов 3D-сборки кристаллов и 3D-сборки корпусов ИМС позволило существенно уменьшить габариты этих изделий и повысить их электрофизические параметры. Учебное пособие предназначено для изучения дисциплины «Процессы микро- и нанотехнологии» бакалаврских программ подготовки по направлениям: 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»).

«с» Южный федеральный университет. 2014

«с» Наумченко А.С.

«с» Светличный А.М.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Структуры КНИ и их практическая реализация в микро- и нанотехнологиях.....	7
1.1. Анализ технологических методов формирования КНИ – структур.....	8
1.2. Основные технологические методы изготовления КНИ – структур.....	9
2. Использование напряжённого кремния.....	13
3. Медная коммутация современных СБИС.....	18
4. Новые технологии получения рисунка СБИС.....	27
5. Новые диэлектрики в структуре МОП – транзистора.....	35
6. Ультра тонкие пластины кремния в микро- и наноэлектронике.....	39
Заключение.....	43
Библиографический список .....	44

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением степени интеграции современных СБИС (сверхбольших интегральных схем) возникла необходимость в уменьшении норм проектирования (например, до 0,09 мкм и менее). Фирма Intel и другие западные фирмы активно занимались поиском технологических методов, обеспечивающих высокие параметры микропроцессоров (высокие тактовые частоты – переход в гигагерцовый, а в перспективе в терагерцовый диапазоны; повышение производительности микросхем; уменьшение энергопотребления; совершенствование технологии производства). Одним из технологических методов, позволивших подняться до 90 нм проектных норм и быстродействия СБИС микропроцессоров до 2,0...2,5 ГГц, явилось внедрение технологии получения КНИ-структур (кремний - на - изоляторе), так называемой SOI-технологии.

Пропорционально уменьшению размеров микроэлементов СБИС уменьшаются размеры формирующих их слоёв. Так в 90нм техпроцессе толщина диэлектрического слоя под затвором МОП-транзистора составляет 1,2 нм (12Å). Именно через этот барьер просачивается ток, представляющий проблему повышения энергопотребления и тепловыделения. Микроэлементы уменьшаются, а тепловыделение СБИС повышается, в основном, за счет увеличения токов утечки в транзисторах и увеличения степени интеграции ИМС. Уменьшить токи утечки можно, применяя более качественные диэлектрики под затвором транзистора (например, сегнетоэлектрики, силициды или окислы РЗМ – так называемые, High- $\kappa$  - диэлектрики). Особенно это становится актуальным при переходе на техпроцесс 45 нм и менее.

Атомарный масштаб микроэлементов СБИС в сочетании с низким пороговым напряжением грозит еще одной неприятностью таким ИМС – «мягким» отказам транзисторов. Мягкие отказы (случайная перезапись «0» в «1» и наоборот) могут быть вызваны «прилетевшими» ионами и электронами, рентгеновскими и  $\gamma$  – излучениями. Снизить вероятность отказов можно на этапе проектирования. Причем как на логическом уровне (выявления и

коррекции ошибок), так и на технологическом уровне, в частности, используя «обедненные» материалы для изготовления ИМС. Эти проблемы можно также решить, используя при изготовлении СБИС структуры КНИ (SOI - технология). В результате применения КНИ-структур в ИМС создается еще один слой изоляции, препятствующий токам утечки и создающий барьер против космических частиц. Главными идеологами применения технологии КНИ являются фирмы IBM и Intel. Однако более современной технологией на момент внедрения КНИ-структур (2001г.) обладала французская фирма Soitec. В этой фирме КНИ-структуры формировались по технологии Smart Cut, использующей так называемый процесс бондинга. В IBM использовалась SIMOX-технология, в которой КНИ-структуры формировались после имплантации ионов  $O_2$  или  $N_2$  в кремний на заданную глубину (доли мкм), где после соответствующей термической обработки образуются изолирующие слои  $SiO_2$  или  $Si_3N_4$ , толщиной около  $\sim 0,3$  мкм. Однако в технологии Smart Cut применена более остроумная идея – отделение тонкого приборного слоя (толщиной до десятков нм) с помощью явления бондинга, вызванного имплантацией ионов водорода (протонов) в рабочую (донорную) пластину кремния, после соединения (связывания) её с нерабочей опорной пластиной. На границе связывания формировался слой окиси кремния. После бондинга и отщепления рабочей пластины по линии образования плоскостных дефектов, образующихся после имплантации водорода в донорную пластину кремния, на опорной пластине формировалась структура КНИ. Последний процесс больше подходит для массового производства ИМС, да и себестоимость производства СБИС по этой технологии ниже, чем в процессе SIMOX. Использование в технологии изготовления БИС тонких приборных слоёв полупроводникового материала (100нм и тоньше) равнозначно переходу от монолитной технологии изготовления ИМС к плёночной.

На рис.1 приведена динамика развития технологии производства СБИС на КНИ - структурах до 2011г [1].

Применение КНИ-структур в техпроцессе Intel было обусловлено возможностью снижения паразитных емкостей с тем, чтобы увеличить быстродействие ИМС. Однако прирост производительности

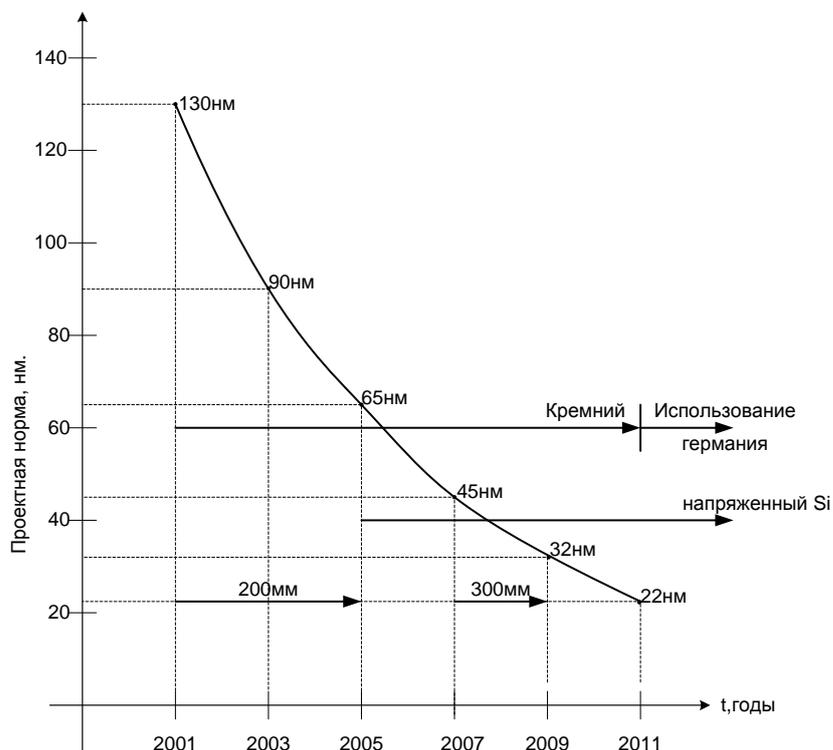


Рис.1. Динамика развития технологии производства СБИС на КНИ - структурах

составил не 20...35 % как ожидалось, а всего 13 %. И с уменьшением проектной нормы производительность ИМС на КНИ-структурах будет еще снижаться.

Для дальнейшего повышения быстродействия БИС на кремнии было предложено использовать в приборных слоях микросхем напряженного кремния и даже заменить его на германий, в котором подвижность носителей тока выше! Для снижения паразитных емкостных связей (и повышения быстродействия) нужно в структурах с межслойной изоляцией заменить  $\text{SiO}_2$  на диэлектрик с меньшей величиной относительной диэлектрической проницаемости. С целью увеличения функциональных возможностей (производительности) микросхем необходимо увеличивать степень их интеграции, т.е. уменьшать размеры микроэлементов. В этом направлении представляет интерес использование конструкций

многозатворных и трёхмерных МОП-транзисторов (3D-транзисторов).

Но самые важные проблемы в технологии как микроэлектроники, так и нанoeлектроники – это групповые технологии формирования рисунка (топологии) микро- и нанoeлектронных устройств. При этом основной проблемой является формирование тонкоплёночной коммутации высокой электропроводности, что предполагает применение новых материалов высокой проводимости и разработку новых методов формирования рисунка.

В последние годы наметилась тенденция использования для производства микро- и нанoeлектронных изделий тонких (менее 300 - 200 мкм) и супертонких (менее 100 мкм) пластин полупроводниковых материалов, в частности, кремния, а также методов 3D-сборки кристаллов и 3D-сборки корпусов ИМС, что позволило существенно снизить габариты этих изделий и их электрофизические параметры, в частности условия теплоотвода.

Исходя из приведенной выше информации рассмотрим подробнее основные технологические методы изготовления современных СБИС (УБИС) с проектными нормами 90 нм и ниже.

## **1. СТРУКТУРЫ КНИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ [2]**

При переходе к плёночной технологии изготовления полупроводниковых интегральных микросистем возникает ряд проблем, без решения которых невозможна практическая реализация заданной конструкции перспективного микроэлектронного изделия. Прежде всего необходимо:

1. Усовершенствовать технологию формирования КНИ-структур таким образом, чтобы пленки кремния на изоляторе имели малое количество дефектов и процесс их формирования был бы достаточно воспроизводимым.

2. Контролировать с высокой точностью (учитывая малые толщины как кремния, так и диэлектриков) травление слоев структуры при формировании контактных окон, кремниевых островков и металлизации с учетом недопущения разрыва пленок на ступеньках рельефа.

3. Разработать технологию практически непроникающих контактов к тонким кремниевым слоям и систему металлизации.

### **1.1. Анализ технологических методов формирования КНИ-структур**

К настоящему времени разработано и активно используется более десятка методов изготовления структур типа КНИ на различных основаниях (подложках). Каждый способ, в свою очередь, имеет несколько вариантов технологических решений.

Наиболее известными в настоящее время являются технологические маршруты изготовления КНИ-структур, использующие следующие методы:

1. «Ростовые» – зонная перекристаллизация слоя поликристаллического кремния – zone-melting recrystallization (ZMR) на изолирующем слое  $\text{SiO}_2$ ; выращивание пленок монокристаллического кремния посредством боковой эпитаксии, лазерная (электронно-лучевая) перекристаллизация слоёв поликристаллического кремния и др.),

2. Имплантационный (внедрение в приповерхностный слой кремниевого монокристалла ионов кислорода или азота с последующим созданием там изолирующего слоя) – SIMOX-технология,

3. Прямого сращивания двух окисленных пластин кремния с последующим почти полным удалением одной из них шлифовкой, травлением или скалыванием (бондинг),

4. Эпитаксия кремния на пористом кремнии,

5. Метод водородного переноса кремния с окислом,

6. Гетероэпитаксия кремния на подложках монокристаллического диэлектрика: сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или флюорида кальция ( $\text{CaF}_2$ ).

Существуют и другие методы получения структур данного типа, которые не получили широкого распространения, но являются интересными и используются для разработки специализированных схем, микромеханических датчиков и др. устройств.

Первые три метода и лазерная зонная перекристаллизация вырвались вперед в том смысле, что существуют коммерческие образцы пленочных структур, на которых возможно создание микроприборов и интегральных схем; другие «ростовые» технологии и эпитаксия на пористом кремнии не потеряли своего значения и имеют ряд преимуществ (по свойствам, по простоте изготовления пленок, по стоимости производства и др.). В целом, первые пять технологических методов уже достаточно широко применяются, так

как существуют коммерческие образцы пленочных структур, на которых возможно создание микроприборов и интегральных схем.

Метод водородного переноса является российским аналогом одного из имплантационных методов (конкретно Smart Cut) и рассматривается отдельно, так как обладает рядом уникальных свойств по сравнению с зарубежными аналогами и возглавляет пилотную линию по созданию высококачественных КНИ-структур в России.

Каждый из подходов имеет свои недостатки и достоинства; тем не менее, на основе структур КНИ, полученных этими методами, уже созданы образцы интегральных схем с достаточно хорошими характеристиками. В частности, метод зонной перекристаллизации является наиболее перспективным для создания трехмерных схем.

Традиционные методы изготовления таких структур (эпитаксиальное наращивание, глубокая диффузия и другие) связаны с рядом экологических проблем и относятся к энергоёмким процессам, особенно при формировании толстых слоев кремния для силовой электроники.

## **1.2. Основные технологические методы изготовления КНИ-структур**

Исторически первым типом структур КНИ с необходимыми потребительскими свойствами стали КНС (кремний на сапфире) структуры, появившиеся на коммерческом рынке в 1971г. Структуры КНС были получены на диэлектрической подложке монокристаллического материала сапфира ( $Al_2O_3$ ) методом гетероэпитаксии. На их основе были разработаны и изготовлены микросхемы по КМОП-технологии. В настоящее время в России по технологии КМОП–КНС промышленно выпускается широкая гамма микросхем с различными функциональными свойствами, имеющих топологические нормы 4...1 мкм. В таких СБИС отдельные узлы и элементы полностью электрически изолированы друг от друга сапфировой подложкой и воздушным или твердотельным диэлектрическим зазором. Однако, как радиационная стойкость, так и электрофизические, функциональные и надёжностные параметры СБИС–КНС в существенной мере зависят от степени дефектности приборных слоев кремния на сапфире толщиной в несколько мкм. Дефектность эпитаксиальных слоев полупроводника является

основным препятствием на пути создания микросхем на структурах КНС.

Низкое качество слоев кремния на сапфире обусловлено следующими факторами:

1. Различием кристаллографического строения кремния и сапфира, так как кремний имеет решетку алмаза с периодом  $a = 0,543$  нм, а  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  – ромбоэдрическую с  $a = 0,476$  нм. Вследствие этого в зависимости от кристаллографического направления несоответствие параметров решёток сопрягающихся слоя кремния и сапфирового основания может колебаться от 4 до 12 %, что и приводит к значительной деформации кремниевой пленки, которая находится в состоянии сжатия. Высокий уровень механических напряжений обуславливает возникновение в эпитаксиальном слое кремния широкого спектра дефектов и, прежде всего, линейных – дислокаций несоответствия, и двумерных – дефектов упаковки,

2. Различием коэффициентов термического расширения сапфира и кремния ( $\text{TKLP}_{\text{Si}} = (2,8 \dots 4,4) \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ,  $\text{TKLP}_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 8 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ), которое приводит к тому, что при охлаждении структур от температуры осаждения пленки до комнатной возникают дополнительно высокие термические сжимающие напряжения в кремнии и, как следствие, увеличивается степень дефектности приборного слоя кремния,

3. Дефектами сапфировой подложки, возникающими при выращивании и резке слитков сапфира и последующих операциях механической обработки поверхности пластин перед эпитаксией,

4. Загрязнениями и фоновыми примесями при осаждении слоя кремния из газовой фазы (пиролиз моносилана  $\text{SiH}_4$ ), например, атомами С, О и быстро диффундирующими атомами Na, Cu, Fe, Au, Ni и др.

Структуры КНС имеют объективные физические ограничения, связанные с дислокациями несоответствия в приборных слоях, даже в случае отсутствия других типов дефектов. Дислокации возникают из-за различия параметров кристаллических решёток и термомеханических свойств кремния и сапфира. Линейная плотность таких дислокаций без учета других структурных нарушений составляет  $2,63 \cdot 10^6$  см $^{-2}$ , а реальная дефектность пленок кремния, как уже отмечалось, зачастую оказывается более высокой. Проблема перехода к производству микросхем с проектными нормами менее 0,13 мкм решается при использовании в качестве подложек структур КНИ,

степень дефектности приборных слоев которых намного ниже, чем пленок кремния в структуре КНС.

Ведущие электронные фирмы за рубежом интенсивно занимаются разработками технологий КНИ и приборов на их основе. Так, до промышленного производства доведена SIMOX-технология. Фирмы SOITEC (Франция), Ibis Technology Corporation (США) предлагают пластины КНИ диаметром 100...200 мм, имеющие захороненный слой диэлектрика толщиной 0,08...0,4 мкм и приборный слой кремния толщиной 0,05...0,2 мкм, плотностью дислокаций  $(1...5) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Стоимость таких КНИ-структур составляет более \$125 за пластину диаметром 100 мм. Высокая цена структур обусловлена использованием в технологии SIMOX нестандартного высокопоточного ускорителя ионов кислорода (или азота). Ожидается, что цена пластин заготовок станет запредельной при неизбежном переходе полупроводниковой промышленности на работу с пластинами Ø 300 мм и более.

В технологии Smart Cut используется стандартное производственное оборудование и, следовательно, остается перспектива постоянно находиться в русле текущих разработок. Однако имеются и недостатки: высокая цена изделия и ограниченная возможность варьирования параметрами КНИ-структуры. Фирма SOITEC (Франция) выставляет на рынок пластины Smart Cut, указывая основные параметры без интервала допустимых изменений: толщины рабочего слоя кремния и диэлектрика, соответственно, 0,2 мкм и 0,4 мкм. Низкая плотность дислокаций в структурах, составляющая величину  $10^2 \text{ см}^{-2}$ , привлекает внимание производителей микро- и нанoeлектронной аппаратуры.

Сущность технологии Smart Cut состоит в следующем. Две пластины кремния: пластина А (донорная) приборного качества и пластина В (опорная) любого типа проводимости и любого удельного сопротивления окисляются с одной стороны до толщины диэлектрического слоя  $\text{SiO}_2$  на пластине А 0,1 мкм, а на пластине В 0,2...0,3 мкм. В пластину А со стороны слоя  $\text{SiO}_2$  проводится высокодозная имплантация протонов (ионов водорода) на заданную глубину (0,3...0,4 мкм). Затем пластины сращиваются[2] по плоскостям с окислом  $\text{SiO}_2$ . При последующей термической обработке этой структуры происходит отщепление донорной пластины по линии максимума распределения водорода имплантированного в кремний (процесс бондинга). Отщепленная пластина приборного качества может затем опять использоваться в этом техпроцессе в качестве

донорной. Слой отщеплённого кремния толщиной сотни (и даже десятки) нанометров затем шлифуется и полируется до заданной толщины.

В России создана собственная линия по производству конкурентно способных структур, имеющих низкую себестоимость продукции без потери качества, учитывая использование стандартного базового технологического оборудования. Разработанная технология получения КНИ-структур получила название Dele Cut (аналог технологии Smart Cut) и технология получения слоя монокристаллического кремния на пористом кремнии со скрытым окисным слоем (КНПК СОС – технология).

Для организации отечественного производства структур КНИ в настоящее время решается комплекс задач, связанных с выращиванием качественного монокристаллического кремния большого диаметра (более 200 мм), разработкой специального технологического оборудования для прецизионной обработки поверхности пластин, имплантации больших доз легких ионов и ионов средних масс в широком диапазоне энергий и т.д. Безусловно, одной из самых актуальных является проблема получения без дислокационных монокристаллов с низким содержанием фоновых примесей и микродефектов, которые оказывают существенное влияние на параметры как исходных пластин КНИ, так и изготавливаемых на их основе СБИС. В настоящее время в отечественных промышленных монокристаллах концентрация ростовых микродефектов (кластеров собственных точечных дефектов и примесей, а также мелких дислокационных петель) достигает  $10^2 \text{ см}^{-2}$ .

## **2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО КРЕМНИЯ**

Дальнейшее повышение быстродействия и снижение проектных норм при конструировании и производстве СБИС возможно также при использовании напряженного кремния[3].

Использование напряженного кремния в КНИ-структурах задумывалось давно и только в последние годы в этом появилась настоятельная необходимость. Технологию получения КНИ-структур со слоем напряженного кремния на эпитаксиальном слое сплава кремний-германиевого соединения разработала фирма «Amber Wave». Слой Si – Ge использовался для растяжения кристаллической решётки приборного слоя кремния, лежащего на этом слое (рис. 2). В результате растяжения кристаллической решётки кремния за счёт

снижения эффективного рассеивания носителей тока (электронов) увеличивается их подвижность, поэтому время пробега электронами расстояния исток – сток в МОП-транзисторах уменьшается, а быстродействие микросхем растёт.

Технология получения КНИ-структур с использованием промежуточного слоя сплава Si – Ge получила название DSL (Dual Stress Liner). С этой целью на эпитаксиальный слой твердого раствора германий – кремний с большим параметром кристаллической решётки наносится приборный слой кремния, в котором формируется область канала МОП-транзистора с электронной проводимостью (n-МОП), в результате чего происходит двуосное растяжение кристаллической решетки кремния в области канала.

Нанесение сравнительно толстого верхнего слоя диэлектрика в структуре КНИ приводит к сжатию приборного слоя Si, что приводит к увеличению подвижности дырок (так как уменьшается расстояние между атомами) в p-МОП-транзисторах, что приводит к увеличению быстродействия ИМС (рис. 3).

Унификация методов сжатия и растяжения приборного слоя полупроводника привела:

- во-первых, к удешевлению технологического процесса,
- во-вторых, такой метод оказался более эффективным с точки зрения увеличения быстродействия.

Реализация напряженного кремния не влияет на уровень потребления энергии и токи утечки МОП-транзисторов. Фирма Intel собирается использовать КНИ-структуры с напряженным кремнием в 65 нм техпроцессе.

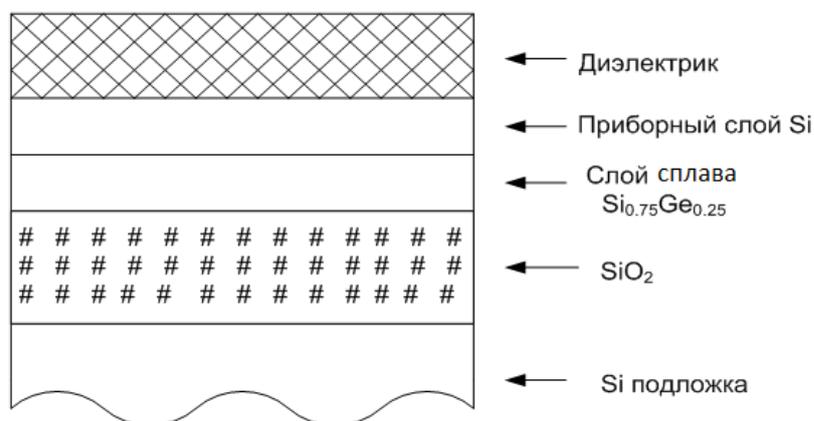


Рис. 2. Структура КНИ с напряжённым приборным слоем кремния

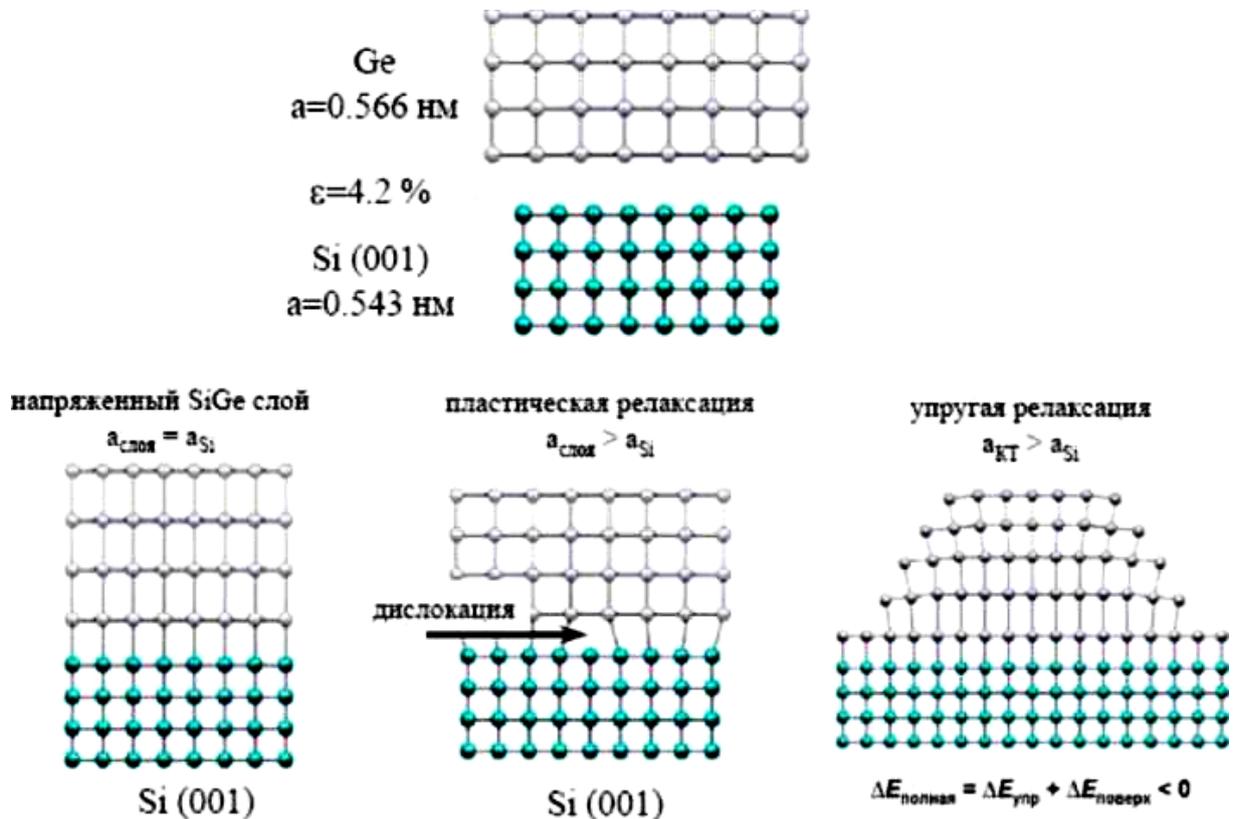


Рис. 3. Принципы формирования внутренних напряжений в SiGe/Si гетероструктурах

Для одноосного сжатия приборного слоя на структуру р-МОП транзистора наносят обычно слой нитрида кремния. Эффекта сжатия кристаллической решетки в области канала транзисторов с дырочной проводимостью (р - МОП) можно достичь формированием областей истока и стока из твердого раствора германий – кремний (рис.4).

Поскольку подвижность дырок больше на подложке с ориентацией (110), а электронов на подложке с ориентацией (100), и основным элементом логических схем являются инверторы, содержащие р- и n-МОП транзисторы (комплементарные структуры – КМОП), то применяют подложки смешанной ориентации. Для их получения предлагается прямое сращивание пластин различной ориентации с последующей эпитаксией в окна, сформированные литографией, слоёв с дополнительной ориентацией.

В результате использования улучшенной технологии напряженного кремния (рис. 4) удалось оптимизировать рабочий ток транзисторов. При фиксированном уровне тока утечки рабочий ток транзистора в 65-нанометровой технологии выше на 30 %, тогда как прежде это улучшение составляло 10...20 % в зависимости от типа транзистора и уровня токов утечки. В транзисторах, созданных по 65 - нанометровой технологии, токи утечки уменьшились в четыре раза

(рис. 5) по сравнению с транзисторами на базе 90-нанометровой производственной технологии. В результате транзисторы на базе 65-нанометровой производственной технологии обеспечивают более высокую производительность без повышения токов утечки (большая утечка электрического тока приводит к выделению большого количества тепла).

В транзисторах с напряженными каналами быстродействие увеличивается приблизительно на 35 % при одинаковых размерах канала и при этом почти на порядок уменьшаются токи утечки.

Во втором поколении использование технологии напряжённого кремния увеличило производительность транзисторов на 10...15 % без возрастания утечки электрического тока. Кроме того, корпорация Intel включила в микро-SRAM на базе 65-нанометровой производственной технологии так называемые транзисторы сна (sleep transistors), которые отключают подачу тока на большие блоки памяти SRAM, когда те не используются, что значительно снижает

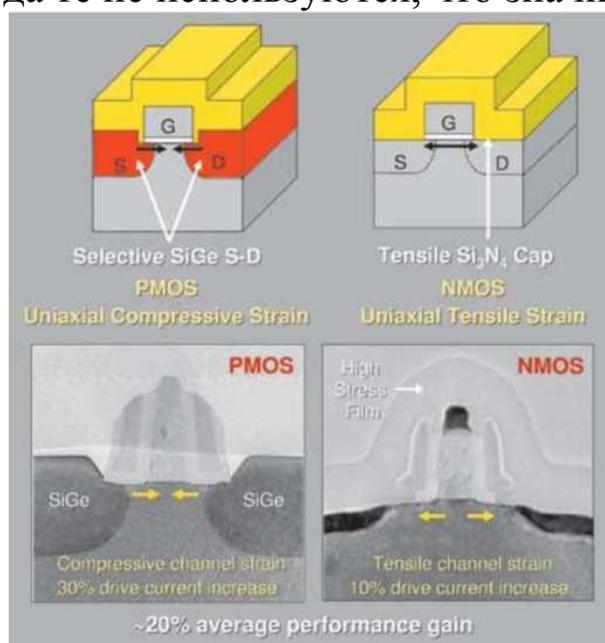


Рис. 4. Технология напряженного кремния в *p*-МОП и *n*-МОП транзисторах

энергопотребление микросхемы.

Эта функция особенно хорошо подходит для устройств с питанием от батареи, например для мобильных ПК. Количество транзисторов сна в микросхеме памяти, а это менее 1% от суммарной площади всех ячеек памяти, а эффект от их использования – трехкратное снижение тока утечки кристалла (рис.5).

В преддверии массового использования эпитаксиальных технологий в нанoeлектронике фирмой Riber (Франция) разработано новое поколение установок молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ 6000, МВЕ 7000), позволяющих осуществлять выращивание слоев твердых растворов германий–кремний на кремниевых пластинах диаметром до 8 дюймов (~200мм).

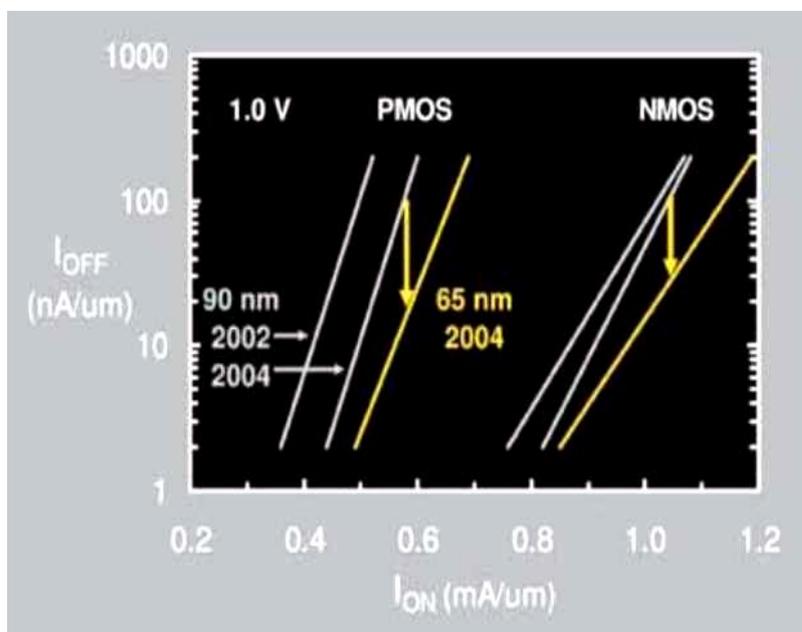


Рис. 5. Соотношение рабочего тока ( $I_{ON}$ ) и тока утечки ( $I_{OFF}$ ) МОП-транзистора при напряжении питания 1В в зависимости от технологии изготовления (NMOS или PMOS)

### 3. МЕДНАЯ КОММУТАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СБИС

Быстродействие ИМС можно повысить также, используя и другие идеи. Например, замену алюминиевой коммутации на медную, что привело к увеличению производительности ИМС на 40 %, уменьшению размера кристалла и снижению себестоимости ИМС. Сейчас медная коммутация используется всеми без исключения фирмами на заказе. Применение медной коммутации позволило использовать многослойную разводку непосредственно на поверхности кристалла, т.е. реализовать идею многослойного коммутационного модуля на одном кристалле [4]. Увеличение количества слоев коммутации позволяет сделать кристалл более компактным и уменьшить длину межсоединений и, как следствие, снизить задержки сигналов, т.е.

увеличить быстродействие СБИС. Но при этом существенно усложняется производство ИМС за счет увеличения количества однотипных и «грязных» технологических операций. Максимальное количество слоёв меди, используемых для коммутации в ИМС, составляет в 65нм техпроцессе 8...9 (рис.6).

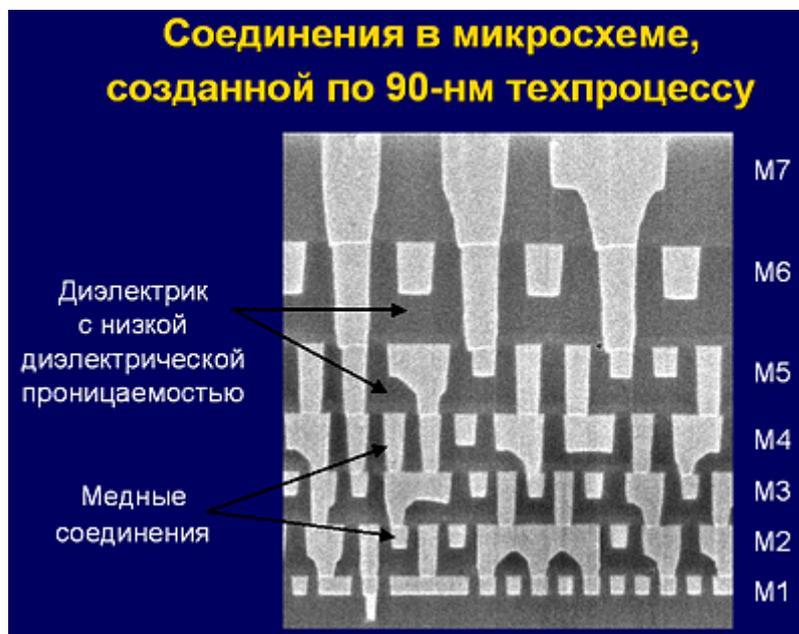


Рис.6. Коммутационные слои меди в структуре СБИС

Однако с увеличением количества слоёв коммутации уменьшается надежность ИМС. Технология многослойной медной коммутации использует такие не типовые методы обработки, как механические шлифовка и полировка 2-слойных структур стекло – медный слой. Причём, для получения безрельефной коммутации используются довольно толстые слои стекла и меди (5...6 мкм). Стабилизация контакта кремний–медь производится с помощью создания в окнах к контактным площадкам на кремнии переходного слоя  $\text{SiO}_2$ , легированного углеродом методом ионной имплантации.

Как мы уже отмечали, компания AMD была первой, которая стала использовать медные соединения при производстве микропроцессоров. Все процессоры AMD, выполненные по 0,18-микронному технологическому процессу и менее, используют медные соединения. Компания Intel также перешла на медные соединения, но

несколько позже – при производстве процессоров по 0,13-микронному технологическому процессу.

Рассмотрим более подробно процесс создания медной коммутации в современных ИМС.

Формирование каждого нового слоя меди традиционно начинается с получения оксидной пленки на кремнии, которая затем покрывается слоем фоторезиста. Далее, посредством литографического процесса, в оксидной пленке вытравливаются бороздки и углубления требуемой формы. Эти бороздки и углубления заполняются медью. Но прежде для предотвращения нежелательной диффузии меди в кремний, эти углубления заполняются тонким слоем антидиффузионного вещества (diffusing barrier), как правило, диэлектрического. Толщина диэлектрического антидиффузионного барьерного слоя (ДБС) составляет всего 10 нм.

После этого производится процесс осаждения меди по всей поверхности пластины. Слой меди электрохимически осаждают из раствора медного купороса  $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ , причем сама пластина, на которую осаждаются ионы меди  $\text{Cu}^{++}$ , выступает в роли катода.

При формировании проводящего слоя необходимо, чтобы медь равномерно осаждалась по всей пластине. Однако добиться этого не так-то просто. Дело в том, что согласно закону Фарадея, определяющему массу осаждающегося в результате электролиза металла на катоде, масса выделяющейся меди зависит от силы тока в растворе электролита. Но сила тока, проходящего по электролиту, неодинакова в центре и по краям. Причина тому сопротивление пластины, на которую и происходит осаждение меди. Найти разницу между силой тока в центре электролита и по краям можно, используя хорошо знакомый из школьного курса физики закон Кирхгофа.

Принимая, что сопротивление электролита равномерно по сечению ионного потока, нетрудно найти разницу между силой тока в центре и по краям электролита.

Для того чтобы добиться равномерного осаждения меди по всей поверхности пластины, желательно, чтобы разница между силой тока в центре и по краям электролита была бы как можно меньше. Добиться уменьшения разброса толщины гальванического слоя меди можно либо путем снижения напряжения источника питания, либо путем уменьшения сопротивления пластины, либо путем увеличения сопротивления электролита. Изменение напряжения влечет за собой изменение скорости электролиза, что не желательно. Изменение

сопротивления пластины невозможно без изменения ее размеров, что также нежелательно. А вот изменение сопротивления электролита вполне реально. Именно поэтому подбирают такую плотность электролита, чтобы минимизировать разницу тока в центре и по краям и тем самым обеспечить равномерность осаждения меди.

При осаждении происходит постепенное заполнение атомами меди вытравленных канавок, в результате чего образуются проводящие шины.

После заполнения медью канавок лишний слой меди удаляется с пластины посредством шлифования, а затем наносится очередной слой диэлектрической пленки, которая потом будет служить изолирующим слоем в многослойной структуре коммутации, и проводится формирование следующего слоя. В результате образуется многослойная система коммутации, которая может содержать до 5-6 металлических слоёв.

Нижние слои металлизации предназначены для локальной коммутации. В этих слоях критичной является плотность размещения металлических плёночных проводников. Верхние слои предназначены для глобальной коммутации. В этих слоях критичным является сопротивление проводников.

Привлекательность методов химического и электрохимического осаждения из растворов состоит: во-первых, в низкой температуре процесса, а во-вторых, в простоте используемого оборудования.

В самом простейшем случае, для того чтобы получить слой меди на поверхности подложки методом электрохимического осаждения, необходимо погрузить подложку в электролит, содержащий ионы меди и подключить источник постоянного тока таким образом, чтобы подложка была катодом, как показано на рис.7.

Однако для того чтобы осуществить осаждение слоя меди на поверхность подложки, которая сама является полупроводниковой, а поверхность её покрыта диэлектриком, прежде необходимо осадить на эту поверхность затравочный слой. Этот слой обеспечивает подведение тока от контакта на краю подложки ко всем точкам на подложке, где будет осаждаться электролитический слой меди. Необходимость затравочного слоя приводит к разнообразным способам реализации осаждения. Два таких способа показаны на рис. 8[5].

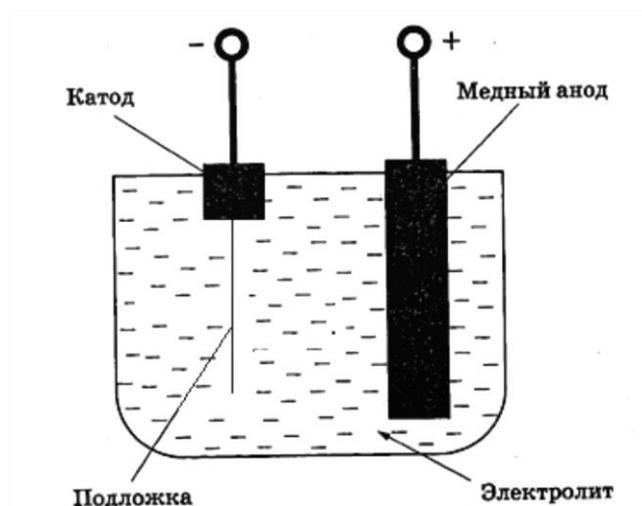


Рис.7. Схема метода электрохимического осаждения

Электрохимическое осаждение с использованием маски заключается в наложении маски поверх затравочного слоя (рис.8, *a*). Осаждение происходит только там, где не наложена маска. Материал маски и окружающий её затравочный слой после этого удаляются.

Технология «dual – damascene» предполагает формирование контактных колодцев и траншей в диэлектрике путем двойного сухого травления: первый раз – по топологии контактных колодцев; второй раз – по топологии траншей, при этом благодаря селективности процесса сухого травления происходит дотравливание контактных колодцев (рис. 8, *a*, *в*). Электрохимическое осаждение по этой технологии включает осаждение ДБС и затравочного слоя на диэлектрический слой, который в структуре многослойной плёночной коммутации ИМС является изолирующим и функциональной частью прибора, поэтому не удаляется (рис.8, *г*). Осажденный металл покрывает всю поверхность. Лишний металл должен быть удален на стадии планаризации рельефа с использованием, например, химико-механической полировки (рис. 8, *д*). Электрохимическое осаждение идеально подходит для создания межсоединений, так как оно позволяет осаждать металл одновременно через межуровневые контактные колодцы и через вышележащие канавки по технологии «dual-damascene» (рис. 9).

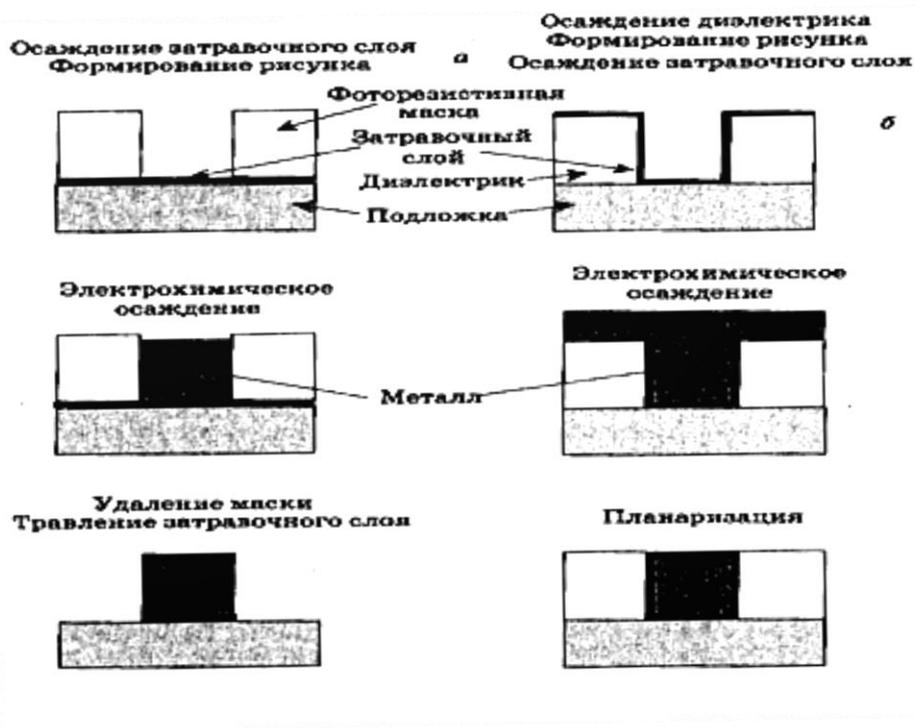


Рис.8. Способы формирования медных межсоединений методом электрохимического осаждения: а) с использованием фоторезистивной маски; б) технология «damascene»

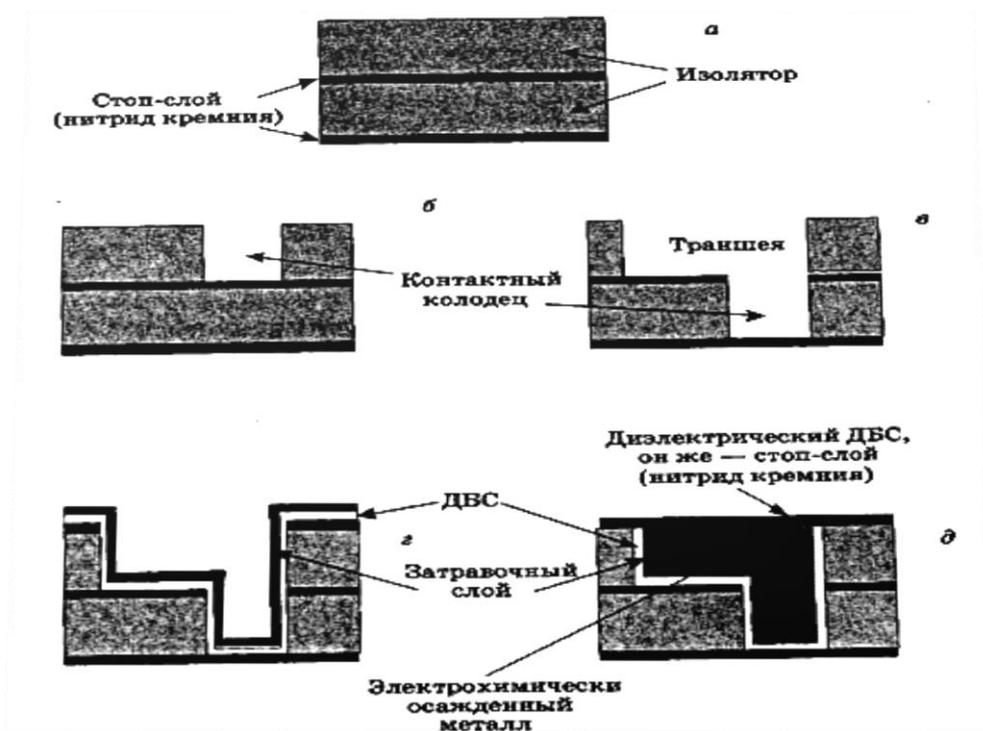


Рис.9. Формирование медных межсоединений с использованием метода электрохимического осаждения по технологии «dual - damascene»

Наиболее важное требование для успешного электрохимического осаждения (так же как и для любого другого процесса осаждения,

который можно использовать для создания медных межсоединений по технологии «damascene») – это способность заполнять траншеи и межуровневые контактные колодцы и их комбинации полностью, без каких бы то ни было полостей или пустот.

На рис. 10 показаны возможные варианты изменения со временем профиля осаждаемого слоя меди. Идеальное конформное осаждение означает, что слой металла одинаковой толщины осаждается в любой точке поверхности. В конечном итоге это приводит к возникновению шва или узкой вытянутой пустоты (рис.10, *а*).

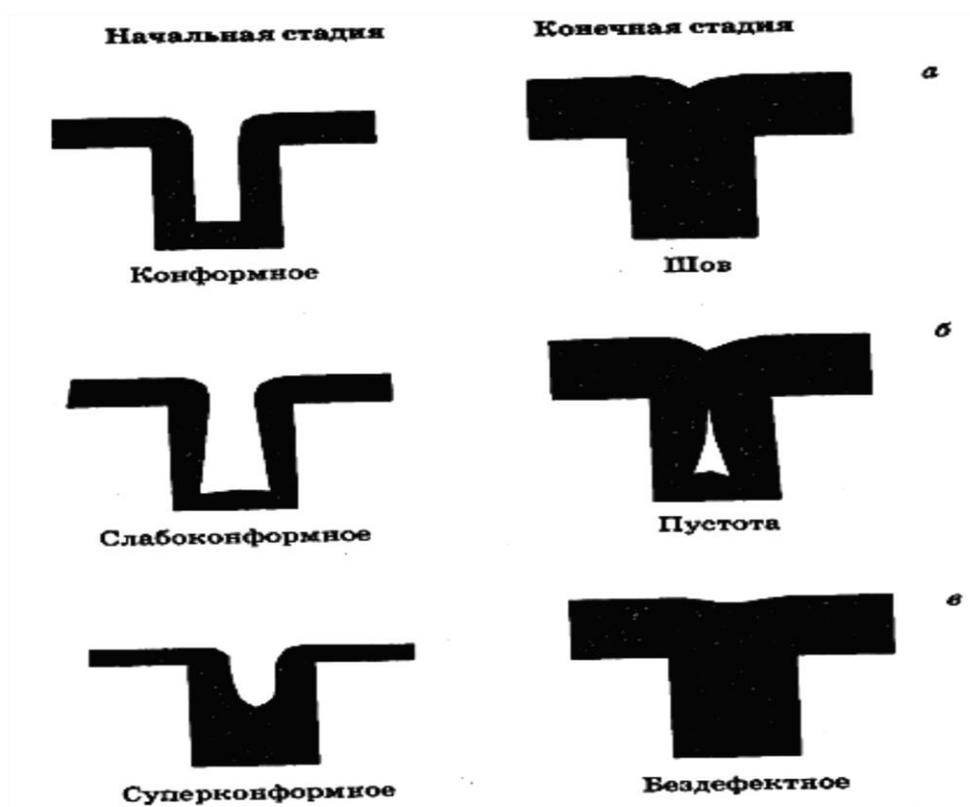


Рис.10. Возможные варианты изменения со временем профиля заполнения траншеи или контактного окна осаждаемой медью: *а*) идеально конформное заполнение; *б*) слабоконформное заполнение; *в*) суперконформное заполнение

Слабо конформное осаждение приводит к возникновению полостей даже у траншей со строго вертикальными стенками (рис. 10, *б*). Оно возникает из-за неизбежного различия в скоростях осаждения на открытой поверхности и внутри узкой траншеи или колодца, которое обусловлено более низкой концентрацией ионов металла внутри узкой траншеи или колодца. Причину этого схематично поясняет рис. 11. Число ионов, осаждающихся на единицу площади открытой поверхности в единицу времени,

одинаково в любом ее месте. Поэтому такое же число ионов проходит в единицу времени через вход, например, контактного колодца. Однако поверхностью осаждения внутри этого колодца является вся площадь поверхности цилиндра и, следовательно, число ионов, приходящихся на единицу площади этой поверхности в единицу времени, оказывается меньше, чем на открытой поверхности. Такое обеднение раствора электролита внутри канавки или колодца ионами металла приводит к значительному концентрационному перенапряжению, которое, в свою очередь, ведет к тому, что электрический ток предпочтительно течет в более доступные места вне узкой траншеи или колодца. Следует отметить, что описанная ситуация усугубляется тем, что в процессе осаждения, поскольку входное отверстие в траншее или колодце постепенно зарастает металлом, тем самым уменьшая концентрацию ионов металла, поступающих внутрь траншеи или колодца.

Для беспустотного (бездефектного) заполнения или «суперзаполнения» желательно, чтобы скорость осаждения на дне канавки была выше, чем на стенках. Такое заполнение показано на рис. 10, в. Следует отметить, что термин «суперзаполнение» отличается от понятия планаризация (выравнивание) поверхности. Выравнивание снижает шероховатость поверхности и сглаживает дефекты, такие, например, как царапины. Суперзаполнение же приводит к беспустотному и бесшовному осаждению материала внутри литографически сформированных траншей и колодцев с вертикальными стенками и высоким аспектным соотношением (отношением глубины заполняемой траншеи к её ширине), которое не должно превышать 10.

Эффекта суперзаполнения можно достичь также путем подавления процесса осаждения на открытой поверхности и сохранения осаждения в узких траншеях и контактных колодцах. Так, фирмой IBM разработаны и запатентованы специальные добавки – ингибиторы в медный электролит, которые адсорбируются на поверхности осаждения и подавляют процесс осаждения меди. По той же причине, что иллюстрирует рис. 11, концентрация добавок – ингибиторов на стенках узких траншей и контактных колодцев оказывается существенно меньше, чем на открытой поверхности. Поэтому внутри колодцев и траншей эффект подавления кинетики электрохимического осаждения металла меньше, что приводит к более высоким скоростям осаждения на дне канавок и колодцев, по сравнению с открытой поверхностью (рис. 11).

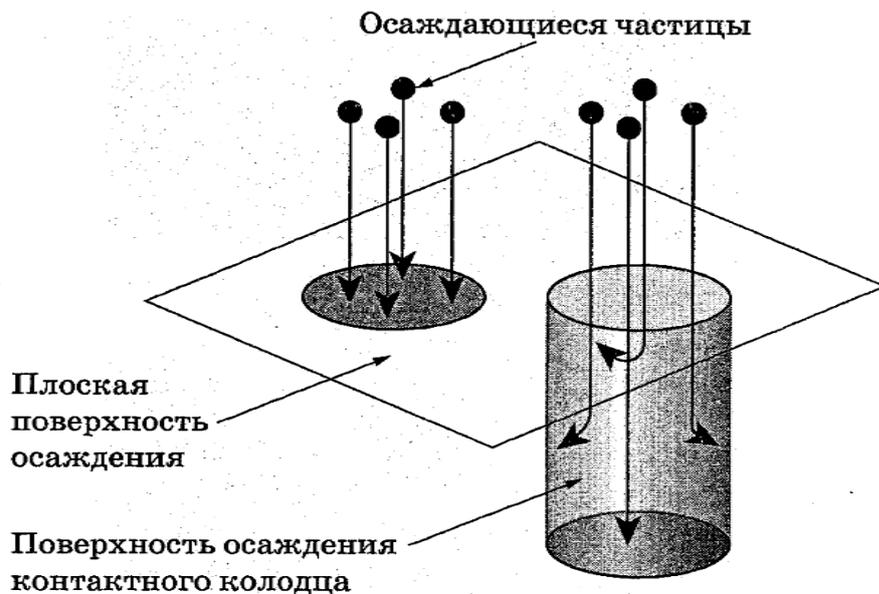


Рис.11. Схема, поясняющая различие в скоростях осаждения металла на открытой поверхности и на поверхности внутри контактного колодца

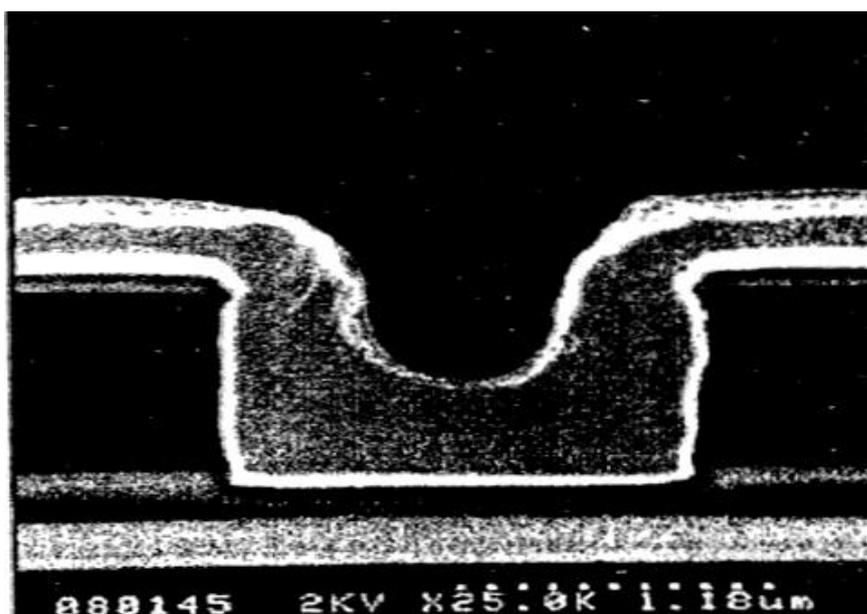


Рис.12. РЭМ микрофотография среза траншеи, частично заполненной медью путем электрохимического осаждения

Преимущественного осаждения металла внутри канавок, а не на открытой поверхности, можно добиться также с помощью переменного импульсного осаждения, используя эффект пониженной пропускной (по отношению к ионам) способности узких канавок.

При подаче на подложку отрицательного импульса на её поверх-

ности происходит обычное катодное осаждение металла с привычным различием в скоростях осаждения на открытой поверхности и внутри узких канавок. Амплитуда и длительность положительного импульса, как упрощенно (без учета переходных процессов) показано на рис. 13, подбираются таким образом, чтобы по возможности растворить осажденный металл на открытой поверхности, но за это время ионы металла, в том числе и образовавшиеся в результате растворения осажденного слоя внутри узкой траншеи, не успели бы её покинуть.

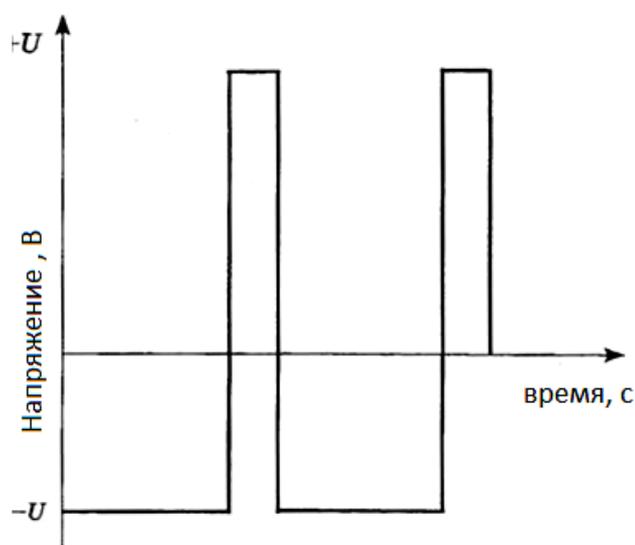


Рис.13. Форма сигнала при переменном импульсном электрохимическом осаждении

### 3. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА СБИС

Для формирования наноразмерных элементов СБИС возможностей электролитографии уже недостаточно. Среди литографических задач в технологии нанoeлектроники нужно отметить проблемы создания и контроля точности изготовления масок и наноразмерных элементов СБИС. Решение этих задач стало возможным при использовании метода фотолитографии с уменьшением длины волны актиничного излучения. На протяжении всего периода развития микроэлектроники прогресс CD (Critical Dimension – это характеристический размер элементов интегральной схемы, т.е. проектная норма) достигался исключительно с помощью фотолитографии. 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 благодаря волновому характеру оптических процессов. Именно это является основой высокой технической и экономической эффективности метода и возможности достижения уровня интеграции, характеризуемого на сегодняшний день количеством в  $10^7 \dots 10^{10}$  элементов (транзисторов) на кристалле (чипе). По уровню достигаемой величины CD фотолитография современного уровня пересекла размер в 100 нм в направлении меньших размеров и может далее называться «нанотехнологией» уже с 2000 г.

Ранее фотолитография обеспечивалась контактным методом переноса изображения, доминировавшим до начала 80-х годов прошлого века, который затем уступил проекционному методу, оказавшемуся существенно более эффективным в деле достижения меньших CD, так как здесь минимальный размер, ограниченный дифракционным пределом, пропорционален длине волны актиничного излучения, тогда как в контактном методе – только корню квадратному от длины волны света ультрафиолетового диапазона [6,7]. Наиболее успешным методом создания микрорисунка (топологии) в ИМС, в конечном итоге, оказался проекционный перенос изображения. В этом методе величина параметра CD регламентируется

дифракционным пределом оптической системы, описываемым критерием Релея – Аббе [7]:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{N_A}$$

Изображение светящейся точки может послужить выводу этого критерия, утверждающего, что CD прямо пропорционально произведению  $k_0$  на  $\lambda$ , и обратно пропорционально числовой апертуре  $N_A$ , где  $\lambda$  длина волны актиничного излучения (т.е. излучения, обеспечивающего фотохимическую регистрацию изображения), а  $k_0$  – числовой коэффициент, равный для не когерентного света 0,61. На самом деле в реальном технологическом процессе этот коэффициент оказывается переменной величиной, существенно зависящей не только от степени когерентности излучения, но и от метода регистрации проецируемого изображения (в отличие от  $k_0$  его обозначают  $k_1$ , и называют технологическим коэффициентом).

При успешном применении некоторых технологических приёмов он может быть уменьшен до значения  $\sim 0,2$  [7]. Так как при оптическом проекционном переносе изображения мы имеем дело с прямой пропорциональностью величины CD длине волны актиничного излучения.

Числовая апертура может быть найдена с помощью выражения

$$N_A = n \sin \alpha ,$$

где  $n$  – коэффициент преломления иммерсионной жидкости;

$\alpha$  – угол преломления светового луча в жидкости.

Для иммерсионного объектива с водой в качестве иммерсионной жидкости величина  $N_A = 1,368$ .

Что касается дифракционного предела, то электронолитография (ЭЛГ) всегда считалась альтернативой фотолитографии, способной решить все проблемы перехода к малым величинам параметра CD – к нанолитографии. Потенциальные возможности этой техники хорошо известны [6]. Как правило, ЭЛГ всегда опережала ФЛГ по разрешению. Но использование остросфокусированного пучка электронов приводит к необходимости поэлементного (или мелко фрагментарного) экспонирования, что существенно увеличивает время результирующей экспозиции. Это вступает в противоречие с экспоненциальным ростом степени интеграции ИМС или с выполнением «закона» Мура. Ещё Уолмарком [7] на заре развития микроэлектроники было отмечено, что между предельно малым размером

элемента микрорисунка на поверхности полупроводниковой пластины, достигаемым при применении того или иного технологического метода, и его реализацией в ИМС, должна существовать некоторая дистанция, определяемая нормой допуска на электрические параметры  $D_P/P$  и степенью интеграции  $n$ . Этот вывод вполне актуален и сегодня. Действительно, для нормального функционирования схемы мы должны потребовать, чтобы с отличной от нуля вероятностью (соответствующей определённому выходу) ни один из  $n$  элементов не превысил бы нормы допуска на параметр  $P$ . Это и приведет к тому, что мы не сможем воспользоваться минимальной величиной  $a_{min} = CD$  и должны будем отступить в сторону больших размеров  $a_{min} \gg CD$ .

Минимальный размер элемента в УБИС с  $10^6$  эл/чип должен составить величину в 1,5...3мкм, а для  $10^9$  эл/чип – 1,9...2,8мкм. Уменьшение CD вплоть до 5...13нм, являющееся целью разработок следующего десятилетия, могло бы обеспечить возможность изготовления УБИС, состоящих из элементов с субмикронными размерами. Меньшие размеры элемента при большом их числе неизбежно приведут к недопустимым отклонениям реализуемых параметров ИМС. Однако в действительности ИМС с таким уровнем интеграции сегодня уже существуют и созданы они по технологическим стандартам практически соответствующим предельным технологическим возможностям фотолитографии. Это обстоятельство можно понять, только если не считать процесс изготовления каждого элемента (транзистора) ИМС независимым случайным событием. Так могло бы быть в случае последовательного и независимого изготовления элементов схемы остросфокусированным электронным лучом, но не в волновом методе переноса изображения, когда все элементы «прорисовываются» одновременно и коррелированно. Можно полагать, что это обстоятельство и является главным источником преимущества фотолитографии и причиной её доминирующего положения в микроэлектронике во все годы её развития.

Ключевым элементом литографической технологии является *длина волны* актиничного излучения (света) используемого источника. Чем меньше длина волны света, тем более мелкие структурные элементы можно создавать. Снижение длины волны света достигается применением коротковолновых источников излучения света, специальной оптики и других компонентов фотолитографической системы. Нынешнее поколение чипов фирмы

Intel создаётся с помощью ультрафиолетового (УФ) источника света (лазера) с длиной волны 193 нм, что позволяет достигать минимального размера структурного элемента порядка 50нм (т.е. длины затвора транзистора, выполненного по 90-нм технологичес-

Таблица 1

<b>CD</b>	<b>Проблемы</b>	<b>Решения</b>
90...65 нм	Контроль размера	Смещение фазы (APSM), коррекция оптической близости (OPC)
65...32 нм	Изготовление масок	EUV – литография в дальней УФ - области

кому процессу). Очевидно, что изготовление транзисторов по 65-нм техпроцессу (как было сказано выше, имеющих длину затвора 35 нм) требует либо уменьшения длины волны применяемого источника света, либо использования иных конструкторских и технологических решений. Уменьшение длины волны актиничного излучения возможно при использовании в фотолитографическом процессе иммерсионных объективов. Так при длине волны лазерного излучения 193 нм применение иммерсии (иммерсионной жидкостью является вода) позволяет снизить длину волны актиничного излучения до 134 нм. В настоящее время фирма Intel пошла по другому пути, выдвигая более экономически выгодные технологические приёмы для увеличения разрешения в процессе фотолитографического переноса изображения с фотошаблона (маски) на приборную пластину (основание). Как то: использование кроме иммерсионных объективов, масок с чередующимся смещением фазы (Alternating Phase-Shift Masks – APSM-маски) и методов коррекции оптической близости (технология Optical Proximity Correction – OPC) и др.[7] Применение этих технологий позволяет создавать на поверхности подложки «изображения» с минимальным размером структурного элемента, однако требует существенной переработки процедуры изготовления фотошаблонов. Тем не менее, будущие технологические процессы неизбежно потребуют уменьшения длины волны используемого актиничного излучения. В

последние годы передовые фирмы начали использовать технологию «экстремальной УФ-литографии» (Extreme Ultra Violet – EUV) со значительным уменьшением длины волны источника актиночного света в область дальнего или «жесткого» УФ - излучения – до величины длины волны излучения 13,5 нм. В то время как эта технология является огромным преимуществом с точки зрения получаемого высокого разрешения, ожидается и много технологических трудностей. Главная проблема – это пропускание коротковолнового света материалом линз (кварцевым стеклом) подобно рентгеновским лучам без эффекта фокусировки, вынуждающая делать кардинальную перестройку конструкции оптической системы в виде замены оптических линз многослойными зеркалами. При этом потребуются и замена пропускающих масок отражающими (т.е. поглощающими коротковолновое УФ - излучение в одних областях спектра и отражающими – в других). С этой целью планируется использование кремний – молибденовых масок. В России в ИМН РАН РФ разработан нанолитограф с длиной волны актиночного излучения 13,5 нм. При этом разрешение составит 30 нм. В дальнейшем планируется создание литографического оборудования с длиной волны актиночного излучения 8 нм. Большой проблемой экстремальной УФ фотолитографии являются: разработка мощных источников экстремального ультрафиолета (с длиной волны в области 13,5 нм и менее), создание оптических объективов, способных фокусировать световое излучение рентгеновского диапазона и разработка перспективных фоторезистов, чувствительных в области  $\leq 13,5$  нм. Уже создан двух зеркальный асферический объектив, обеспечивающий размер экспонируемой области на фоторезисте  $0,6 \times 0,6 \text{ мм}^2$ . Кроме того, поскольку молекулярные газы азот и кислород также весьма хорошо поглощают в этой области света, то вся литографическая система будет помещаться в вакуум, что значительно усложняет технологический процесс литографии.

Повышение разрешающей способности экстремальной УФ-фотолитографии возможно также конструкторскими приёмами при разработке фотошаблонов с учётом оптических эффектов при экспонировании объектов супермалых размеров [7]. Наиболее существенным в этой технологии является преодоление дифракционного предела.

Преодоление дифракционного предела возможно с помощью следующих основных процессов:

- коррекции оптической близости,
- введение искусственного фазового сдвига,
- иммерсии,
- двойного экспонирования и двойного создания микрорисунка («паттернирования»).

Кроме того, некоторыми технологическими приёмами, такими как:

- внеосевое освещение фотошаблона,
- использование многослойного фоторезиста,
- силицирования в процессе проявления рисунка,

удаётся также значительно снизить дифракционный предел и повысить разрешающую способность метода экстремальной фотолитографии.

### *Коррекция оптической близости*

При экспонировании микроизображений с размерами, равными или меньшими предельного размера по критерию Рэля-Аббе, это изображение претерпевает различного рода искажения. К таким искажениям относятся сужение или недоэкспонирование узких длинных линий, сокращение и округление их изображений на концах, заплывание узких зазоров, скругление острых углов. Типичные искажения изображения фотошаблона на слое фоторезиста показаны на рис.9[7]. С этими искажениями можно бороться, создавая на фотошаблоне корректирующие элементы: «ушки» на концах линии, вырезы в местах резкого изгиба рисунка. Эти элементы позволяют воспроизвести необходимый рисунок на фоторезисте с высокой точностью, преодолевая «рэлеевский» предел при заданной длине волны актиничного излучения и числовой апертуре по формуле Рэля. Эти элементы существенно усложняют рисунок на фотошаблоне, но в настоящее время уже разработаны пакеты программ, которые автоматически учитывают особенности формирования рисунка на фотошаблоне [7].

### *Введение искусственного фазового сдвига*

Другим приёмом, существенно упрощающим преодоление дифракционного предела при формировании рисунка на фоторезисте, является введение искусственного фазового сдвига. Это достигается введением в структуру фотошаблона дополнительных элементов, сдвигающих фазу проходящего света. Такими элементами могут быть

вытравленные в подложке фотошаблона канавки или на поверхность фотошаблона наносят слои прозрачного материала с заданной толщиной и определённым коэффициентом преломления ( $n > 1$ ). Электромагнитное излучение заданной длины волны, проходя сквозь фотошаблон на двух смежных участках микрорисунка, может проинтерферировать со сдвигом фаз, что приведёт к ослаблению или усилению сигнала. Однако фазосдвигающие элементы существенно снижают плотность компоновки микроэлементов на фотошаблоне (и на получаемом рисунке ИМС тоже), хотя и являются мощным средством увеличения разрешения литографии.

### *Иммерсия*

Применение иммерсионных объективов позволяет существенно уменьшить длину волны источника света, что приведёт к резкому увеличению разрешающей способности фотолитографического процесса. В экстремальной фотолитографии используется только когерентное излучение ультрафиолетового диапазона, например, с длиной волны 193 мкм. Иммерсионная жидкость помещается между объективом и экспонируемой поверхностью. Так, что в этом промежутке образуется мениск из иммерсионной жидкости. Жидкость должна иметь коэффициент преломления больше единицы. В качестве иммерсионной жидкости проще всего использовать деионизованную воду, коэффициент преломления которой составляет  $n = 1,44$ . При этом длина волны эксимерного лазера составит 134 мкм. Если использовать для иммерсии прозрачные жидкости с большим коэффициентом преломления, то эффект повышения разрешающей способности экстремальной УФ фотолитографии будет ещё выше. Иммерсионные жидкости при использовании в техпроцессе фотолитографии не должны содержать посторонних примесей и газовых пузырьков, так как они существенно снижают разрешающую способность фотолитографии.

### *Двойное экспонирование и паттернирование*

Сущность метода двойного экспонирования (двойного создания микрорисунка) состоит в использовании для создания финального микрорисунка двух фотошаблонов с различными дополняющими друг друга микрорисунками при экспонировании одного и того же слоя фоторезиста. Двойное паттернирование более радикальный способ повышения разрешающей способности фотолитографии. Он

состоит в поочерёдном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, создаваемых с помощью двух согласованных фотошаблонов. Причём нанесение и экспонирование каждого из двух слоёв фоторезиста производится отдельно. При этом образуются два встроенных друг в друга микрорисунка (pattern). Формирование рисунка рабочего слоя ИМС производится через двойную фоторезистивную маску. Метод паттернирования требует создания новых фоторезистов, обладающих более высокими разрешающей способностью и «химической» стойкостью. И такие фоторезисты были разработаны [8]. Это, так называемые, СА - резисты.

Фоторезисты с повышенной разрешающей способностью нужны не только при использовании метода паттернирования, но и в других разновидностях экстремальной фотолитографии. Потому, что традиционные фоторезисты на основе нафтохинондиазидов (НХД) и новолачной смолы интенсивно поглощают световые излучения с длиной волны менее 248 нм и обладают к тому же низкой светочувствительностью. С целью повышения разрешающей способности и стойкости фоторезистов к агрессивным средам в работе [9] предложен новый класс фоторезистов – «химически усиленные» СА - фоторезисты. В СА - фоторезистах основная фотохимическая реакция происходит с фотокислотным генератором, т.е. с веществом, которое при поглощении света разлагается, выделяя при этом кислоту. А уже эта кислота модифицирует основное пленкообразующее полимерное вещество, делая его растворимым в проявителе (позитивный фоторезист). СА - фоторезисты имеют высокую фоточувствительность в области коротковолновых излучений вплоть до 13,5 мкм. Для более коротко волновых излучений (менее 13,5 мкм) требуется разработка новых типов фоторезистивных материалов.

### *Внеосевое освещение фотошаблона*

Используя некоторые технологические приёмы, такие как вне осевое освещение фотошаблона, можно существенно увеличить разрешающую способность экстремальной фотолитографии (ЭФЛГ). Нормальное освещение фотошаблона с элементами, меньшими дифракционного предела, не обеспечивает правильности переноса изображения шаблона на слой фоторезиста потому, что при нормальном падении пучка света только нулевой порядок дифракции попадает в зрачок объектива. Другие лучи (+1-й и -1-й порядок дифракции) выйдут за пределы поля зрения и изображение не будет

сформировано, так как отдельный луч представляет собой плоскую волну, не несущую никакой пространственной информации. Когда же освещение шаблона является наклонным, в зрачок объектива попадают лучи нулевого и первого порядка. В этом случае формируется не только рисунок, но улучшается глубина фокуса. Четкость рисунка при этом лучше и разрешающая способность экстремальной фотолитографии возрастает.

### *Использование многослойного фоторезиста*

Для повышение разрешающей способности ЭФЛГ можно использовать также двуслойный фоторезист. Точность воспроизведения рисунка рабочего слоя при его формировании через фоторезистивную маску сильно зависит от толщины слоя фоторезиста. Чем тоньше масочный слой, тем выше точность воспроизведения рисунка рабочего слоя (по крайней мере при формировании рисунка рабочего слоя жидкостным травлением, так как меньше подтравливание). Однако уменьшение толщины масочного слоя приведёт к уменьшению коэффициента селективности при травлении структуры фоторезистивная маска – рабочий слой. Выходом из этой дилеммы является применение многослойных фоторезистов. Чаще всего применяется двуслойный фоторезист. При этом верхний слой делают тоньше, чтобы обеспечить высокую точность воспроизведения рисунка. А второй слой толще – для обеспечения необходимой стойкости фотомаски к агрессивным средам, т.е. для увеличения коэффициента селективности процесса формирования рисунка рабочего слоя. Правда, при использовании второго слоя фоторезиста снизится точность воспроизведения рисунка. Преодолеть этот недостаток можно созданием между двумя слоями фоторезиста некоторого пограничного слоя, обогащённого кремнием. Выдержка резистивного слоя в термостате с силаном ( $\text{SiH}_4$ ) при температуре  $90^\circ\text{C}$  и давлении 250 Torr (мм рт. ст.) обеспечивает диффузию последнего в фоторезист на глубину 300 нм. Затем образец помещают в кислородную плазму газового разряда, что приводит к образованию в кремнийсодержащих слоях фоторезиста окиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Не обработанные силаном области фоторезиста удаляются. В дальнейшем техпроцессе маска из окиси кремния защищает верхний слой фоторезиста при переносе его изображения в толстый нижний слой фоторезиста, что обеспечит квазивертикальное вытравливание окна в этом слое. Этот процесс называется силицированием.

#### 4. НОВЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ В СТРУКТУРЕ МОП–ТРАНЗИСТОРА

Кроме КНИ – технологии будущее развитие ИМС связано с использованием в качестве подзатворного диэлектрика материала с высокой диэлектрической проницаемостью (так называемый High-k – диэлектрик), который позволяет, будучи более толстым, существенно уменьшить токи утечки через затвор и при этом не снизит эффективность управления транзистором. Если мы боремся с утечками, то толщину диэлектрика нужно увеличить хотя бы до 2-3 нм. Чтобы при этом сохранить прежнюю крутизну транзистора (зависимость тока от напряжения), необходимо пропорционально увеличить диэлектрическую проницаемость материала диэлектрика. Если диэлектрическая проницаемость объемного диоксида кремния около 4 (или чуть меньше в сверхтонких слоях), то разумной величиной диэлектрической проницаемости нового диэлектрика можно считать величину в районе 10-12. Несмотря на то, что материалов с такой диэлектрической проницаемостью немало (окислы металлов, окислы РЗМ, сегнетоэлектрики и др.), тут не менее важны факторы технологической совместимости материалов. Поэтому для нового high-k-материала был разработан свой высокоточный процесс нанесения плёнок, представленный на рис. 14, во время которого формируется один молекулярный слой этого материала за один цикл.

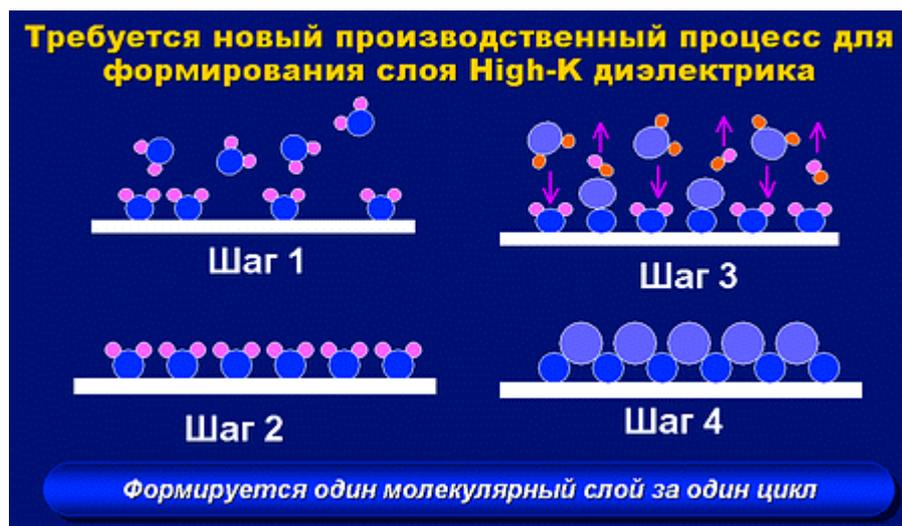


Рис. 14. Схема высокоточного процесса нанесения слоя High-k диэлектрика

Исходя из этого рисунка можно предположить, что новый материал – это тоже оксид. Причем монооксид, что означает применение материалов преимущественно второй группы, например, магния, цинка или даже меди. Для этой цели подходят также сегнетоэлектрики типа  $\text{BaSrTiO}_3$ , окислы РЗМ (редкоземельных металлов) типа окиси гафния в сочетании с металлическим затвором (или несколькими затворами). Окисел гафния является очень дорогим материалом, что приведёт к существенному увеличению себестоимости производства ИМС. Кроме того, возникает проблема совместимости нового материала с традиционными полупроводниковыми средами. В частности, с поликремниевым затвором. Поэтому придётся, скорее всего, вернуться к металлическим затворам. Дело в том, что замена диоксида кремния на high-k диэлектрик ведет к проблемам взаимодействия с поликристаллическим кремнием (ширина запрещенной зоны транзистора определяет минимально возможные для него напряжения). Эти проблемы удастся устранить, если использовать специальные материалы для затворов транзисторов обоих типов (n-МОП и p-МОП) в сочетании с особым технологическим процессом. Благодаря этой комбинации материалов удастся достичь рекордной производительности транзисторов и уникально низких токов утечки, в 100 раз меньших, чем при использовании нынешних материалов. В этом случае уже не возникает искушения использовать для борьбы с утечками значительно более дорогую технологию SOI, как это делают некоторые крупные производители микропроцессоров.

Другая проблема, возникающая при использовании в качестве подзатворного диэлектрика материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (и не только при использовании сегнетоэлектриков) – эффект «замораживания» электронов в канале транзистора (образование объемных зарядов в результате эффекта поляризации в подзатворном диэлектрике). Для снижения этого эффекта высказывается идея применения многозатворного транзистора.

Снижение паразитных емкостных связей и увеличение быстродействия СБИС возможно также при использовании в структурах КМОП для межслойной изоляции диэлектриков с низкой относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Теоретически величину  $\epsilon$  можно понизить до  $\epsilon_0$  – диэлектрической проницаемости вакуума (или воздуха), но практически удаётся снизить этот параметр изолирующих слоёв из неорганических диэлектриков до значений  $\epsilon \geq 2$ . Для достижения таких значений  $\epsilon$  нужно изолирующий слой

диэлектрика сделать пористым (в порах будет воздух или вакуум с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1$ ). Причём поры в диэлектрике должны быть закрытыми. Увеличение пористости диэлектрического слоя можно достичь технологическими методами. Например, увеличивая давление остаточного газа в рабочем объёме установки при напылении (нанесении) слоя диэлектрика. Однако использование пористых диэлектриков приведёт к снижению пробивных напряжений в структурах металл–диэлектрик–полупроводник из-за развития процессов ионизации газов в порах.

В качестве материала затвора, при использовании традиционного подзатворного диэлектрика  $\text{SiO}_2$  предлагается использовать силицид никеля, что существенно увеличит рабочие токи транзистора. Преимущество силицидов заключается в том, что они получаются на «месте», т.е. формируются в готовой структуре транзистора на основе нанесенного слоя поликристаллического кремния.

## 5. МНОГО ЗАТВОРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Фирмой Intel [8] в 2003 г были продемонстрированы 45нм трёхзатворные транзисторы со скоростью переключения 0, 26 пс для n-МОП транзистора и 0,45 пс для p-МОП транзистора. Такие транзисторы потребляют на 35% меньше энергии. Рост производительности СБИС на трёхзатворных транзисторах составил 45%. Структура такого транзистора приведена на рис. 15.

Фирма Infineon [9] также разработала трёхмерный многозатворный полевой транзистор, выполненный по 65-нм технологическому процессу. При этом площадь, занимаемая транзистором, уменьшилась на 30%, а токи утечки в 10 раз! В предложенной структуре трёхмерного двух затворного полевого транзистора исток, канал и сток сформированы из полупроводникового материала путём плазмохимического травления приборного слоя кремния в структуре КНИ (SOI). Затворы выполнены напылением слоя металла. Такая структура позволяет увеличить пропускную способность канала и уменьшить время отсечки носителей тока в канале. При этом быстродействие транзисторов существенно возрастает. Эти фирмы в дальнейшем собираются сохранить предложенную структуру МОП-транзистора и в последующих разработках СБИС по 32- и 22-нм техпроцессам.

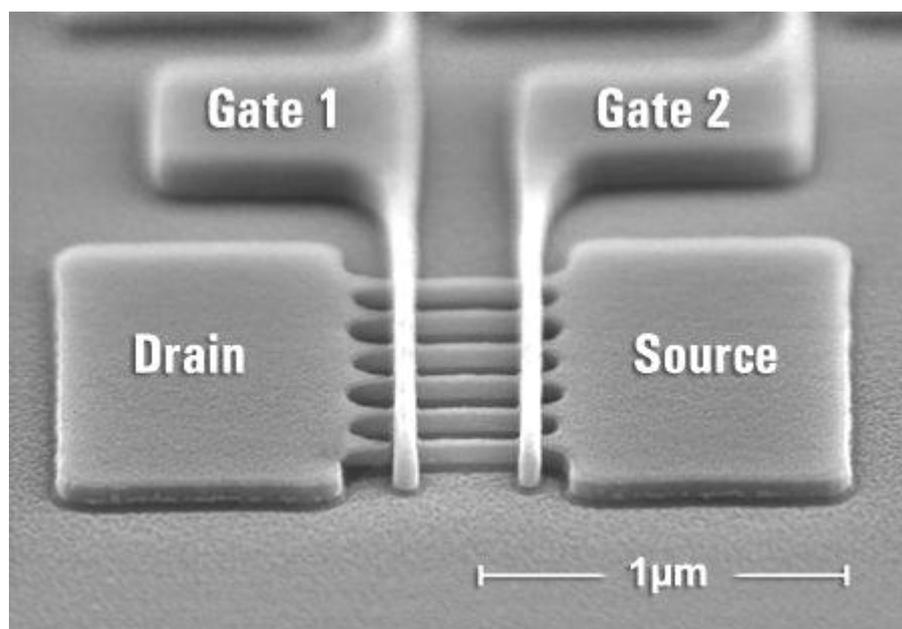


Рис. 15. Внешний вид трёхмерного двух затворного МОП- транзистора

## 6. УЛЬТРАТОНКИЕ ПЛАСТИНЫ КРЕМНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В последние годы при разработке и изготовлении изделий микроэлектроники появилась тенденция к снижению толщины исходных пластин кремния (и других материалов) при формировании СБИС с проектными нормами менее 90нм. Это вызвано: во-первых, необходимостью уменьшения геометрических размеров (особенно толщины) корпусов микросхем, применяемых в сотовых телефонах, планшетах и ноутбуках; во-вторых, необходимостью использования технологии 3D - сборки кристаллов микросхем в корпусах [10]. Кроме того утонение пластин исходного полупроводникового материала способствует улучшению теплоотвода чипов и микросхем, увеличению радиационной стойкости и улучшению электрических параметров ИМС. Тенденции снижения толщины корпусов, пластин и проектных норм чипов для 3D - сборки показаны на рис.16.

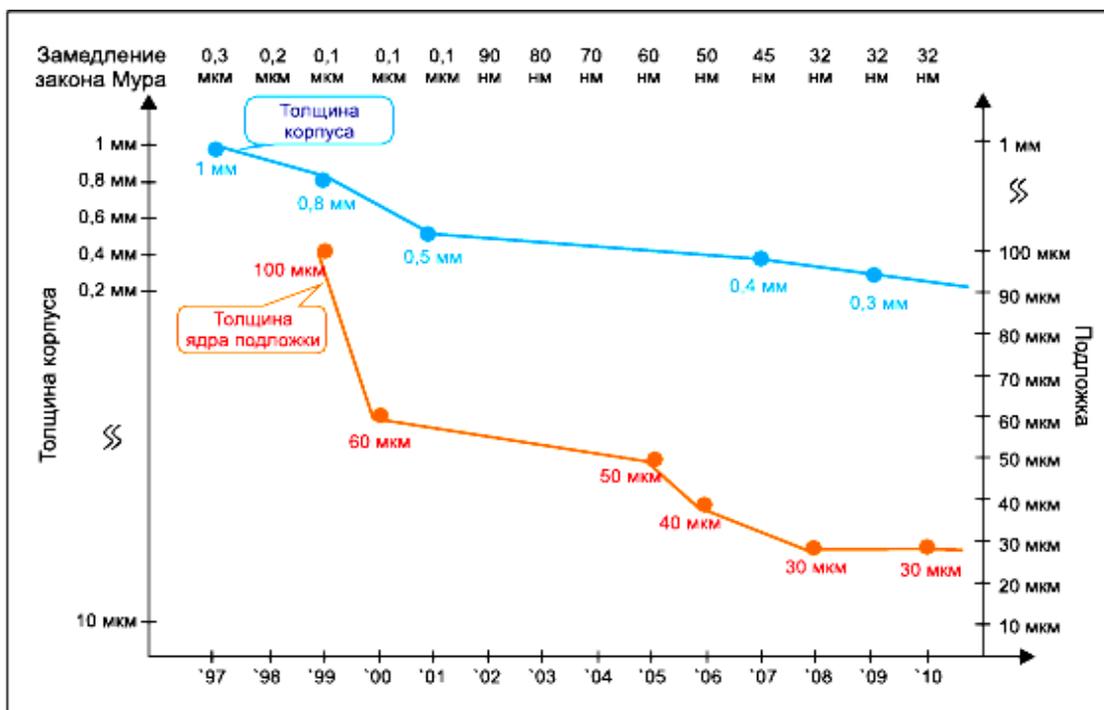


Рис. 16. Тенденции развития микротехнологий в 1997–2010 г

Утонение пластин кремния производится различными методами: механической полировкой, плазменным, химическим и электрохимическим травлением. Возможна комбинация процессов механической обработки и плазменного или электрохимического травления. Лидер в области разработки технологического оборудования для изготовления супертонких пластин кремния (фирма Disco) предлагает 3-х стадийный технологический процесс утонения пластин: механическая шлифовка, механическая полировка и плазменное травление[11]. Разработанная ими установка DGP 8761 позволяет производить обработку пластин диаметром до 300 мм.

Однако при утонении и использовании пластин кремния для производства изделий микро- и наноэлектроники, МЭМС и других электронных устройств возникают риски их разрушения. Такие как: повреждение пластин при утонении, бой пластин и чипов, скалывание при резке в процессе изготовления микросхем. С целью предотвращения механических повреждений эта фирма предлагает оригинальные процессы обработки пластин. В частности техпроцесс DBG (dicing before grinding) – частичная резка чипов до шлифовки. Частичная резка пластин с лицевой стороны на половину её толщины позволяет существенно снизить уровень механических напряжений. На лицевую сторону наносится защитная плёнка и затем пластина поступает на шлифовку обратной стороны. Для получения экстремально тонких пластин кремния фирма Disco предлагает

процесс ТАКО. В этом техпроцессе изготавливают пластины с отбортовкой по краям шириной 3 мм первоначальной толщины (ребро жесткости). Это снижает деформацию и коробление пластин и риск её боя на последующих этапах обработки. Структуры микросхем формируются с обратной стороны пластины. Кромка по периметру пластины удаляется перед резкой пластин на кристаллы. Рекомендуемые толщины для изготовления различных изделий электроники представлены на рис.17.

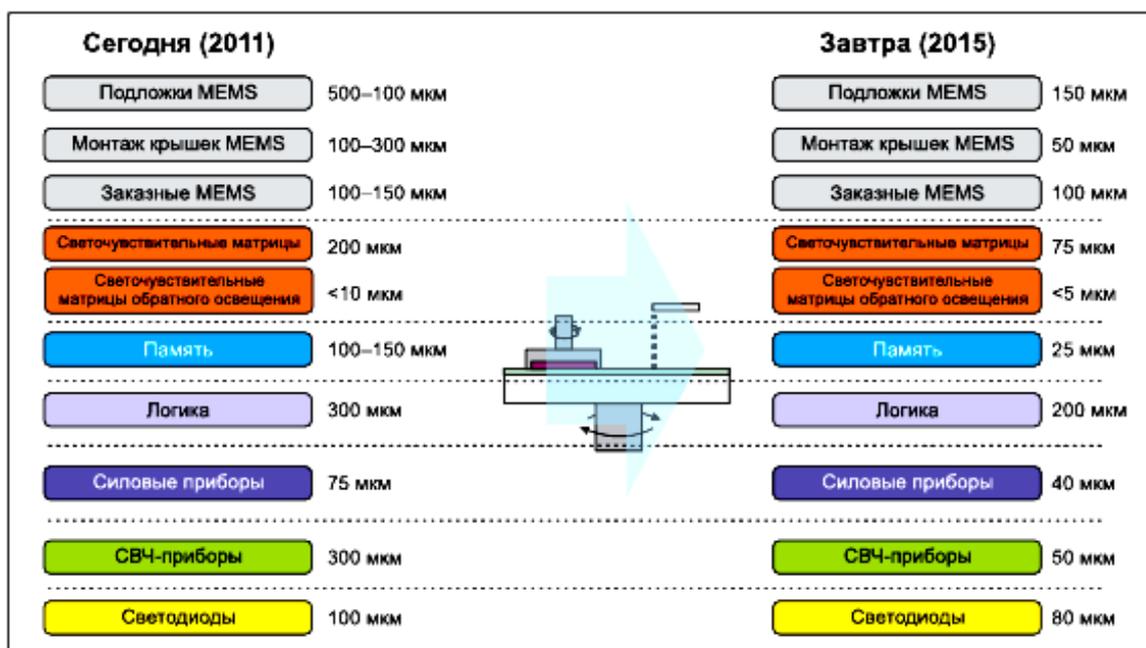


Рис. 17. Рекомендуемая финишная толщина пластин для различных типов приборов

Супертонкие пластины позволяют реализовать идею трёхмерных (3D) микросхем. На рис. 18. показана структура чипа, состоящего из 3-х пластин, соединённых по технологии «бондинга»[2]. Одна из пластин (верхняя) является рабочей (с рабочими чипами), две другие обеспечивают планарную и межслойную коммутации. Толщины соединяемых пластин составляют 15 мкм и менее, что достигается утонением после сращивания более «толстых» пластин. Такие структуры изготавливает фирма Tezzaron Semiconductor[10]. Их техпроцесс изготовления многослойных структур начинается с формирования вертикальных межсоединений (система Super contacts) (рис.18). После этого на пластине формируется коммутационный слой меди (толщиной ~1 мкм) с использованием изолирующего слоя SiO<sub>2</sub> толщиной 0,5 мкм. Затем металлизированные пластины соединяются лицевыми сторонами вовнутрь в единое целое. Обратная

сторона верхней пластины утоняется до толщины менее 10 мкм комбинацией методов шлифовки и химико-механической полировки. При утонении вскрываются окна Super contacts.

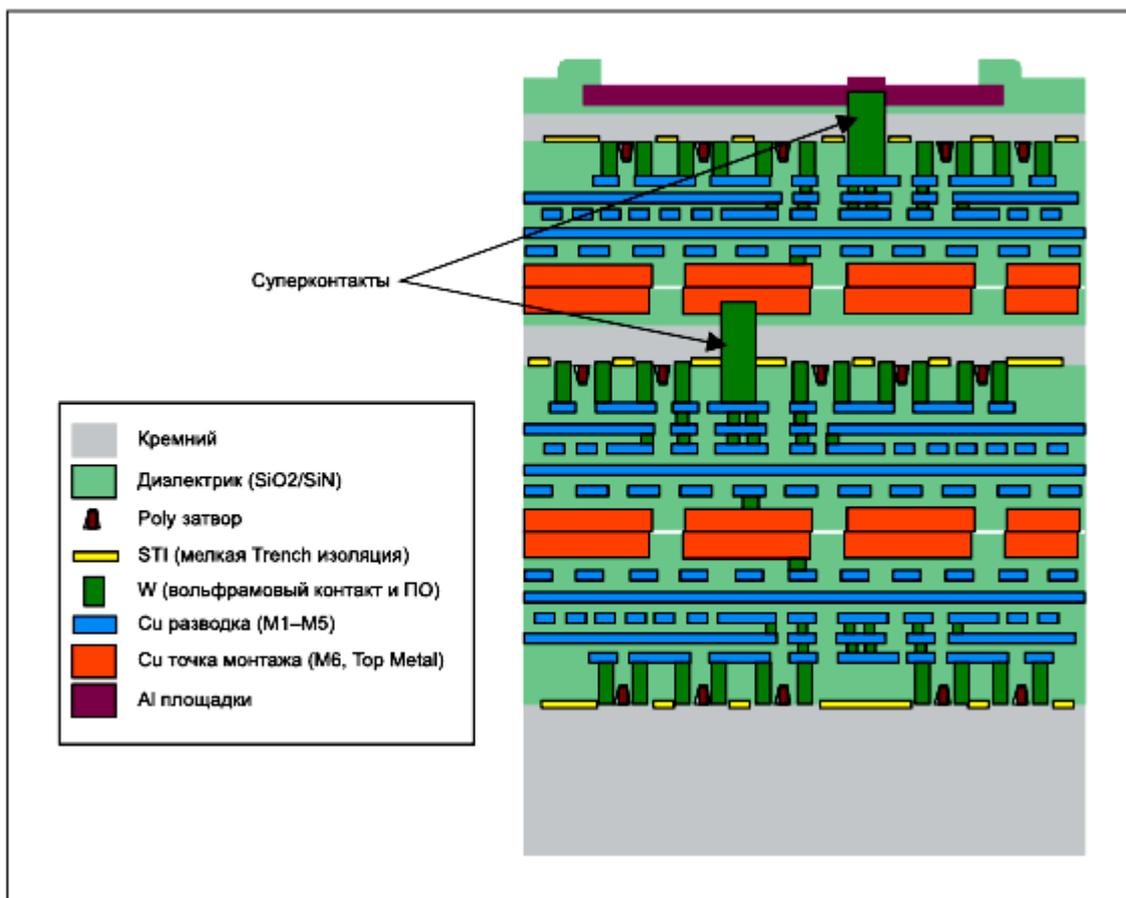


Рис. 18. Структура из трёх пластин, изготовленная по техпроцессу фирмы Tezzaron

Обратная сторона утонённой пластины до вскрытия Super contacts может быть металлизирована и наклеена на лицевую сторону третьей металлизированной пластины. Утонение, металлизация и монтаж повторяются необходимое количество раз. Утонение можно производить до толщины пластины 8 мкм, при этом неоднородности на утонённой пластине составляют не более 0,5 мкм. Для реализации рассматриваемой технологии изготовления 3D – микросхем требуется комплекс специализированного оборудования для прецизионной механической обработки полупроводниковых пластин диаметром до 300 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше технологические методы повышения как геометрических, так и электрических параметров современных ИМС ещё не полностью исчерпали возможности совершенствования конструкции и технологии изготовления СБИС и УБИС, предназначенных для использования в вычислительной технике.

В частности, предлагается заменить материал затвора (для увеличения рабочего тока) с металлического на металлосилицидный, например, силицид никеля. Большие перспективы имеет применение в структуре МОП-транзистора многослойного затвора (формируется два или три затвора). Трехзатворные транзисторы отличаются большей компактностью и более высоким быстродействием.

Не полностью реализована идея применения в качестве подзатворного диэлектрика сегнетоэлектрических тонких (не толще 0,16 мкм) плёнок.

Нужно работать также над «уплощением» трехзатворных МОП-транзисторов (это связано с развитием методов литографии).

Для уменьшения паразитных емкостей в межслойной изоляции при многослойной коммутации нужно разработать диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  меньше 3.

Для существенного повышения быстродействия МОП-транзисторов в составе СБИС сотрудниками института микроэлектроники АН РФ совместно с фирмой Sceptre Electronic предложена идея неравномерного легирования полупроводникового канала МОП-транзистора ионными пучками [11]. По словам представителей Sceptre Electronic, неравномерное легирование повысит мобильность заряженных частиц в канале транзистора, тем самым, повысив его рабочую частоту.

Для организации производства таких транзисторов компанией разработан метод легирования кремния слоем, варьирующимся по толщине от 20 до 100 нанометров. Использование "бегущего ионного луча" (RIB) позволяет получить полупроводники с волнообразной структурой, выступающей в роли микронной маски, обеспечивающей молекулярную самоорганизацию.

Использование при изготовлении различных микроэлектронных изделий ультратонких пластин кремния и методов 3D – сборки кристаллов и 3D – сборки корпусов ИМС существенно снизило габариты этих изделий и повысило их электрические характеристики.

Однако надо иметь в виду, что бесконечное «вылизывание» микроэлектронных технологий с целью уменьшения размеров микроэлементов ИМС и повышения их электрических параметров, а также параметров микросхем, не возможно и когда-то придётся переходить на истинные наноэлементы и нанотехнологии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю.А. Баранов, И.И. Круглов. Полупроводниковые приборы со структурой кремний на изоляторе: состояние и перспективы использования. Обзоры по ЭТ, серия «Полупроводниковые приборы», вып. 6, 1989 – С. 14 – 73.
2. А.С. Наумченко. Структуры кремний - на - изоляторе в микро- и нанoeлектронике: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009 – С. 69.
3. Рольф Ричардсон. Экспресс-Электроника, №2, 2004.
4. А.С. Наумченко, Д.А. Сеченов. Гибридизация микроэлектронной аппаратуры: учебное пособие – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003 – С. 68.
5. Д.Г. Громов. Металлизация ультра больших интегральных схем: учебное пособие. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009 – С. 277.
6. З.Ю. Готра Технология микроэлектронных устройств: справочник. – М.: Радио и связь, 1991.
7. Р.П. Сейсян. Нанолитография в микроэлектронике. ЖТФ, 2011, том 81, вып. 8, 1–14с.
8. В.W. Smith et al. // Proc. SPIE, Vol. 5377. 2004.
9. [www.ixbt.com](http://www.ixbt.com)
10. [www.Tezzaron.com](http://www.Tezzaron.com)
11. [www.compulenta.ru/2002/4/11/28240/](http://www.compulenta.ru/2002/4/11/28240/)

**Наумченко Александр Серафимович**  
**Светличный Александр Михайлович**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**Технология микросхем с проектными нормами**  
**90 нм и менее**

Редактор Кочергина Т.Ф.

Корректор Селезнёва Н.И.

ЛР № 020565 от 23.06.97 г. Подписано к печати

Формат 60x84<sup>1</sup>/16. Бумага офсетная. Офсетная печать

Усл. п. л. – Уч. - изд. л. –

Заказ № Тир. 50 экз.

«с»

---

Издательство Южного Федерального Университета

344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1

Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией  
кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и  
сувенирной продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса 1, тел.(8634)371717, 371655