

## Лекция 7. Технология "Кремний На Изоляторе" (КНИ) и ее разновидности

### 5.1. Основные преимущества технологии КНИ

При уменьшении линейных размеров элементов СБИС, как уже отмечалось в разделе 3.4.1, возрастают и паразитные емкости между изолирующими  $p-n$ -переходами истока и стока и подложкой, а также сопротивление этих электродов и подводящих проводников. При этом все большая часть потребляемой КМОП-структурами мощности затрачивается на заряд указанных емкостей в момент переключения транзистора из одного состояния в другое, а время, уходящее на этот заряд, определяет общее быстродействие схемы.

Для повышения этого быстродействия в исследовательском подразделении IBM (*IBM Research Division*) еще в начале 1989 года было предложено поместить между поверхностным приборным слоем кремния и монокристаллической кремниевой подложкой слой изолятора, который должен резко уменьшить паразитную емкость (рис. 5.1 б) и повысить быстродействие ИС.

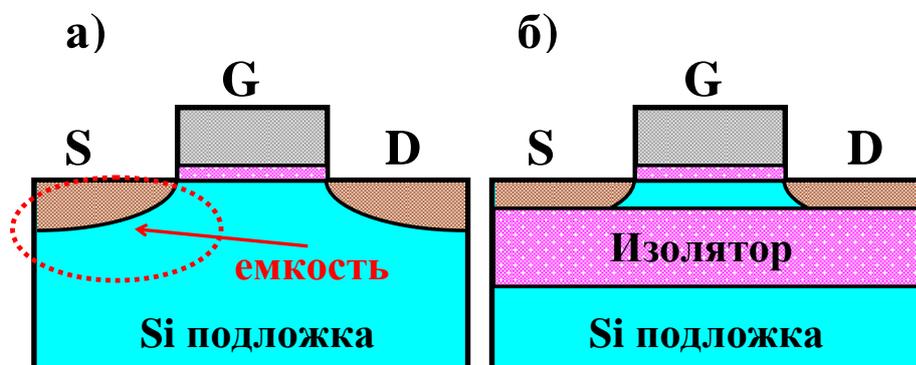


Рис. 5.1. Схема структуры МОП-транзисторов, выполненных на объемном кремнии (а) и по технологии КНИ (б).

Эта технология получила название КНИ — *кремний на изоляторе* (англ. SOI, *silicon on insulator*) и обладала целым рядом достоинств по сравнению с классической схемой.

1. Изоляция элементов ИС от подложки диэлектриком, а не  $p-n$ -переходом, значительно более надежна и позволяет поднять верхний предел рабочих температур со 120–150 °С для обычной технологии до 300–400 °С.

2. При такой изоляции не возникает необходимости в создании изолирующих канавок между соседними элементами, что позволяет повысить плотность упаковки элементов в 1,5–3 раза и исключить из процесса несколько литографических этапов.

3. Упрощение технологического процесса и увеличение плотности упаковки, в свою очередь, повышает процент выхода годных изделий и снижает их стоимость.

4. Сохраняются возможности адаптации всех существующих и проверенных на практике конструктивных и технологических решений стандартной КМОП–технологии к КНИ–подложкам

5. Наконец, изготовленные по технологии КНИ устройства обладают значительно большей радиационной стойкостью, особенно важной для применения электроники в космической и атомной технике. Это связано с тем, что в таких ИС рабочий сбой, вызванный нештатным пробоем между истоком и стоком, происходит только при попадании ионизирующей частицы непосредственно в область канала, а ионизация в остальной подложке никакой роли не играет.

По этим причинам IBM начала интенсивные исследования и разработки, направленные на совершенствование предложенной технологии и в 1994 году продемонстрировала прототип процессора на базе КНИ (проектная норма 350 нм). Однако эта разработка в серийное производство не пошла, так как подложки с окислом еще не позволяли воспроизводимо получать нужные характеристики приборов из-за неконтролируемых дефектов и в подложке, и в пленке при том, что в то же время традиционная технология на основе объемного кремния непрерывно совершенствовалась. Только летом 1998 года удалось выпустить полнофункциональный 64–битный процессор PowerPC (технология 220 нм), который, действительно, оказался почти на 30 % быстрее своего традиционного аналога. В следующем 1999 году IBM приступила к выпуску первого поколения микропроцессоров RS-6000 на КНИ–пластинах собственного производства.

Эта технология стала все шире использоваться и другими производителями. В 2000 г. фирмы Motorola и AMD объединили усилия для адаптации процесса изготовления их 64–разрядных процессоров G4 Power PC и Hammer, выполненных на объемном кремнии, к 180–

нанометровой КНИ–технологии. В марте 2001 года корпорации IBM, Sony и Toshiba также объявили о сотрудничестве для разработки технологии производства нового типа приборов «супер–компьютеров–на–чипе» (англ. *System On Chip*) — также на основе структур КНИ. В 2002 году AMD на основе лицензионной библиотеки IBM выпустила высокоэкономичный сверхбыстрый процессор Claw-Hammer для переносных персональных компьютеров и серверов, изготовленный на КНИ–пластинах по 130–нанометровой технологии. Эта тенденция продолжалась и при переходе к проектным нормам 90 и 65 нанометров, в том числе для мультиядерных процессоров. Во всех случаях производительность повышалась на 25–30 % при той же тактовой частоте и потребляемой мощности.

Известным исключением стала корпорация Intel, которая вплоть до десятого поколения процессоров Intel Core 2, выполненных по технологическому процессу 45/32 нанометров, использовала обычные монокристаллические кремниевые пластины, а для достижения требуемых характеристик применяла другие инновации, в том числе high- $k$  диэлектрик с металлическим затвором и напряженный кремний. По мнению специалистов Intel, структуры КНИ с толщиной пленки кремния порядка 100 нм (их называют «частично обедненный КНИ» — англ. PD-SOI, *partially depleted SOI*) обладают очень большими подпороговыми утечками в выключенном состоянии. Свободные от этого недостатка сверхтонкие (~15 нм) слои кремния на изоляторе — «полностью обедненный КНИ» (англ. FD-SOI, *fully depleted SOI*) — чрезмерно дороги и увеличивают стоимость каждого процессора на 10 %.

Поэтому при переходе в 2011 году на проектную норму 22 нм КНИ также не использовался в Intel. Вместо этого впервые была применена трехмерная (3D) архитектура СБИС, при которой канал расположен не в плоскости поверхности кремниевой пластины, а перпендикулярно ей. Подробнее особенности и достоинства такой технологии рассматриваются позже.

## 5.2. Технология создания структур КНИ

Основная проблема создания структур КМОП на основе КНИ при использовании привычного SiO<sub>2</sub> в качестве изолятора состоит в том, что слой окисла является аморфным и на нем можно вырастить только

поликристаллическую пленку кремния. Поэтому пришлось искать другие способы создания скрытого изолирующего слоя.

### 5.2.1. Кремний на сапфире (КНС)

Одним из первых направлений была гетероэпитаксия кремния на монокристаллическом сапфире ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), который является отличным диэлектриком, обладает высокой теплопроводностью и уже давно применяется в электронной технике.

#### *Основы гетероэпитаксии: газофазная эпитаксия (CVD)*

В промышленном производстве доминирующим методом получения эпитаксиальных монокристаллических пленок является *газофазная эпитаксия* (ГФЭ), англ. CVD, *chemical vapour deposition* («химическое нанесение из паров»). В этом методе в вакуумную камеру подаются выбранные газовые смеси, содержащие кремний (а также, при необходимости, легирующую примесь) и на нагретой монокристаллической подложке протекает реакция химического восстановления кремния с удалением летучего остатка. Чаще всего рабочим газом является низший гидрид кремния моносилан  $\text{SiH}_4$ , который является бесцветным газом с неприятным запахом. Его восстановление происходит по схеме:  $\text{SiH}_4 (\text{г}) \rightarrow \text{Si} (\text{т}) + 2\text{H}_2 (\text{г}) \uparrow$ , где буквы г и т обозначают газообразную и твердую фазу соответственно.

Оставшиеся на поверхности подложки атомы кремния образуют упорядоченную структуру, которая определяется тем, насколько сильно эти атомы взаимодействуют с атомами подложки и друг с другом. При сильном ориентирующем влиянии подложки первые слои пленки практически повторяют кристаллографическое строение ее поверхности. Однако с ростом толщины покрытия влияние подложки ослабевает и все более энергетически выгодным становится формирование кристаллической структуры, характерной для массивного материала пленки. Поэтому, начиная с определенной толщины, на поверхности растет монокристаллическая пленка этого материала, которая, как правило, имеет более совершенную структуру и более высокую степень очистки, чем объемный монокристалл.

---

**Эпитаксия** (от греч. *επι* — на и *ταξις* — упорядоченность) — ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки).

В случае большого рассогласования постоянных решетки пленки и подложки в начальном переходном слое возникают сильные механические напряжения и образуются многочисленные дефекты: двойники, дислокации и другие.

Кристаллическая решётка кремния гранцентрированная кубическая типа алмаза, а у сапфира ромбоэдрическая, состоящая из гексагональных ячеек. В зависимости от грани различие в постоянных решетки может составлять от 4 до 12 %. Кроме того, существенно различаются и коэффициенты теплового расширения, что приводит к дополнительным напряжениям в кремнии при охлаждении.

Для устранения образовавшихся дефектов и получения качественных структур приходится нагревать подложки до высокой температуры (более 800 °С). Верхний предел рабочих температур ограничен 1150–1200 °С, так как при более сильном нагреве кремний и водород активно взаимодействуют с сапфировой пластиной с образованием алюминия и его летучих соединений. В результате в приповерхностной области сапфира возникают многочисленные дефекты кристаллической структуры и на ней может расти только поликристаллическая плёнка кремния.

Преимущество ГФЭ заключается в том, что она обеспечивает равномерный по толщине рост слоя на подложках больших размеров. Этим методом можно получать монокристаллические пленки самых разнообразных материалов и легировать их большим количеством примесей.

Однако, конечно же, есть и проблемы. Прежде всего, нужно обеспечить чистоту напускаемых газов не меньшую, чем в используемых твердотельных материалах, а это очень непросто сделать. При нанесении многокомпонентных пленок или при легировании необходимо прецизионно контролировать соотношение компонентов в напускаемых смесях. Для системы КНС есть и специфическая особенность: из-за достаточно высоких температур в процессе роста происходит

---

**Двойникование** — образование в определенной плоскости монокристалла областей, которые являются либо зеркальным отражением атомной структуры материнского кристалла, либо ее поворотом вокруг кристаллографической оси.

**Дислокации** — дефекты кристаллической решетки, представляющие собой линии, вдоль которых нарушено правильное чередование атомных плоскостей.

автолегирование кремния алюминием (акцепторная примесь), вызванное диффузией алюминия из подложки в растущий слой, что приводит к неконтролируемым изменениям его электронных свойств. Наконец, силаны чрезвычайно легко окисляются. Например, моносилан в присутствии кислорода окисляется со вспышкой даже при температуре жидкого азота, а  $\text{Si}_3\text{H}_8$  (трисилан) к тому же является легко летучей ядовитой жидкостью. Все это требует принятия специальных мер безопасности, в результате чего технология становится более дорогой.

### ***Основы гетероэпитаксии: молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ)***

Другим возможным способом получения эпитаксиальных слоев является МЛЭ, *молекулярно-лучевая эпитаксия* (англ. МВЕ, *molecular beam epitaxy*). В основе метода лежит осаждение испаренного в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку. Для каждого из наносимых компонентов предусмотрен отдельный источник того или иного типа, позволяющий прецизионно регулировать скорость напыления. Возможность резкого прерывания и последующего возобновления процесса напыления (с помощью специальных заслонок) позволяет выращивать многослойные гетероструктуры строго контролируемой толщины с моноатомно гладкими границами и с заданным профилем легирования. В установках МЛЭ имеется возможность исследовать качество плёнок *in situ*, то есть непосредственно в процессе роста. К достоинствам метода относится и относительно низкая температура роста (от 500 до 800 °С).

Несмотря на достаточно простую идею, реализация данной технологии требует чрезвычайно сложных технических решений. В установке необходимо получить и поддерживать сверхвысокий вакуум (давление не более  $10^{-8}$  Па) для того, чтобы исключить возможность загрязнения растущей пленки из остаточной атмосферы. Чистота испаряемых материалов также должна быть очень высокой (99,999999 %). При этом скорость роста пленки остается невысокой (обычно не более 1000 нм в час), а равномерные по толщине слои могут быть получены только на весьма ограниченной площади подложки.

Таким образом, высокая стоимость оборудования и малая производительность существенно ограничивают возможность применения МЛЭ в массовом производстве СБИС.

### ***Современная технология КНС (UltraCMOS)***

Что касается технологии КНС, которая более 25 лет успешно использовалась в радиационно – стойких космических и специальных изделиях, то первоначальные попытки применить ее в КМОП СБИС успехом не увенчались. По рассмотренным выше причинам не удавалось получить достаточно совершенные монокристаллические пленки необходимой для систем кремний–на–изоляторе толщины. К тому же и стоимость сапфировых подложек была намного больше, чем кремниевых. Поэтому постоянно проводился поиск других способов создания заглубленного слоя изолятора под монокристаллической пленкой Si, которые обсуждаются в следующих разделах.

Тем не менее, технология кремний–на–сапфире также продолжала развиваться. В 2002 г. компания Peregrine Semiconductor из США совместно с японской фирмой АКМ (*Asahi Kasei Microsystems Corp.*) разработала новую технологию *UltraCMOS*, которая позволила намного улучшить качество слоев кремния на сапфировой подложке и уменьшить их толщину до 100 нм и менее.

Суть этой технологии, которая включает три основных этапа, поясняется на рис. 5.2.

1. Сначала проводится традиционная эпитаксия кремния на сапфире, при которой на гетерогранице неизбежно возникает переходной слой с очень высокой плотностью микродвойников и прочих дефектов.

При дальнейшем росте, как отмечалось выше, число этих дефектов уменьшается и для пленок достаточной толщины (около 600 нм) на поверхности формируется монокристаллическая пленка кремния, практически не содержащая дефектов (рис. 5.2 а).

---

**Peregrine Semiconductor** — крупный разработчик высокопроизводительных радиочастотных (англ. RF, *radio frequency*) КМОП ИС для оборонной и космической промышленности, а также для беспроводных мобильных устройств (в т. ч. iPhone, iPad и Galaxy). Основана в 1990 г., San Diego (США). Веб-сайт: [www.psemi.com](http://www.psemi.com).

**АКМ** — крупнейший производитель сенсоров, аналоговой и RF цифровой электроники, в основном, для различных устройств мобильной связи. Основана в 1931 году, Токио (Япония). Веб-сайт: <http://www.akm.com>.

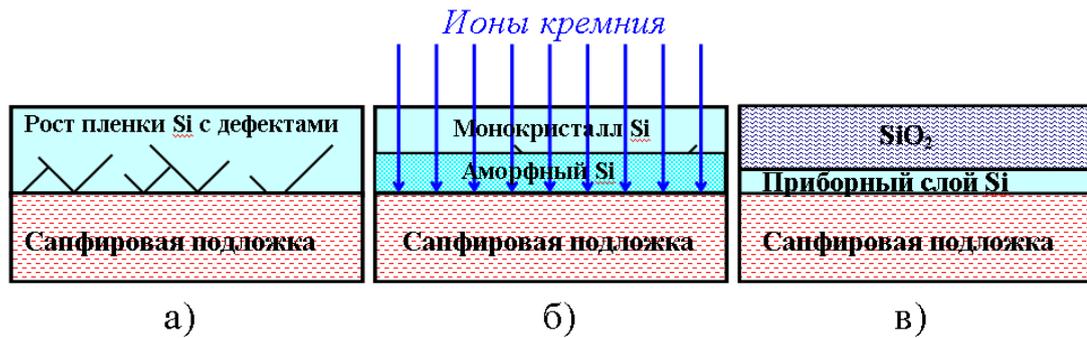


Рис. 5.2. Этапы технологии UltraCMOS выращивания структур КНС.

- а) Эпитаксия кремния на сапфире; переходной слой содержит дефекты двойникования.
- б) Облучение ионами кремния и аморфизация дефектного слоя.
- в) Твердофазная эпитаксия аморфного слоя и последующее окисление поверхности.

2. Полученная структура облучается ионами кремния так, чтобы они попали в каналы между параллельными рядами атомов верхнего слоя и прошли сквозь него, почти не теряя энергию и не создавая радиационных дефектов. В переходном слое эти каналы разрушены и движущиеся в нем ионы испытывают многочисленные столкновения с атомами кристалла, выбивая их из узлов. Выбитые атомы, как правило, имеют энергию, достаточную для того, чтобы и самим участвовать в подобном процессе.

В результате вдоль траектории каждого иона возникают каскады столкновений, приводящие к появлению большого числа подвижных точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов). Взаимодействие этих дефектов между собой (и с уже имеющимися дефектами) приводит к образованию устойчивых нарушений кристаллической структуры вплоть до полной ее аморфизации.

На этом и основана идея метода. Энергия ионов и доза

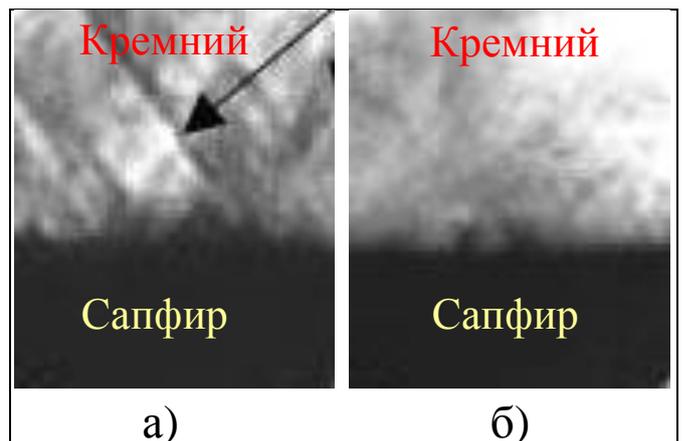


Рис. 5.3. Изображение гетерофазной границы раздела КНС в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) для традиционной технологии(а) и для UltraCMOS (б); стрелкой показаны дефекты двойникования.

облучения выбираются так, чтобы весь переходной слой перешел в аморфное состояние, но сама сапфировая подложка не была при этом затронута (рис. 5.2. б).

3. На следующем этапе (рис. 5.2. в) структура сначала отжигается при температуре  $\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  для восстановления исходной кристаллической структуры аморфного слоя по механизму эпитаксиального наращивания, начинающегося от верхнего ненарушенного слоя, который играет роль ориентирующей подложки (затравки). При этом, как показывают данные ПЭМ на рис. 5.3 б, удается заметно улучшить качество нижних слоев Si вплоть до границы раздела с сапфиром.

На заключительной стадии этого этапа поверхность кремния термически окисляется так, чтобы на сапфире осталась пленка кремния требуемой толщины, а затем окисел удаляется.

С тех пор и до настоящего времени компания Peregrine Semiconductor непрерывно совершенствует эту технологию и успешно ее применяет для производства КМОП ИС на базе КНС с высокой степенью линейности для различных сотовых систем с цифровыми интерфейсами, а также для переключателей, перестраиваемых антенн и при разработке технологии интеграции сложных системных функций в один кристалл. К началу 2014 года совокупный объем коммерческих рынков составил 700 млн устройств, изготовленных по технологии UltraCMOS.

Единственным недостатком сапфировой подложки является ее стоимость, которая сопоставима со стоимостью подложки на базе GaAs или некоторых других подложек КНИ. Для удешевления продукции специалисты компании разработали такой техпроцесс, который на 99 % совпадает со стандартной КМОП–технологией, а 1 % приходится на обработку, метрологию и скрайбирование сапфировых подложек. Кроме того, стоимость сапфировых подложек быстро снижается благодаря огромному спросу на светодиоды белого свечения, которые также на них изготавливаются. Ожидается, что ежегодное потребление этих подложек составит десятки миллионов штук. Таким образом, технология КНС остается весьма перспективной для массового выпуска надежной и недорогой продукции благодаря простоте использования изолирующего

материала подложки и его преимуществам, которые не обеспечивает ни один другой материал.

В заключение отметим, что в конце 2013 года сооснователи компании Peregrine Semiconductor Марк Бургенер (Mark Burgener) и Роналд Риди (Ronald Reedy), получили престижную американскую премию Noble Award за исследование и разработку технологии кремния на сапфире.

### *Технология КНС в Российской Федерации*

В Российской Федерации разработкой и выпуском электронных изделий на основе КНС занимается несколько производителей. Среди наиболее крупных из них группа компаний "Ангстрем," которая выпускает по технологии КМОП + «кремний на сапфире» радиационно – стойкую электронно – компонентную базу (ЭКБ), в основном, по заказам Роскосмоса и Министерства обороны. Первое время использовалась топологическая норма 800 нм и пластины сапфира диаметром 150 мм, однако сравнительно недавно сообщалось о подготовке к запуску новой линии проектной мощностью 4000 пластин в месяц с топологическим размером 350–250 нм на пластинах диаметром 200 миллиметров. По оценкам экспертов, объем российского востребованного рынка радиационно – стойкой ЭКБ составляет 1,5 – 2 миллиарда рублей, из которых на долю «Ангстрема» приходится около 70 %.

Стоит упомянуть и ЗАО «Эпиэл», успешно освоившее выпуск структур КНС диаметром 76, 100 и 150 мм для таких применений как Тензо – модули и Спецстойкие интегральные схемы (СБИС спецназначения).

---

**НПО «Ангстрем»** (Зеленоград) — один из крупнейших производителей ИС в России, странах СНГ и Восточной Европы, является головным разработчиком и основным поставщиком специальных электронных компонентов и изделий микроэлектроники для стратегических отраслей российской экономики, включая оборонную и космическую, производит также широкий спектр изделий для массового потребительского рынка. Входит в состав группы компаний «Ангстрем», объединяющей расположенные в Зеленограде предприятия, которые осуществляют разработку, проектирование и производство высокотехнологичных изделий электронной техники. Веб-сайт: <http://www.angstrem.ru>.

ЗАО «Эпиэл» (Москва) было основано в 1998 году на базе двух крупных российских полупроводниковых заводов «МИКРОН» и «ЭЛМА», является крупнейшим поставщиком кремниевых эпитаксиальных структур для микроэлектроники в России и СНГ. Веб-сайт: [www.epiel.ru](http://www.epiel.ru).

## 5.2.2. Создание скрытого окисла ионной имплантацией (SIMOX)

Альтернативой КНС при создании структур КНИ является возврат к традиционному изолятору  $\text{SiO}_2$  и поиск таких технологий, которые позволяют получить под тонкой монокристаллической пленкой Si скрытый (часто говорят «захороненный», англ. *buried*) слой окисла и могут быть использованы при серийном производстве КМОП СБИС.

### *Идея ионного синтеза*

Разработчики корпорации IBM, которая, как уже отмечалось, первой начала массовый выпуск СБИС на КНИ, в качестве такой технологии избрали ионный синтез окисла в глубине кремния путем имплантации ионов кислорода и последующего отжига при высокой температуре.

Впервые возможность подобного синтеза была независимо продемонстрирована двумя группами ученых — М. Watanabe и А. Тооi в Японии (1966 г.) и П. В. Павловым и Э. В. Шитовой в СССР (1967 г.). В этих публикациях, однако, не ставилась задача получения КНИ структур и исследования в этом направлении не получили продолжения. Только в 1978 году в японской *Musashino Electrical Communication Laboratory* была изготовлена первая КМОП ИС на основе такой КНИ структуры. Один из авторов разработки К. Izumi назвал тогда эту технологию SIMOX (англ. *Separation by IMplantation of OXygen*) — название сохранилось и до сих пор. Первоначально технология задумывалась как возможный способ решения основных проблем КНС — автолегирования алюминием кремниевых слоев и их низкого качества. Добившись первого успеха, Изуми и его команда приступили к всестороннему изучению механизмов формирования SIMOX структур и совершенствованию предложенной технологии.

Первоначальная реализация SIMOX состояла из двух этапов. На первом проводилась имплантация ионов  $^{16}\text{O}^+$  с энергией  $\sim 200$  кэВ в

---

**M. Watanabe, A. Tooi.** Formation of  $\text{SiO}_2$  Films by Oxygen-Ion Bombardment. *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 5, p. 737-8, 1966.

**P.V. Pavlov, E.V. Shitova.** The Structure of Oxide Films Obtained by Oxygen Ion Bombardment of a Silicon Surface. *Soviet Physics Doklady*, Vol. 12, p.11, 1967.

**K. Izumi, M. Doken, H. Ariyoshi.** CMOS devices fabricated on buried  $\text{SiO}_2$  layers formed by oxygen implantation into silicon. *Electronics Letters*, Vol. 14, № 18, p. 593–594, 1978.

приповерхностную область кремниевой пластины, причем при очень высоких дозах облучения (около  $2 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^2$ ), необходимых для ионного синтеза окисла. Для того, чтобы избежать аморфизации слоя во время облучения такими дозами, оно должно проводиться при повышенной температуре (оптимально при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ). При этом доза облучения определяет толщину скрытого окисла, а энергия ионов — глубину его нахождения под поверхностью. Скрытый слой  $\text{SiO}_2$ , образовавшийся в результате ионного синтеза непосредственно в процессе имплантации, окружен кремнием с высокой плотностью радиационных дефектов (в основном, дислокаций и преципитатов окисла). Поэтому необходим высокотемпературный отжиг, позволяющий устранить большую часть дислокаций и растворить преципитаты. При растворении преципитатов происходит их коалесценция: более мелкие частички оксида распадаются и диффундируют к более крупным, которые их поглощают. Согласно законам термодинамики этот процесс должен продолжаться до тех пор, пока размеры всех преципитатов в кремниевой матрице не станут одинаковыми.

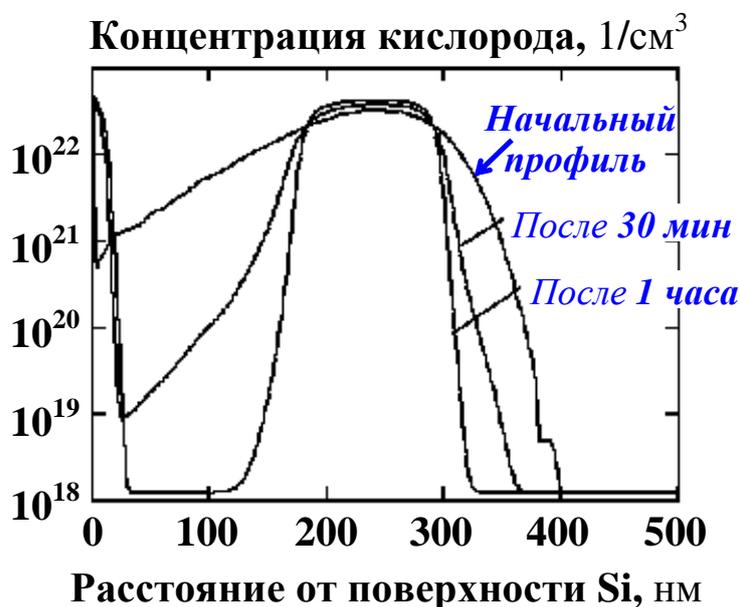


Рис. 5.4. Результаты моделирования эволюции профиля имплантированного в кремний кислорода в процессе отжига при  $1340 \text{ }^\circ\text{C}$ .

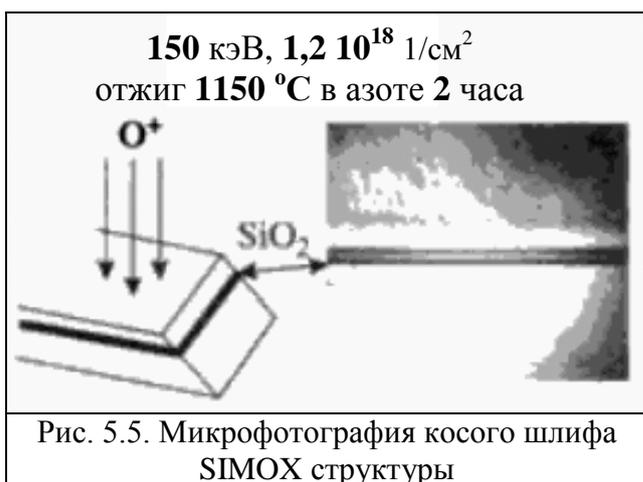
**Преципитат** (от лат. *praecipitatio* — стремительное падение) — образование частиц твёрдой фазы в результате химической реакции.

**Коалесценция** (от лат. *coalesce* — срастаюсь, соединяюсь) — слияние подвижных частиц внутри среды под действием сил межмолекулярного притяжения, которое сопровождается их укрупнением и уменьшением свободной энергии системы.

Поэтому в тех областях кристалла, где объемная концентрация кислорода ниже определенного критического значения, формирования скрытого окисла не происходит и кислород перераспределяется в процессе отжига между поверхностью и скрытым слоем оксида, который действует как самый большой по размерам преципитат (рис. 5.4).

В результате возникает приповерхностная область, практически свободная от кислорода, а на поверхности и в глубине формируется однородный по толщине оксидный слой. Существование скрытого слоя SiO<sub>2</sub> с резкой границей непосредственно подтверждено опытным путем еще в 1976 г. в одной из пионерских работ с помощью металлографии (рис. 5.5).

Одновременно было экспериментально доказано, что после удаления поверхностного окисла и углеродных загрязнений над захороненным изолирующим слоем находится пленка кремния, которая



осталась монокристаллической. Таким образом, уже тогда было показано, что технология SIMOX соответствует всем необходимым требованиям для реализации КМОП ИС на основе КНИ.

Качество оксидного слоя оставалось, однако, не очень высоким. Поэтому в дальнейшем пришлось повысить температуру

отжига в атмосфере аргона со следами кислорода выше 1300 °С, а его продолжительность до 5 часов. В результате удалось получить практически бездефектную пленку кремния толщиной 180 нм на слое достаточно совершенного оксида толщиной 350 нм (рис. 5.6).

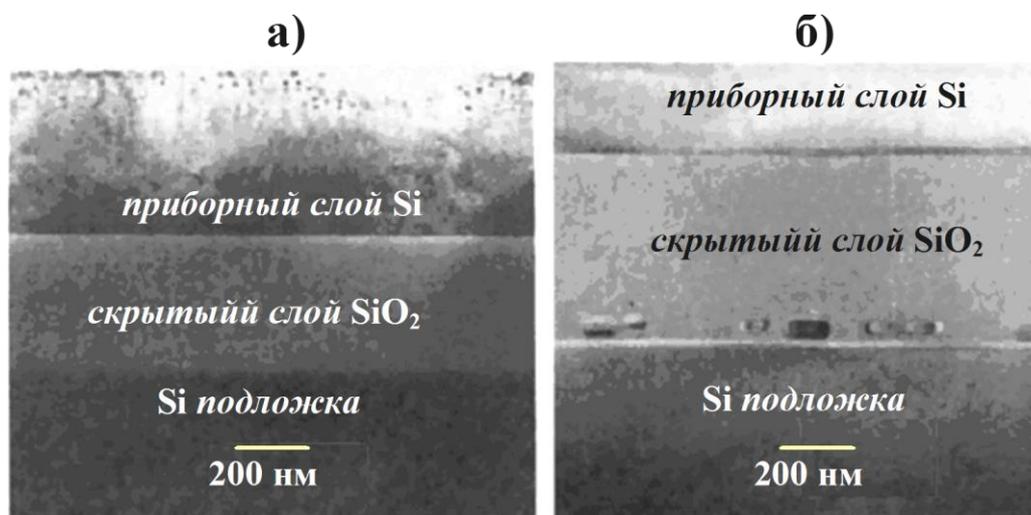


Рис. 5.6. Поперечное сечение структур КНИ при стандартной SIMOX обработке, полученное с помощью ПЭМ. а) Сразу же после имплантации; б) после высокотемпературного отжига.

### ***Технологические проблемы ионного синтеза***

Однако до внедрения этой технологии в массовое производство даже приборов с относительно низкой степенью интеграции (англ. LSI, *large scale integration*) было еще очень далеко, так как оставались нерешенными две серьезных проблемы.

1. Доступные в то время ускорители ионов не были рассчитаны на такие большие дозы, которые на 2–3 порядка превышали значения, необходимые для обычной ионной имплантации. Максимальный ток ионного пучка не превышал 100 мкА и для облучения кремниевой пластины диаметром 100 мм дозой  $1,2 \cdot 10^{18} \text{ O}^+/\text{cm}^2$  требовалось неприемлемо большое время — 65 часов. Только в 1984 году была создана более мощная установка (имплантер ионов кислорода) нового поколения с использованием в источнике ионов электронного циклотронного резонанса и с током на три порядка больше. Время обработки удалось сократить до 5 часов. Это резко возродило интерес к исследованиям в данном направлении у других производителей, к числу которых прежде всего относятся корпорация IBM в США и CEA-Leti во

---

**Maria J. Anc.** Perspectives of Simox Technology. В сб. F. Balestra *et al.* (eds) «Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions»,. NATO Science Series. Volume 58, 2002, pp 1-10, Kluwer Academic Publishers (Netherlands)

**Leti** — Лаборатория электроники и информационных технологий (фр. *Laboratoire d'électronique des technologies de l'information*) при CEA — Комиссариат по атомной и альтернативным источникам энергии (фр. *Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies*

Франции. Каждая из них стала разрабатывать собственную версию технологии SIMOX для КМОП.

В результате удалось, в основном, решить проблему технологического оборудования, которое продолжает и сейчас постоянно совершенствоваться, но его стоимость все еще остается весьма высокой.

2. Вторая проблема состояла в том, что верхний (приборный) слой кремния содержал очень высокую концентрацию дислокаций ( $\sim 10^8$ – $10^9$   $1/\text{см}^2$ ), в результате чего характеристики изготавливаемых КМОП-структур резко ухудшались.

Основной причиной возникновения дислокаций является интенсивная генерация точечных дефектов (главным образом, междоузельных атомов) как во время имплантации, так и при последующем отжиге. При облучении, как это уже обсуждалось в предыдущем разделе, атомы выбиваются из узлов кристаллической решетки в результате многочисленных (при больших дозах — чрезмерно многочисленных) каскадов столкновений. Кроме того, в процессе последующей термической обработки протекает реакция внутреннего окисления кремния с образованием стехиометрической фазы  $\text{SiO}_2$ , при которой каждый атом кислорода разрывает связи Si–Si и освобождает себе место, выталкивая соседний атом кремния из узла решетки в междоузлие. Единственным местом, куда междоузельные атомы могут уйти, является поверхность, так как коэффициент диффузии кремния очень мал и атомы не могут проникнуть сквозь скрытый окисел в объем подложки. При большой концентрации междоузельных атомов они собираются в агломераты и образуют обширные области с дислокациями и устойчивыми дефектами. Для уменьшения числа таких дефектов необходимо оптимизировать и режим облучения, и условия отжига.

### ***Технология с пониженной дозой облучения ITOX–SIMOX***

Для снижения плотности дефектов были использованы различные методы: уменьшение энергии ионов, имплантация сквозь экранирующий поверхностный слой окисла, синтез с помощью повторяющихся циклов

имплантация–отжиг и другие. Однако более эффективной оказалась технология, предложенная в 1991 году в той же группе Изуми, позволяющая уменьшить дозу облучения почти в 5 раз. При таком уменьшении толщина синтезированного скрытого окисла тоже заметно уменьшается, а его изолирующие свойства ухудшаются. Для нейтрализации этого эффекта разработчики в 1994 году предложили добавочно использовать высокотемпературное внутреннее окисление кремния (англ. ITOX, *Internal thermal oxidation*) и подтвердили на практике возможность его применения. Эту идею взяли на вооружение специалисты из отделения технического развития (*Technical Development Bureau*) крупнейшей японской металлургической компании *Nippon Steel*, которые с 1989 года занимались проблемой создания КНИ–структур с помощью SIMOX. Они разработали свой собственный вариант подобной технологии, которую назвали ITOX–SIMOX при малых дозах (англ. *low-dose*) и запатентовали в 1995 году.

На первом этапе этой технологии, как и в стандартном процессе SIMOX, проводится облучение нагретой до 550–650 °С кремниевой подложки ионами  $^{16}\text{O}^+$  при энергии 180 кэВ на глубину ~400 нм. Единственное отличие состоит в том, что доза облучения уменьшена с  $1,2 \cdot 10^{18}$  до  $3\text{--}4,5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Как и раньше, перед облучением надо тщательно очистить поверхность от микрочастиц загрязнений до уровня не более 1 см<sup>-2</sup>, чтобы исключить возможность затенения ими ионного пучка.

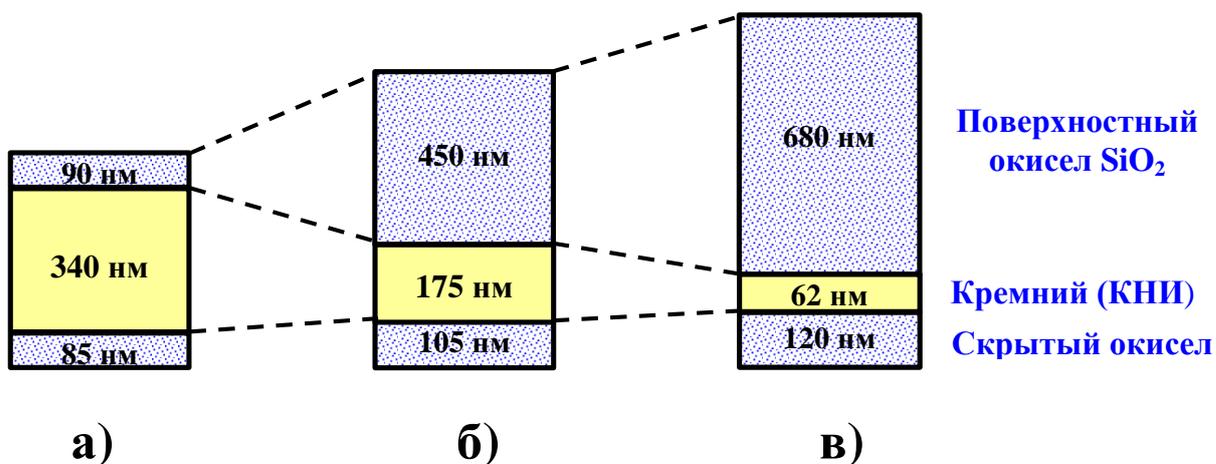


Рис. 5.7. Структура ITOX–SIMOX подложки на различных стадиях технологии.

В результате формируется структура, показанная на рис. 5.7 а,  
SIMOX E=180 кэВ, доза  $3 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

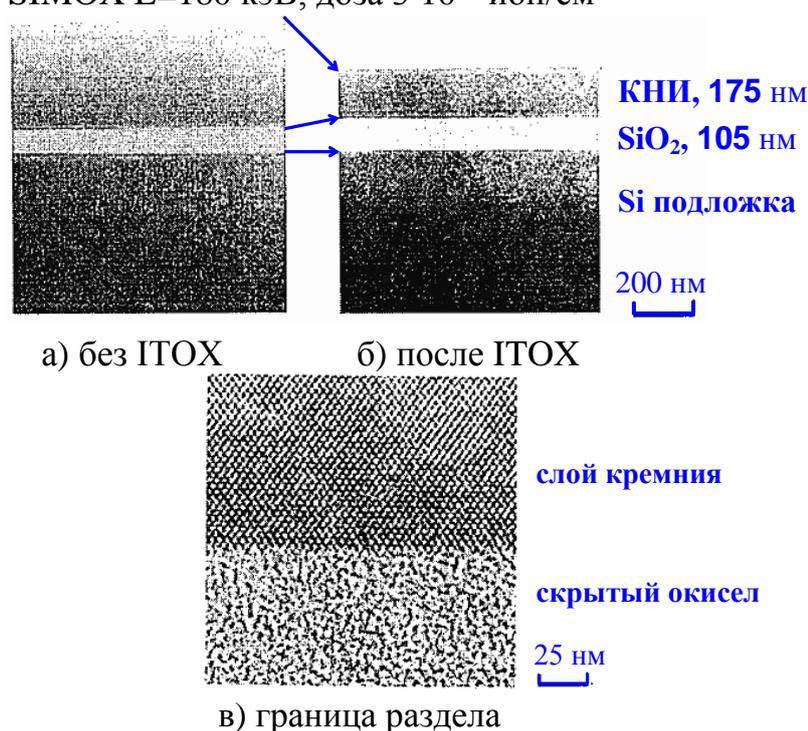


Рис. 5.8. ПЭМ–изображения поперечного сечения SIMOX–структуры после удаления поверхностного слоя окисла.

а) сразу после имплантации; б) после отжига при 1350°C;  
в) увеличенное изображение границы раздела КНИ/SiO<sub>2</sub>.

содержащая, как и раньше, поверхностную пленку окисла и расположенные под ней слой кремния с относительно большой плотностью дислокаций, а также скрытый окисел недостаточно высокого качества и с меньшей, чем обычно, толщиной. Это подтверждается результатами исследования полученных структур в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) высокого пространственного разрешения, представленные на рис. 5.8 а.

Для КМОП технологии на основе КНИ чрезвычайно важно, чтобы приборная пленка кремния была однородна по толщине на всей поверхности пластины подложки. Для того, чтобы обеспечить эту однородность с точностью  $\pm 2$  нм, необходимо поддерживать среднее по всей поверхности значение дозы облучения постоянным в пределах  $\pm 2$  % и обеспечить строгое постоянство энергии ионов на протяжении всего процесса облучения.

Это достигается путем разнообразных и весьма дорого стоящих приемов, среди которых: разработка прецизионных и стабильных источников питания для ускорения и формирования ионного пучка (а также надежных методов контроля дозы облучения), обеспечение однородности пучка при сканировании его по поверхности пластины, исключение влияния эффектов каналирования, поддержание и контроль однородности распределения температуры по пластине на всех этапах процесса и другие.

Прошедший ионную имплантацию образец очищается от поверхностных загрязнений в жидких растворителях и затем подвергается двухступенчатому отжигу при высокой температуре. На первом этапе это происходит в инертной атмосфере (не более 1 %  $O_2$ ), чтобы предотвратить образование вуали на поверхности в результате нежелательных химических реакций. Как и в обычной технологии SIMOX, при этом отжигаются радиационные дефекты, созданные в процессе облучения, и формируется заглубленный слой окисла. Затем в камеру напускается кислород и при той же температуре ( $> 1300\text{ }^\circ\text{C}$ ) начинается окисление подложки, т. е. собственно процесс ИТОХ. Толщина скрытого окисла при этом растет за счет внутреннего окисления кремния, а его качество существенно улучшается. Одновременно происходит и термическое окисление поверхности кремния, в результате чего с ростом толщины этого окисла (который впоследствии будет удален) происходит и утоньшение слоя кремния, расположенного под ним (рис. 5.7 б и в и 5.8 б). Таким способом удается получать сверхтонкие слои КНИ с толщиной 50 нм и менее, необходимые в технологии КМОП СБИС.

Правда, длительная (несколько часов) обработка при высокой температуре ведёт к значительным финансовым затратам вследствие расхода материала рабочего слоя на термическое окисление. Кроме того, при таких температурах значительно ослабевают межатомные силы, удерживающие атомы кремния в узлах решетки, и может играть существенную роль образование дефектов, обусловленных сдвигом кристаллографических плоскостей относительно друг друга. Для того, чтобы устранить такую возможность, необходимо контролировать с

высокой точностью режим охлаждения образца после окончания процесса.

В целом, предложенная технология ITOX–SIMOX обеспечила возможность получения на изоляторе ультратонких пленок кремния с плотностью дислокаций от 100 до 1000 1/см<sup>2</sup>, резкой бездефектной границей раздела с окислом (рис. 5.8 в,) и с очень гладкой поверхностью (неровности не больше  $\pm 1$  постоянной решетки Si). Это было подтверждено непосредственно результатами исследования с помощью атомно–силового микроскопа (АСМ), представленными на рис. 5.9.

Параллельно технология SIMOX с пониженной дозой облучения и последующим высокотемпературным отжигом в той или иной среде разрабатывалась и в других ведущих компаниях, прежде всего в IBM. Благодаря авторитету этой корпорации, ее технология была принята (и приобретена по лицензии) рядом крупных производителей в США, Европе и Японии. В настоящее время считается, что SIMOX является одним из наиболее перспективных направлений технологии КНИ как для производства радиационно–стойких электронных устройств, так и для использования в КМОП–СБИС технологии.

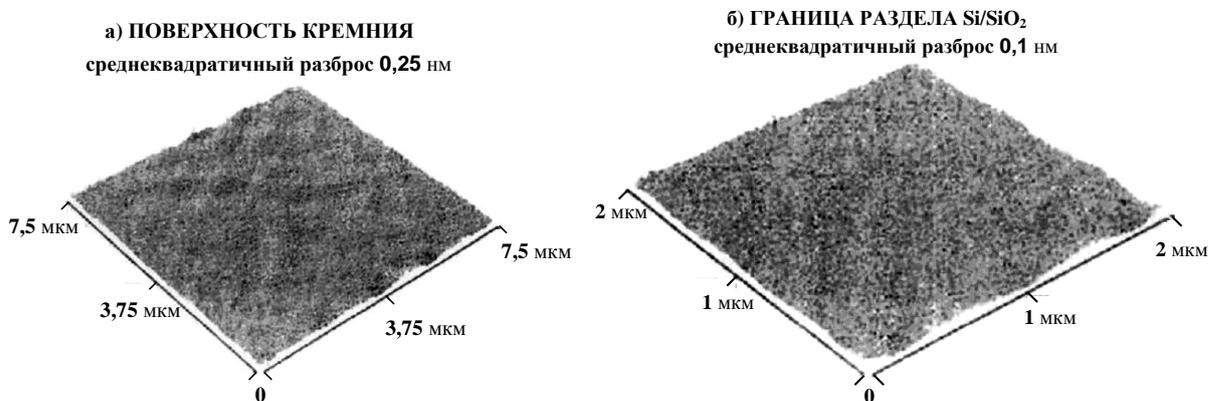


Рис. 5.9. АСМ изображения поверхности кремния (а) и границы раздела (б) для структур КНИ, полученных по технологии ITOX–SIMOX.

Совершенствование этой технологии непрерывно продолжается и уже составлены планы ее применения (подробная «дорожная карта», англ. *roadmap*) при переходе на проектную норму 10 нм, который намечен на 2018 год.

### 5.2.3. Твердофазное сращивание пластин (*wafer bonding*, BESOI)

Еще один перспективный путь создания структур КНИ без использования дорогостоящего (более 7 миллионов долларов США) оборудования для ионной имплантации, заключается в прямом сращивании при высокой температуре двух кремниевых пластин, поверхность одной из которых предварительно термически окислена, при последующем утончении рабочего слоя кремния. Этот метод был предложен в начале 1986 года в Генеральном подразделении IBM по технологии (*IBM General Technology Division*) и получил название *Wafer Bonding and Layer Transfer* (*Сращивание подложек с переносом слоя*), которое впоследствии сократилось просто до *Wafer Bonding*. Ближе к концу того же 1986 года очень похожая технология была независимо представлена и обоснована разработчиками Центра исследований и развития (*Research and Development Center*) японской корпорации Toshiba, только в этом случае речь шла о сращивании пластин кремния с противоположными типами проводимости без промежуточного окисла.

#### *Идея и технологический маршрут твердофазного сращивания*

При использовании технологии сращивания пластин (англ. *wafer bonding*) образование поверхностного слоя производится путём прямого сращивания второй кремниевой пластины со слоем диоксида на первой. Для этого гладкие, очищенные и активированные за счёт химической или плазменной обработки пластины подвергают сжатию и отжигу, в результате чего на границе пластин происходят химические реакции, обеспечивающие их соединение. После этого уже не нужная часть второй пластины безвозвратно стравливается каким-либо способом так, что на поверхности подложки с окислом остается только приборный слой кремния требуемой толщины, т. е. КНИ.

---

**Lasky J.B.** Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies. *Appl. Phys. Lett.* V. 48, No 1, p. 78–80, 1986.

**Shimbo M.** et al. Silicon-to-silicon direct bonding method. *J. Appl. Phys.* V. 60, N0 8, p. 2987–2989, 1986.

**Toshiba** (*Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.*) — крупный международный концерн, работающий в области электротехники, электроники, энергетического и медицинского оборудования. Создана в 1939 г. из двух старейших японских компаний: [Tanaka Engineering Works](#) и [Hakunetsu-sha & Co](#), начинавших с производства телеграфного и электрического оборудования. Штаб-квартира в одном из [двадцати трёх специальных районов Токио Минато](#). Веб-сайт: <http://www.toshiba.ru>.

В последнее время для обозначения технологий подобного типа в мировой научной литературе (включая и отечественную) все чаще стали использовать сокращение BESOI — *Bonded and Etch-back SOI* (*Сращенные и стравленные с обратной стороны КНИ*).

Рассмотрим подробнее основные технологические этапы процесса прямого твердофазного сращивания (англ. *direct bonding*) двух кремниевых пластин для получения структуры КНИ.

1. Из двух участвующих в процессе монокристаллических пластин кремния одинакового диаметра (до 300 мм) одна (приборная) предварительно термически окисляется до требуемой толщины так, чтобы получить высококачественный слой  $\text{SiO}_2$  — будущего скрытого изолятора (рис. 5.9 а).

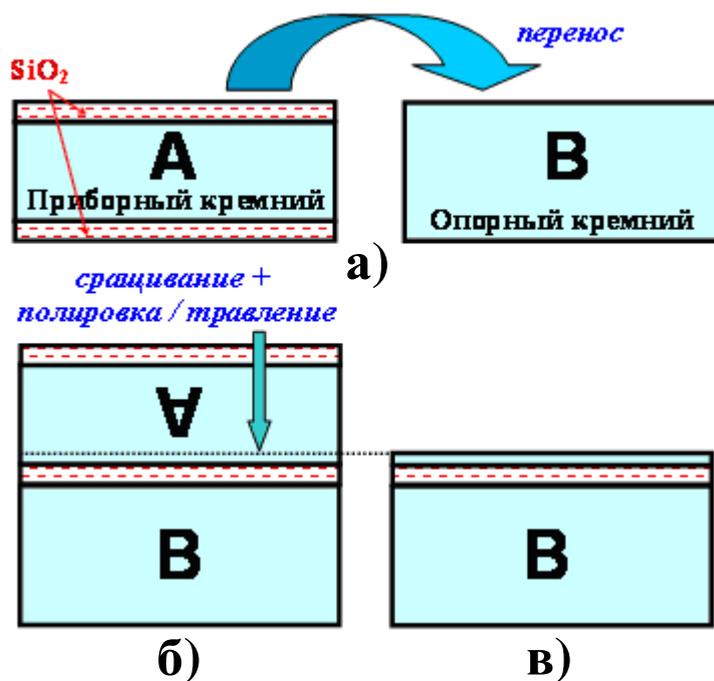


Рис. 5.9. Технологическая схема получения структур КНИ: методом прямого сращивания пластин (*wafer bonding*, BESOI).

а) Исходные пластины; б) сращивание приборной и опорной пластин и удаление излишней части приборной пластины; в) окончательный продукт.

Затем поверхности обеих пластин полируются с применением химических и плазменных методов, а также химико-механической полировки до получения средних значений шероховатости на уровне постоянной решетки ( $\sim 0,4$  нм), а в особых случаях и меньше (до  $\sim 0,2$  нм).

После этого проводится очень важная для успеха последующего срачивания пластин процедура тщательной очистки поверхностей от пылевидных частиц (кремниевой и кварцевой крошки, частиц металлов, органических и неорганических соединений).

Разработаны различные способы сухой или мокрой очистки, позволяющие сделать это. Стандартная промышленная химическая очистка (англ. *SC, Standard Clean*) обычно обозначается RCA и включает две последовательных обработки поверхностей в следующих растворах:

1. SC1: ( $\text{NH}_4\text{OH}$  (29 %) +  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30 %) + деиониз.  $\text{H}_2\text{O}$  [1 : 1 : 5]) при 70–80 °С в течение 5–10 мин для удаления органических частиц и загрязнений;

2. SC2: ( $\text{HCl}$  (37 %) +  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30 %) + деиониз.  $\text{H}_2\text{O}$  [1 : 1 : 6]) при 80 °С 10 мин для удаления металлических ионов.

По окончании очистки поверхности промываются деионизованной водой. По данным фирмы *Canon*, плотность оставшихся на поверхности дефектов достигает 1 см<sup>-2</sup>, когда пластины обрабатывались по классу чистоты 1000, и снижается до 0,06 см<sup>-2</sup>, если класс чистоты был на уровне 1.

Поверхности подложек перед срачиванием должны быть не только чистыми и гладкими, но и гидрофильными, а для этого на них должно находиться не менее 4–6 полярных ОН–групп/нм<sup>2</sup>, которые адсорбируют добавочные молекулы воды. Как правило, такой результат получается путем обработки поверхности струей сверхчистой деионизованной воды в специализированных камерах. На поверхности пластин при этом образуется и слой естественного окисла толщиной 1–2 нм.

После активирования обеих поверхностей описанным способом проводится заключительная и тоже очень важная стадия этого этапа — сушка подложек. Наиболее распространенным способом сушки

---

**Canon Inc.** — японская машиностроительная компания, один из мировых лидеров в области создания цифрового оборудования для использования в офисе и дома. Со времени основания в 1937 году компания Canon заняла уверенные позиции в сферах фото-, видеотехники и информационных технологий. Главный офис компании расположен в Токио (Япония). Веб-сайты: [canon.com](http://canon.com) (англ.), [canon.ru](http://canon.ru) (рус.)

**Гидрофильность** (от др. греч. ὕδωρ — вода и φίλια — любовь) — характеристика интенсивности молекулярного взаимодействия вещества с водой, способность хорошо впитывать воду, а также высокая смачиваемость поверхностей водой (краевой угол капли воды < 5 °).

является использование центрифуг с фронтальной загрузкой пластин, позволяющее существенно снизить уровень привносимых загрязнений. Для того, чтобы избежать повторного загрязнения поверхности, сразу же после центрифуги пластины приводятся в соприкосновение, прижимаются друг к другу полированными сторонами с некоторым давлением (стрелка «перенос» на рисунке) и удерживаются так за счет достаточно сильной адгезии.

2. Вторая стадия этой технологии заключается непосредственно в твердофазном сращивании подложек (рис. 5.9 б). Поскольку обе поверхности покрыты слоем воды, то первоначальное сращивание при комнатной температуре происходит под действием сил притяжения между молекулами воды, хемосорбированными на противоположных сторонах подложек (рис. 5.10) — т. н. сил Ван-дер-Ваальса.

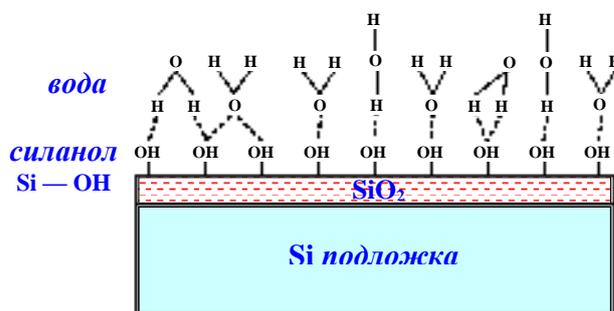


Рис. 5.10. Структура гидрофильного слоя на поверхности пластин перед сращиванием.

Параллельно на границе раздела начинается образование и последующая полимеризация групп силанола Si-OH (см. рисунок), которые увеличивают связь поверхности и с молекулами воды, и с противоположной подложкой за счет возникновения прямых связей Si-O-Si между ними уже при комнатной температуре.

Для усиления созданной связи на следующей стадии проводится предварительный отжиг с постепенным повышением температуры. В интервале от комнатной температуры до 110 °С энергия связи почти не

---

**Адгезия** (от лат. Adhaesio — прилипание) — сцепление поверхностей разнородных твёрдых и/или жидких тел, обусловленное межмолекулярным взаимодействием в поверхностном слое.

**Силы Ван-дер-Ваальса** — межмолекулярные силы, обусловленные взаимодействием между диполями (постоянными и/или индуцированными поляризацией молекул) Энергия такого взаимодействия (10—20 кДж/моль) обратно пропорциональна кубу расстояния между диполями.

**Силанол** — это функциональная группа в химии кремния, образующая связь Si-O-H (с типичным расстоянием Si-O 1,65 Å), во многом аналогичная гидроксильной группе (C-O-H), которая содержится во всех спиртах. Силанол — это не только химическое соединение, но и часто встречающаяся группа на поверхности диоксида кремния и связанных с ними силикатов. Именно его присутствие отвечает за абсорбционные свойства этих веществ.

увеличивается, но молекулы воды диффундируют вдоль границы раздела и перераспределяются так, что образуется все больше Н–Н связей между слоями воды и интерфейс становится более однородным.

При температурах от 110 до 150 °С ускоряется образование силаноловых групп и, кроме того, начинается реакция по такой схеме:  $\text{Si-OH} + \text{OH-Si} \leftrightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$ . Эта реакция превращения силанола ( $\text{Si-OH}$ ) в силоксан ( $\text{Si-O-Si}$ ) с выделением воды обратима и при термодинамическом равновесии с ростом концентрации силанола будет увеличиваться и количество силоксана. Это сокращает длину связи и тем самым существенно усиливает ее. Подъем температуры проводится достаточно медленно, чтобы процессы диффузии и миграции молекул воды вдоль границы успели завершиться, а образующиеся пузырьки воды были полностью удалены с поверхности.

Дальнейший отжиг при температурах от 150 до 800 °С (иногда до 1000 °С) продолжается до тех пор, пока весь захваченный водород не будет удален с границы раздела и прежние связи между срачиваемыми пластинами не будут полностью заменены на наиболее прочные ковалентные  $\text{Si-Si}$  связи, характерные для объемного кремния.

Кроме того, при температурах выше 800 °С естественный окисел становится вязким и начинает заполнять пустоты в интерфейсе, увеличивая тем самым общую площадь связанных поверхностей и уменьшая размеры пор между ним и их количество (вплоть до полного исчезновения) — в интерфейсе от центра к периферии распространяется так называемая «волна контакта». На заключительной стадии этого этапа проводится охлаждение полученной структуры, режим которого подбирается так, чтобы исключить возможность расслоения пластин по месту срачивания.

3. Последний этап процесса заключается в удалении большей части приборной пластины с тем, чтобы на поверхности окисла осталась тонкая

---

**Силоксаны** — соединения, содержащие в молекуле чередующиеся атомы кремния и кислорода. Они обладают рядом уникальных качеств, которые в таком сочетании не встречаются у любых других известных веществ. Это: способность увеличивать или уменьшать [адгезию](#), сохранение свойств при экстремальных и быстроменяющихся температурах или повышенной влажности, диэлектрические свойства, химическая инертность, эластичность, долговечность, экологичность. Широко применяются в электронике, промышленности и бытовой технике.

пленка монокристаллического кремния (рис.5.9 в). Сначала проводится предварительная шлифовка и травление рабочей пластины. После этого применяются различные технологические варианты ее полировки для утончения приборного слоя кремния — механическая обработка, химическое, электро–химическое и сплошное плазмо–химическое травление, часто с применением предварительно созданного в подложке специального стоп–слоя, на котором травление должно останавливаться. Однако на завершающей стадии, как правило, применяется либо прецизионное плазмо–химическое травление (для пленок до 100 нм толщиной), либо рассмотренная ранее химико–механическая планаризация CMP (до 50 и менее нм).

### ***Достоинства и недостатки прямого сращивания пластин***

Описанная технология изготовления КНИ–подложек обладает следующими несомненными достоинствами:

- низкий уровень дефектности приборного слоя, практически такой же, как у монокристаллического кремния наивысшего качества (плотность дислокаций и дефектов упаковки не превышает  $10^2 \text{ см}^{-2}$ );
- возможность изготовления КНИ с практически любой толщиной слоев кремния и изолирующего диэлектрика (с погрешностью не более 2–5 %) на подложках диаметром до 450 мм при отсутствии коробления этих подложек;
- доступность легирования кремния самыми различными примесями со строго контролируемым уровнем и профилем их распределения;
- широкий спектр возможных комбинаций кремния в приборном слое с множеством других материалов ( $\text{A}_3\text{B}_5$ ,  $\text{A}_2\text{B}_6$ , SiC, графен, углеродные нанотрубки и другие);
- совместимость технологического маршрута изготовления структур с традиционными операциями и процессами кремниевой нанотехнологии;
- возможность изготавливать многоуровневые структуры КНИ, трёхмерные (3D) ИС, микроэлектромеханические системы (МЭМС), а также устройства вакуумной микроэлектроники.

Основным недостатком метода является неэкономное расходование материала: на пластине А необходимо удалять слой, практически равный её толщине, оставляя очень тонкую плёнку Si, что на практике достаточно сложно реализовать. При этом из всей этой пластины используется только её малая часть, весь остальной материал полностью теряется и не может вторично использоваться.

Поэтому были разработаны и другие технологии создания КНИ-структур, свободные от этого недостатка, которые обсуждаются в следующих разделах.