

Лекция 8. Технология управляемого скола (*Smart Cut*)

Идея метода

Технология управляемого скола (англ. *Smart Cut*, первоначально *Unicod*) была предложена М. Брюэлом из французской компании Soitec в 1995 году и сейчас, наряду с SIMOX, является одной из основных при изготовлении подложек для КНИ. Она объединяет особенности рассмотренных ранее технологий ионного внедрения и сращивания пластин. Прежде всего, как и в *Wafer bonding*, исходными являются две пластины монокристаллического кремния, одна из которых предварительно окисляется с поверхности. Затем через слой окисла эта пластина подвергается облучению протонами с энергией 30–100 кэВ. По завершении процедуры ионного внедрения пластина переворачивается и накладывается лицевой стороной на вторую пластину, после чего происходит их сращивание. В процессе последующей термообработки в глубинном слое кремния, насыщенном водородом, возникает область скола, по границе которой на завершающей стадии проводится отделение первой пластины, и в результате на поверхности второй остаётся слой КНИ. Отделённая часть первой пластины может использоваться в новом производственном цикле.

Схематически технологический маршрут описанного процесса показан на рис. 5.11.

Bruel M. Silicon on insulator material technology. *Electronics Letters*. V. 31, № 14 (1995). p. 1201 – 1202.

Soitec (*Silicon On Insulator Technology*) была основана в 1992 году во Франции вблизи Гренобля двумя исследователями CEA-Leti и первоначально занималась усовершенствованием SIMOX. В 2005 г. предложила еще и технологию *Smart Cut*. В настоящее время это один из крупнейших производителей подложек КНИ различного типа, концентраторов солнечной энергии и материалов для светодиодов на основе GaN. Веб-сайт: <http://soitec.com/en/>

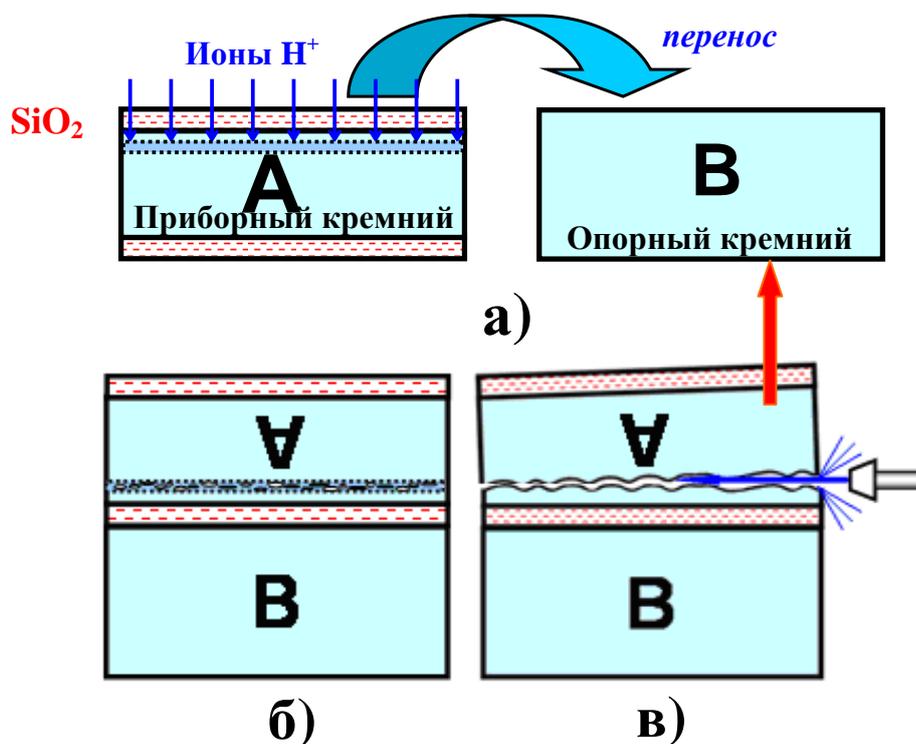


Рис. 5. 11. Технологическая схема *smart-cut*:

- а) имплантация H^+ в пластину А, очистка поверхностей пластин и перенос А на В:
- б) сращивание подложек и образование перенасыщенного водородом слоя:
- в) высокотемпературная термическая обработка, расщепление и разделение пластин.

Рассмотрим этот маршрут подробнее.

Выбор энергии ионов и дозы облучения

Первый этап технологии (рис. 5.11 а) во многом аналогичен описанному в предыдущем разделе. После тщательного входного контроля обеих пластин на наличие загрязнений, прогиба, царапин, матовости, шероховатости и т. д., проводится, как и ранее, их полировка и очистка с помощью химических, химико – механических и плазменных технологий, а затем одна из подложек термически окисляется. Однако, в отличие от предыдущего, перед тем, как создать гидрофильные поверхности для сращивания, окисленная пластина облучается ионами водорода. В результате под окислом на некоторой глубине, зависящей от энергии ионов и толщины оксидной пленки, создается слой кремния, содержащий пересыщенный раствор водорода.

Это ключевая стадия рассматриваемого процесса. Качество расщепления приборной пластины определяется оптимальным выбором технологического режима имплантации и сращивания подложек. В мировой практике для создания слоя, по которому происходит

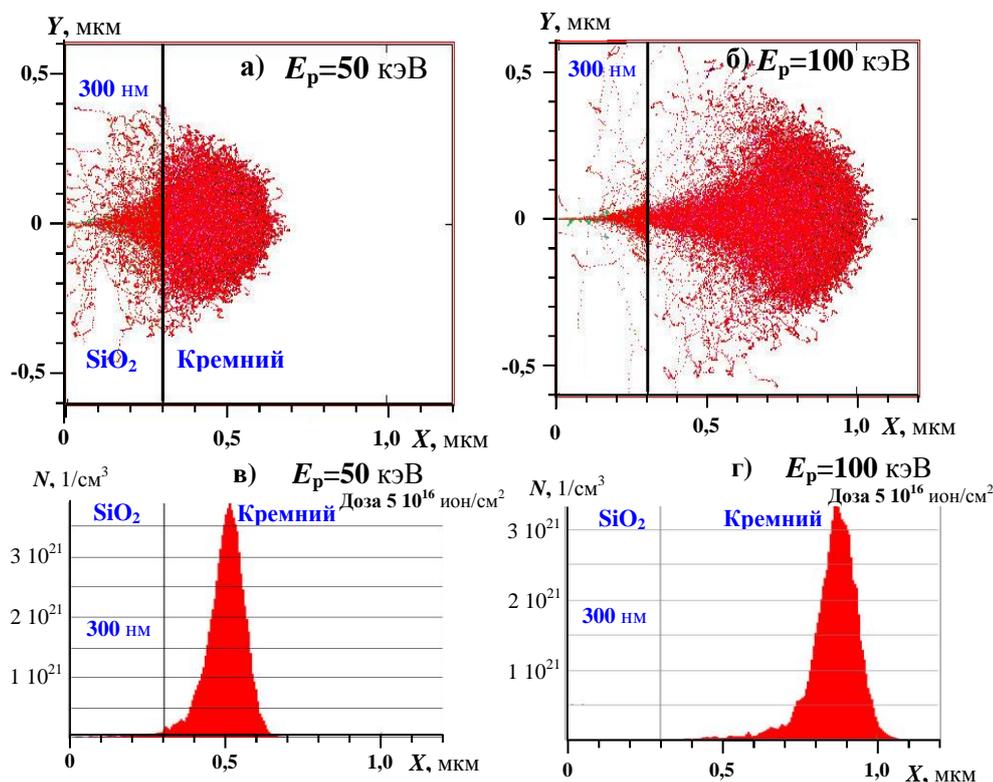
расщепление, используют имплантацию либо атомарных (H^+), либо молекулярных (H_2^+) ионов водорода. В последнем случае производительность повышается вдвое, однако, необходимо и в 2 раза увеличить энергию ионов (т. е. существенно усложнить оборудование и увеличить его стоимость), чтобы после диссоциации молекул ионы водорода имели такую же скорость. Возможно также и использование ионов других легких газов, например, гелия.

Энергию ионов выбирают такой, чтобы обеспечить их пробег (средняя максимальная глубина проникновения в плоскости падения), равным сумме заданных толщин оксида кремния и пересыщенного водородом слоя приборного кремния. Обычно эта энергия заключена в интервале 30–100 кэВ.

Было предложено несколько способов приближенной оценки глубины проникновения протонов в кремний сквозь слой оксида. Наиболее популярный из них описывается формулой $R_p = 63 \times E_p^{0.5}$, где энергия ионов E_p выражается в кэВ, а спроецированный на плоскость падения средний пробег ионов R_p в нм. Использование этой формулы, однако, является довольно грубым приближением, особенно при высоких энергиях ионов. Сейчас наиболее надежным способом определения основных параметров распределения внедренных в многослойные структуры ионов считается основанная на методе Монте–Карло общедоступная (не в коммерческих целях) программа SRIM–2013 (*the Stopping and Range of Ions in Matter* — рус. *Торможение и пробеги ионов в веществе*), разработанная в 1983 г. Джеймсом Ф. Циглером (*James F. Ziegler*) и Йохеном П. Бирзаком (*Jochen P. Biersack*), которая обновляется с тех пор не реже, чем раз в 5 лет с учетом новых теоретических и опытных данных

Методы Монте-Карло являются широким классом вычислительных алгоритмов, основанных на моделировании исследуемого процесса путем многократных (не менее 5000 раз) повторений его случайных реализаций. Метод обязан своим названием европейскому центру азартных игр, основанных на случайных событиях.

SRIM-2013: <http://www.srim.org/>



Д) Таблица параметров распределения

		50 кэВ	100 кэВ
Средний пробег R_p , нм	оценка	450	635
	Монте-Карло	493	856
Среднеквадратичный разброс, нм		678	820
Параметр асимметрии, Sk		-1,5	-2

Рис. 5.12. Результаты моделирования проникновения протонов в кремний через слой SiO_2 толщиной 300 нм методом Монте-Карло при двух различных энергиях.

Ядром SRIM является программа TRIM (*the TRansport of Ions in Matter* — рус. *Транспорт ионов в веществе*), которая в приближении парных столкновений ионов с атомами твердого тела моделирует всю траекторию каждого иона от самого начала до полной остановки, выбирая для каждого последующего столкновения случайные параметры удара. Основное достоинство метода в том, что можно задать состав мишени и любую ее структуру, в том числе и многослойную, для которой строгий аналитический расчет провести невозможно.

В качестве примера на рис. 5.12 приведены результаты моделирования с помощью этой программы проникновения протонов в кремний сквозь пленку окисла для разных значений энергии ионов. Первые два графика (Рис. 5.12 а и б) показывают пространственное распределение всех 20000 траекторий протонов в структуре и мест их остановки в проекции на плоскость падения. На следующих двух графиках (в и г)

представлены проекции распределения по глубине внедренных ионов на ту же плоскость.

При торможении в веществе ионы теряют энергию вдоль всей траектории в результате неупругого рассеяния на электронах твердого тела и упругого рассеяния на ядрах атомов кристаллической решетки. Эти потери во всех теориях считаются независимыми (и поэтому аддитивными). При электронном торможении ион взаимодействует с электронной оболочкой не только одного атома, участвующего в очередном соударении, но и нескольких соседних (благодаря далекодействующему кулоновскому потенциалу). Неупругое возбуждение электронов в соседних атомах происходит и в паузах между столкновениями. В результате ион практически непрерывно теряет энергию вдоль всей траектории сравнительно небольшими порциями и при этом не изменяет направление движения. Поэтому, как правило, электронные потери энергии рассматриваются в приближении непрерывного торможения.

Упругое рассеяние на ядрах, напротив, описывается теорией парных взаимодействий иона с каждым последующим атомом среды. Изменение направления движения и потеря энергии в каждом таком соударении определяется энергией иона и параметром этого удара (т. е. расстоянием от центра атома до вектора скорости иона). Кроме того, атом кристаллической решетки при этом выбивается из ее узла и создает на своем дальнейшем пути каскад соударений, приводящий к появлению первичных радиационных дефектов — вакансий и междоузельных атомов.

В случае легких ионов (водород, гелий) с энергией в десятки кэВ сечение неупругих взаимодействий на несколько порядков больше, чем сечение упругих. Поэтому в начальной части своей траектории ион движется практически по прямой и почти не создает дефектов. Упругое рассеяние становится существенным лишь в самом конце пробега, когда энергия ионов снижается до сотен эВ и менее. В результате, как видно из рис. 5.12 в и г, практически все внедренные ионы не задерживаются в пленке окисла и заканчивают свой путь на значительной глубине под ней в слое приборного кремния.

Результаты моделирования позволяют достаточно точно описать статистическую функцию распределения проективных пробегов ионов в кремнии и оценить моменты этого распределения (таблица на рис. 5.12 д):

1. средний проективный пробег R_p (первый момент);
2. дисперсию (второй центральный момент), определяющую средний квадратичный разброс (англ. *Straggle*) по этим пробегам $\sqrt{\langle \Delta R_p^2 \rangle}$;
3. третий центральный момент, позволяющий рассчитать безразмерный (нормированный соответствующим образом на дисперсию) параметр асимметрии распределения Sk (*Skewness*) — при отрицательном его значении распределение вытянуто по отношению к среднему значению в сторону поверхности, а при положительном в противоположном направлении.

Обычно этих трех параметров оказывается достаточно, чтобы оценить ширину и глубину залегания той области, в которой концентрация водорода превышает критическую, необходимую для последующего расслоения пластины. На основе подобных расчетов в каждом конкретном случае выбираются требуемые значения энергии ионов и дозы облучения.

На первых этапах облучения водород растворяется в кремнии без образования новой фазы путем захвата на созданные этим облучением дефекты кристаллической решетки — прежде всего, вакансии и их комплексы. Наиболее устойчивыми из возникающих в результате этого метастабильных образований являются вакансии, связанная с 4 атомами водорода (VH_4), и дивакансия, захватившая 6 атомов (V_2H_6). При высоком уровне легирования атомы примеси также могут связывать водород - бор, например, способен захватить от одного до десяти атомов.

Начиная с некоторой критической дозы облучения концентрация подобных комплексов становится больше, чем предел устойчивости твердого раствора, который в результате распадается на множество пузырьков размером от 1 до 10 нм, заполненных водородом, причем установлено, что мелкие пузырьки образовались, в основном, при распаде V_2H_6 , а более крупные - VH_4 .

Таким образом, при правильном подборе режима ионной имплантации в глубине приборной пластины под окислом возникает параллельный поверхности слой с этими пузырьками - зародышами будущих трещин, по которым и будет производиться расщепление.

Описанный процесс очень чувствителен к дозе облучения. Так, при энергии 30–60 кэВ и дозе $2 \cdot 10^{16} \text{ 1/см}^2$ концентрация дефектов недостаточна для последующего расщепления пластин, а при дозах $> 6 \cdot 10^{16} \text{ 1/см}^2$ приборный слой начинает коробиться водородными пузырьками, часть из которых при последующей термообработке выходит на поверхность и лопаются там (так называемое явление *блистеринга*). Это уменьшает площадь контакта приборной и опорной пластин при переносе и приводит в итоге к появлению множества дефектов кристаллической структуры, а иногда и к отслаиванию чешуек от приборной пленки кремния.

Для того чтобы обеспечить точный контроль дозы, к установке для имплантации предъявляются весьма жесткие требования:

1. близкое к 100% содержание в пучке атомарных ионов водорода;
2. стабильность энергии протонов не ниже $\pm 2 \%$ при среднем токе пучка до 1 мА;
3. возможность формирования равномерного (не хуже $\pm 5\%$) поля облучения на мишени диаметром до 300 мм;
4. большой срок службы, высокая надежность и стабильность работы.

Требования к очистке поверхности

Наличие на поверхности пылевидных частиц сказывается не только на качестве срачивания пластин после переноса, но и на результатах предшествующего облучения ионами, как это поясняется на рис. 5.13.

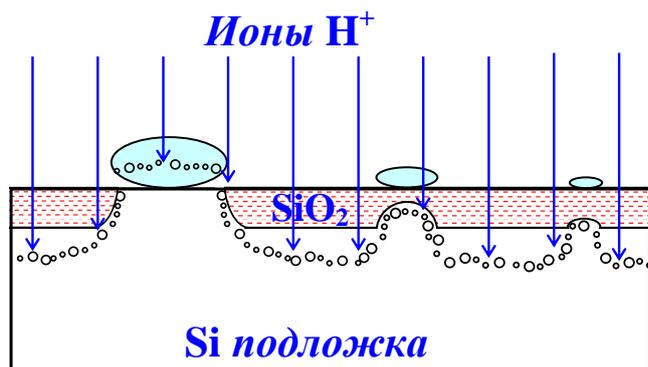


Рис. 5.13. Затенение потока ионов H^+ пылевидными частицами на поверхности.

В зависимости от размеров инородных частиц возникающая при облучении дефектная зона с пузырьками водорода может заходить в слой окисла на различную глубину. В результате после скола толщина заглубленного окисла (и его качество) могут существенно различаться на разных участках пластины. Более того, если толщина пылинки больше проективного пробега протонов, то в окисле образуются

сквозные отверстия и в этом месте могут отслоиться чешуйки приборного кремния.

Таким образом, требования к степени очистки поверхности в рассматриваемом методе более жесткие, чем в предыдущем случае. Кроме того, и в процессе имплантации происходит загрязнение этой поверхности металлическими частицами, распыленными с электродов ионной пушки. Несмотря на все принимаемые меры по фокусировке и сепарации ионного пучка, пока не удастся сделать уровень подобных загрязнений меньше, чем $\sim 10^{10}$ 1/см². Поэтому после окончания имплантации верхняя часть окисла на приборной пластине удаляется вместе с накопившимися загрязнениями.

После этого поверхности обеих пластин тщательно очищаются, активируются для создания гидрофильных групп и, как и ранее, сразу же приводятся в контакт лицевыми сторонами для первоначального твердофазного сращивания (рис. 5.12 б).

Температурный режим отжига и механизм расщепления

Имплантация водорода проводится при температуре подложки, не превышающей, как правило, 300 °С для того, чтобы уже на этой стадии не произошло преждевременное расщепление приборной пластины.

После переноса (рис.5.11 б) начинается стадия отжига созданной структуры, которая проводится в 3 этапа.

1. Первый из них - это длительная (до двух часов) выдержка при 300–350 °С, во время которой происходит модификация как той части приборного слоя, которая обогащена водородом, так и самой границы сращивания. На

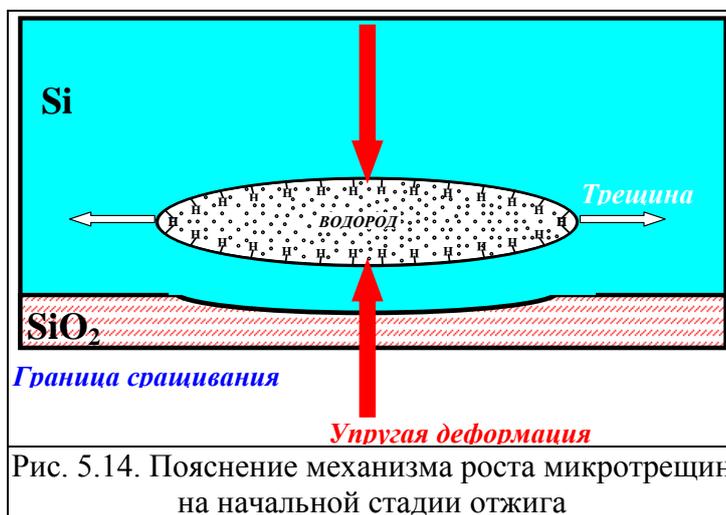


Рис. 5.14. Пояснение механизма роста микротрещин на начальной стадии отжига

этой границе, как и в предыдущем случае, в результате перестройки связей расстояние между поверхностями пластин уменьшается, а Ван-дер-Ваальсовские межмолекулярные силы резко возрастают.

Что касается слоя с водородом (*скрытый наноразмерный дефектный слой*, СНДС), то там в результате диффузии водорода в пузырьки их

размеры увеличиваются и начинается коалесценция — мелкие пузырьки поглощаются более крупными. Оборванные связи атомов кремния внутри пузырька пассивируются атомами водорода с образованием уже рассматривавшихся ранее силаноловых групп Si–H (рис. 5.14). Кроме того, эти атомы химически взаимодействуют друг с другом и образуется газообразная фаза молекулярного водорода, давление которого на стенки пузырька возрастает со временем.

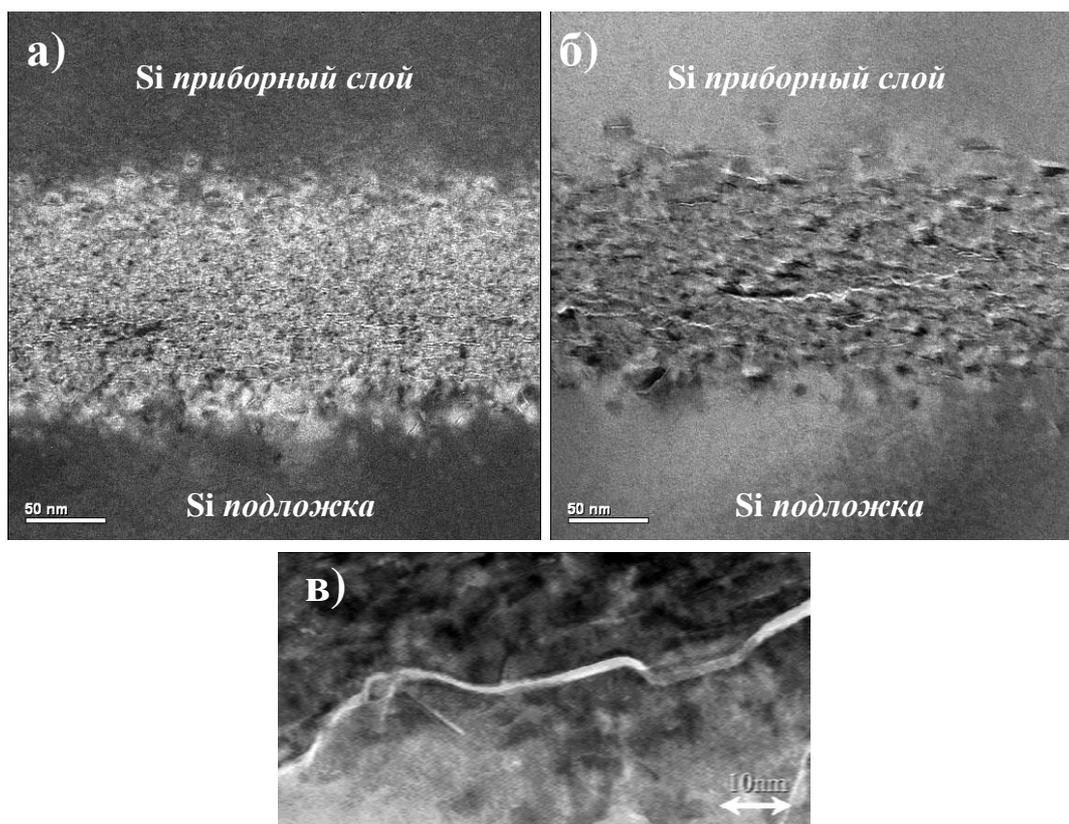


Рис. 5.15. ПЭМ изображение скрытого дефектного слоя после облучения (а) и после предварительного отжига при 350 °С (б); в) увеличенное изображение микротрещины.

Расширению пузырька в сторону поверхности препятствуют силы упругой деформации кремниевой пластины, усиленные пленкой SiO₂, играющей роль своеобразного «ребра жесткости» (рис. 5.14). В то же время по бокам полости силы связи ее противоположных сторон ослаблены из-за пассивации водородом и развитие микротрещин в этом направлении происходит с минимальными затратами энергии. В результате к концу рассматриваемого этапа отжига в параллельном поверхности скрытом

дефектном слое возникает развитая система подобных трещин, создающая основу для последующего расщепления пластины (рис. 5.15 б и в).

2. Второй этап отжига и заключается в скалывании большей части приборной пластины, после которого ее можно использовать повторно уже в качестве опорной, предварительно отполировав ее поверхность (рис. 5.12 в).

Для успешного расщепления необходимо добиться объединения локальных микротрещин до того, как начнется блистеринг, т. е. вскрытие отдельных заполненных водородом микропор и отрыв небольших чешуек с локальных участков их поверхности (рис. 5.16 б).

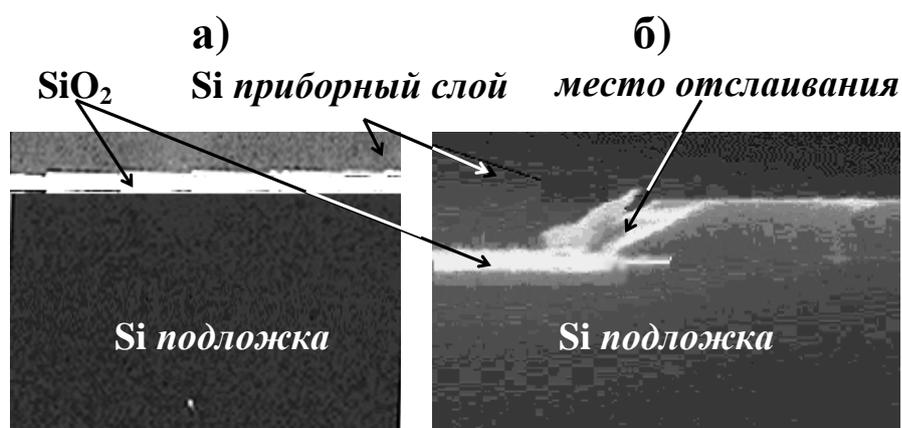


Рис. 5.16. Заглубленный слой окисла (а) и отшелушивание части его в результате блистеринга (б).

Чаще всего желаемого результата добиваются путем быстрого (~ 50 °C/мин) подъема температуры структуры до 600 °C. После этого сколотую часть приборной пластины отделяют от оставшейся части (как правило, с помощью водяной форсунки, схематически указанной на рис. 5.12 в).

3. На заключительном этапе отжига, как и в предыдущем случае, проводится окончательное сращивание пластин при температуре 1000–1100 °C, в процессе которого прежние межмолекулярные силы заменяются на более прочные ковалентные связи. Затем толщина слоя КНИ доводится до требуемой величины и проводится финишная полировка его поверхности.

Производство КНИ–подложек по технологии управляемого скола требует большего, чем обычно, количества операций, но в его процессе используется только стандартное оборудование. Кроме того, важным достоинством пластин, полученных по этой технологии, является низкая плотность дефектов в приборном слое.

Модификации метода газового расщепления

В то же время, в пленке окисла, сквозь которую проводилось облучение большой дозой водорода, остается заметная концентрация радиационных дефектов и этот окисел все-таки не является таким совершенным, как термически выращенный.

Поэтому в самом начале нынешнего века было предложено так модифицировать рассматриваемую технологию, чтобы устранить указанный основной недостаток прототипа. Отрадно, что это сделали отечественные ученые из хорошо известного в научном мире института, который до начавшегося в 2013 году разгрома Российской Академии наук назывался «Институт физики полупроводников» Сибирского Отделения РАН (Новосибирский Академгородок).

Авторы назвали предлагаемый способ изготовления КНИ-пластин по-английски: *DeleCut (ion irradiated Deleted oxide Cut)* - русс. *Скол с удалением облученного ионами окисла*.

Главная особенность предложенной технологии состоит в том, что после облучения приборной пластины протонами сквозь слой окисла и создания пересыщенного водородом слоя, т. е. этапа, ничем, в принципе, не отличающегося от *Smart Cut* (рис. 5.11 а слева), пленка окисла с радиационными повреждениями полностью удаляется с поверхности. Затем, опорная пластина окисляется до требуемой толщины и только после этого производится перенос и твердофазное сращивание обеих пластин. Дальнейший технологический маршрут повторяет то, что было и раньше: высокотемпературный отжиг, скол, разделение подложек, полировка и очистка их поверхностей и повторное использование бывшей приборной пластины.

Основным достоинством этого метода является структурное и электрофизическое совершенство границы сращивания, находящейся

между слоем перенесенного кремния и заглубленным термическим оксидом Si/SiO₂, а также высокое качество самого окисла. Авторы продемонстрировали возможность создания бездислокационных КНИ-структур на пластинах диаметром до 150 мм с толщинами слоев монокристаллического кремния от 10 нм до 1,8 мкм и окисла от 50 нм до 1,9 мкм. После этого на производственной базе института было организовано изготовление подобных подложек, пригодных для создания КМОП СБИС, СВЧ БИС, оптоэлектронных приборов и различных сенсоров (давления, температуры, излучения).

Еще одно направление усовершенствования рассматриваемой технологии заключается в поиске способов понижения температуры сращивания до 200–250 °С, а, желательно, более низкой. Это дало бы возможность изготавливать многослойные пластины, одна из которых предварительно полностью обработана и уже содержит все необходимые элементы СБИС, и открыло путь к трехмерной (3D) интеграции, позволяющей существенно увеличить плотность упаковки транзисторов в кристалле, а также снизить потребляемую мощность в результате уменьшения длины соединений между слоями.

Основная проблема заключается в необходимости добиться того, чтобы энергия связи между пластинами была больше той энергии, которая требуется для расщепления. Только в этом случае скол произойдет вдоль скрытого дефектного слоя, а не по границе сращивания. Таким образом, при низкотемпературном отжиге нужно либо уменьшать силу связи между атомами в дефектном слое, либо увеличивать энергию межмолекулярной связи между пластинами. На первом пути были достигнуты значительные успехи. Показано, в частности, что совместная имплантация водорода и бора, а также водорода и гелия в оптимальном соотношении позволяет почти на порядок уменьшить время образования скрытого наноразмерного дефектного слоя при постоянной температуре и, соответственно, существенно понизить температуру отжига при той же его длительности. При этом оказалось, что и поверхности пластин после расщепления были более гладкими, чем в случае имплантации одного водорода. Подобные исследования постоянно продолжаются.

В то же время разработчики фирмы Soitec, авторы технологии Smart Cut, изучают и возможность усиления связи между пластинами,

срачиваемыми при низких температурах. Они запатентовали под торговой маркой Smart Stacking™ (*управляемая укладка в пакет*) низкотемпературную технологию переноса и скола, которая сначала была использована для улучшения характеристик радиочастотных цепей в смартфонах, а также для повышения чувствительности и уменьшения размеров пиксел в датчиках изображения освещаемых с тыльной стороны. В 2012 году фирма продемонстрировала перенос высококачественного слоя кремния толщиной 100 нм, выполненный при комнатной температуре. Детали технологии не раскрываются. Известно только, что связь пластин обеспечивают межмолекулярные силы между двумя окисленными поверхностями, а скол проводится прецизионно, практически вдоль атомных плоскостей.

В настоящее время технология Smart Cut, наряду с SIMOX является одним из магистральных направлений производства структур КНИ.

5.2.5. Окисление пористого кремния (ELTRAN)

Обе упомянутых технологии, однако, используют весьма дорогостоящее оборудование для имплантации больших доз ионов с высокой энергией. Для устранения этого недостатка фирма Canon Inc. предложила в 1990 году способ создания скрытого наноразмерного дефектного слоя, по которому можно провести скол приборной пластины, без использования ионной имплантации. Этот способ был запатентован под торговой маркой ELTRAN (*Epitaxial Layer TRANSfer*), рус. *Перенос эпитаксиального слоя*.

Технология основана на уникальных свойствах *пористого кремния*, который был впервые получен еще в 1956 году в ходе исследований процесса электрохимической полировки поверхности кремния в водных растворах HF, но долгое время не находил практического применения.

Традиционным способом получения пористого кремния, который использовался и в рассматриваемой технологии Canon, является электрохимическое травление монокристаллических пластин кремния в этаноловом растворе плавиковой кислоты HF. При положительном потенциале на кремниевом электроде (аноде) и надлежащем выборе режима травления у поверхности формируется пленка пористого кремния с размерами пор в несколько нм и их поверхностной плотностью до

10^{11} 1/см². Структура и размеры пор определяются плотностью тока, концентрацией HF в электролите и типом легирования кремниевой подложки. Травление дна пор происходит с наибольшей скоростью, поскольку именно там сконцентрировано максимальное электрическое поле в электролите.

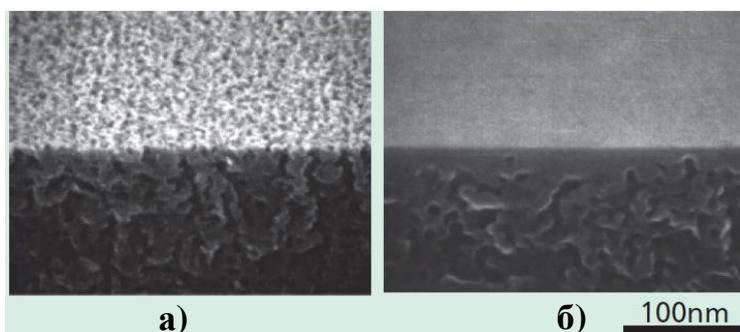


Рис. 5. 17 Срез пористого кремния а) до и б) после предварительного отжига в водороде.

Поэтому при травлении поры растут вглубь от поверхности, причем их длина может меняться от долей до сотен микрометров. Повышая плотность тока во время травления, можно получить второй пористый слой,

размеры пор в котором в несколько раз больше, чем в первом.

После этого при 400 °С проводится сухое окисление внутренних стенок всех пор на глубину 1–3 нм, чтобы исключить их деформацию во время последующего высокотемпературного отжига при 1000–1100 °С в атмосфере водородосодержащего газа, который проводится непосредственно в камере CVD. Этот этап является еще одной важной новинкой и, по словам авторов, позволяет обеспечить планаризацию поверхности подложки не хуже, чем при стандартной химико-механической полировке CMP и при этом не требует механического удаления части материала поверхностной пленки.

Как видно из РЭМ микрофотографий на рис. 5.17, полученных под наклонным углом, во время предварительного отжига основная часть пористой поверхности зарастает в результате миграции кремния и доля оставшихся пор не превышает 10^4 1/см², т. е. уменьшается на семь порядков.

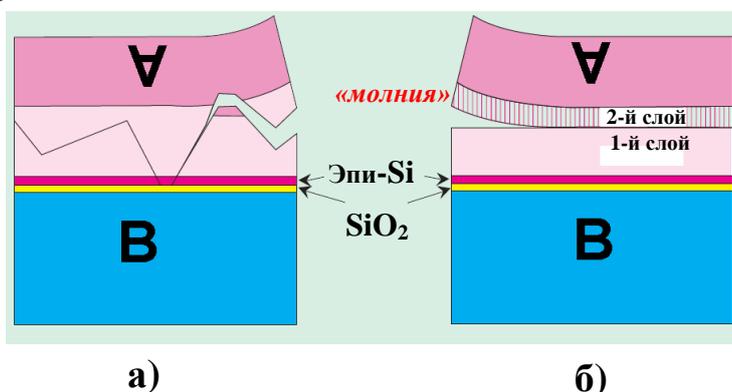


Рис. 5. 18 Схема расщепления приборной пластины по однородному (а) и двойному (б) пористому слою.

Затем на полученной гладкой поверхности с помощью CVD при 900–1000 °С эпитаксиально выращивается практически бездефектная пленка кремния требуемой толщины и ее наружная часть термически окисляется для создания будущего скрытого окисла. После этого, как и раньше, обе пластины приводятся в контакт лицевыми сторонами и проводится их твердофазное сращивание по стандартной технологии.

Расщепление пластин происходит по ослабленному механически пористому слою, как правило, с помощью уже упоминавшихся водяных форсунок. Однако, как показал опыт, в случае единственного пористого слоя с однородной пористостью (рис. 5.18 а) направление скола почти не контролируется и трещины могут достигнуть как подложки, так и приборного слоя кремния. В то же время, согласно данным рамановской спектроскопии, в двойной пористой структуре на границе слоев с разными размерами пор возникают сильные механические напряжения, благодаря которым расщепление происходит почти точно вдоль границы интерфейса (рис. 5.18 б), причем после разделения пластин эти напряжения релаксируют и не ухудшают качество приборного слоя.

На заключительной стадии оставшийся на пленке кремния пористый слой стравливается в растворе, содержащем HF, H₂O₂ и H₂O. Благодаря очень развитой поверхности пор и тому, что тонкие стенки пор травятся со всех сторон, обеспечивается очень высокая селективность травления со скоростью в 100000 раз большей, чем для эпитаксиальной пленки. В результате после полного удаления пористого слоя эта пленка остается практически не поврежденной.

Авторы продемонстрировали возможность получения однородных по толщине эпитаксиальных слоев высокого качества на подложках диаметром 300 мм. По их мнению, предложенная технология создания КНИ-структур является единственной из известных, позволяющей получать супертонкие (до 1 нм и менее) пленки кремния на изоляторе.

Еще один возможный путь использования пористого кремния для создания КНИ-подложек был предложен (и запатентован в РФ в 1997 году) в Новосибирском Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН. Суть его состоит в том, что скрытый диэлектрический слой, который изолирует рабочую кремниевую пленку от подложки, создается не ионной имплантацией кислорода и не сращиванием

окисленных пластин, как в рассмотренных выше технологиях, а путем проведения электрохимического окисления подложки через верхний слой пористого кремния, который формируется предварительно другой электрохимической операцией травления кремния. На заключительном этапе проводится эпитаксиальное наращивание пор в кремнии и стравливание приборного слоя до нужной толщины. Исключение из технологического цикла самых дорогостоящих и сложных операций (ионное легирование, твердотельное сращивание) должно, по оценкам авторов, в несколько раз снизить стоимость КНИ-подложек. К сожалению, с тех пор так и не появилось публикаций, позволяющих узнать, удалось ли авторам этой многообещающей технологии, прошедшей лабораторную проверку, получить финансирование, чтобы довести дело хотя бы до стадии опытно-конструкторской разработки. Конец прошлого и начало нынешнего века были не самым лучшим временем для развития отечественной индустрии Hi-Tec.

5.2.6. Кремний на пустоте (SON, *Silicon On Nothing*)

В 1999 году исследователи французской компании *France Telecom* предложили принципиально новый способ получения изолированных от подложки эпитаксиальных слоев кремния, не требующий ни ионной имплантации, ни переноса и твердотельного сращивания пластин, который они назвали «Кремний на пустоте» (*англ. Silicon on nothing, SON*).

В предлагаемой технологии и приборный слой кремния толщиной от 5 до 20 нм, и тонкий (10–30 нм) скрытый слой заполненного воздухом диэлектрика создаются с помощью стандартных для КМОП-процесса методик эпитаксиального наращивания и селективного травления. При этом диэлектрик формируется не на всей поверхности подложки, а только непосредственно под каналом и расположенными выше затвором и спейсерами.

Схема технологического маршрута изготовления МОП-транзистора с помощью SON-процесса приведена на рис. 5.19.

France Telecom (с августа 2013 г. **Orange**) — крупнейшая в Европе и вторая в мире транснациональная телекоммуникационная компания со штаб-квартирой в Париже, основана в 1988 году. Веб-сайт:

www.francetelecom.com.

[Jurczak M. et al. «SON \(silicon on nothing\)-a new device architecture for the ULSI era.» Symposium on VLSI Technology, 1999. Digest of Technical Papers](#) Kyoto, Japan, 1999, pp. 29-30.

Роль первого эпитаксиального слоя SiGe состоит в том, чтобы продолжить кристаллическую структуру подложки в сторону пленки приборного кремния, выращиваемой на втором этапе, и обеспечить ее монокристалличность (рис. 5.19 а). Эпитаксиальная технология позволяет контролировать толщину и качество обеих пленок с очень высокой точностью, не достижимой в остальных технологиях изготовления КНИ-структур.

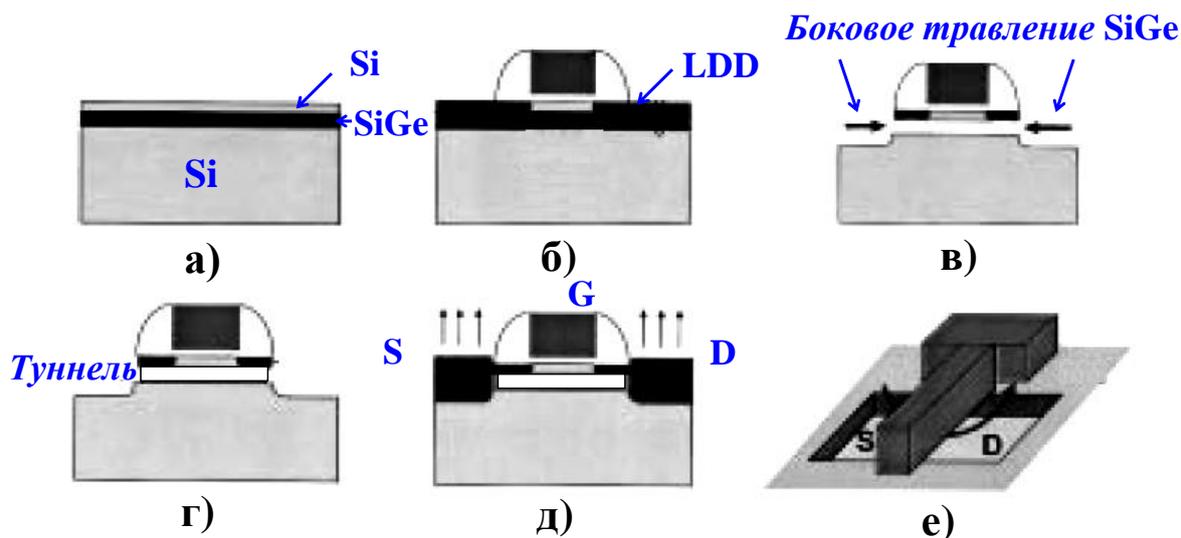


Рис. 5. 19. Технология производства SON МОП-транзистора.

- а) Эпитаксия Si и SiGe слоев на кремниевой подложке.
- б) Обычный КМОП-процесс, включая формирование затвора и нитридного спэйсера.
- в) Создание канавок в области стока и истока и формирование туннеля под пленкой Si.
- г) Частичное окисление стенок туннеля.
- д) Эпитаксильное наращивание областей истока и стока и имплантация.
- е) Стабильная структура с полым туннелем, удерживаемым стандартной конструкцией.

После эпитаксии проводится стандартный КМОП-процесс, во время которого формируется подзатворный окисел и затвор, а также канал в приборном слое непосредственно под затвором. Остальная часть приборного кремния дополнительно легируется для создания LDD-областей. Завершается этот этап нанесением нитридных спейсеров (рис. 5.19 б).

Затем с помощью анизотропного плазменного травления создаются канавки в областях истока и стока, чтобы получить доступ к слою SiGe, расположенному под приборной пленкой кремния, и вытравить его, используя другой плазменный процесс (рис. 5.19 в).

При этом непосредственно под каналом, прикрепленном через окисел к затвору, формируется полый заполненный воздухом туннель, изолирующий канал от подложки, толщина которого определяется начальной толщиной пленки SiGe. Скорость травления тем больше, чем выше содержание германия в соединении и при 20–30 молярных процентах обеспечивается селективность 100:1 и выше по отношению к пленке Si. Таким способом за 1 минуту удается создать туннель длиной более 100 нм, практически не затронув приборного слоя.

РЭМ фото на рис. 5.20 подтверждает, что после создания туннеля затвор не проваливается в него, т. к. расположен на «мостике» из приборной пленки, а с боков удерживается кромками (рис. 5.19 е). На завершающем этапе создания конструкции MOSFET эпитаксиально наращиваются области истока и стока и проводится их легирование до требуемого

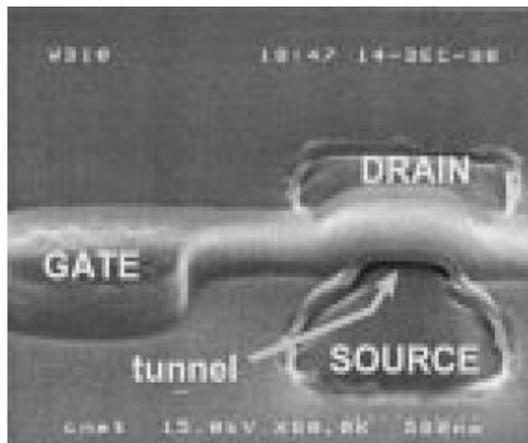


Рис. 5. 20. РЭМ фото SON-транзистора после формирования туннеля

уровня (рис. 5.19 д). Перед этим однако стенки туннеля пассивируются тонкой пленкой окисла для того, чтобы предотвратить его повторное заполнение кремнием во время эпитаксии (рис. 5.19 г).

Авторы повели моделирование основных характеристик SON-транзистора и показали, что благодаря очень малым толщинам и канала, и заглубленного воздушного изолятора, он превосходит обычные КНИ-структуры и по производительности, и по потребляемой мощности, и по возможности работы при низких VDD, а также вплоть до длин затвора 20 нм не подвержен воздействию эффекта короткого канала. Кроме того, диэлектрическая проницаемость захороненного изолятора (воздуха) в этом случае равна 1, т. е. минимально возможному значению, что делает подобную структуру практически идеальной для КНИ.

Поэтому не удивительно, что предложенной идеей создания изолирующих воздушных полостей под приборной пленкой кремния заинтересовались и другие производители, прежде всего из японской компании *Toshiba*. Однако, по их мнению, рассмотренный способ получения таких изоляторов имеет два основных недостатка, затрудняющих его применение в VLSI-технологии. Прежде всего, это

связано с тем, что воздушные полости должны быть вытравлены под каналом каждого МОП-транзистора ИС после полного формирования приборной части. Хотя все технологические операции и являются стандартными для КМОП-технологии, их общее количество оказывается весьма высоким, что делает технологический маршрут более длинным и дорогим. Во-вторых, такая технология в принципе не позволяет сформировать скрытый слой не под одним, а под рядом транзисторов (и тем более подо всей поверхностью пластины) в тех случаях, когда это необходимо.

В качестве альтернативы было предложено использовать более простую технологию создания в кремнии скрытых воздушных полостей, в том числе и достаточно большой площади (по терминологии авторов, *ESS, Empty Space in Silicon — пустое пространство в кремнии*), основанную на разработанной ранее в компании технике микроструктурной трансформации кремния (*англ. MSTS, microstructure transformation of silicon*).

На первом этапе с помощью стандартной литографии в кремнии вытравливаются достаточно глубокие цилиндрические или в форме параллелограмма лунки. После этого проводится термический отжиг в восстановительной атмосфере (например, в водороде), который приводит к самоорганизованной миграции кремния, направленной на сведение к минимуму поверхностной энергии. Сначала лунки преобразуются в цилиндрические, а затем, поскольку дно каждой из них имеет наименьший радиус кривизны, именно там начинается перестройка цилиндрической полости в сфероидальную.

Если расстояние между лунками достаточно велико, то каждая из них трансформируется в сферическую пустую полость, положение и размеры которой определяются глубиной и диаметром исходных лунок (рис. 5.21 а). Когда исходные лунки расположены в ряд и близко друг к другу, то в результате формируется параллельная поверхности полая трубка (рис. 5.21 б). Наконец, когда эти лунки созданы в виде двумерной решетки, исходные сферические полости объединяются и образуют плоскую ESS (рис. 5.21 в).

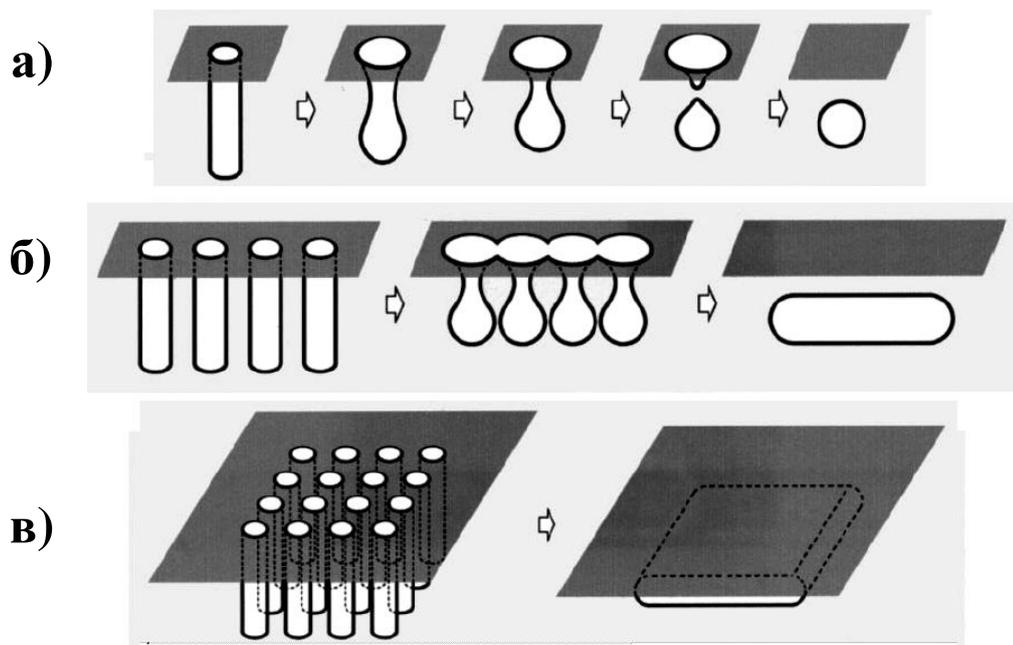


Рис. 5. 21. Схематическая иллюстрация самоорганизующейся последовательности формирования *ESS* в трех типичных конфигурациях:
а) сферы, б) трубка, в) пластинка.

На рис. 5.22 приведен пример РЭМ-изображения сформированной таким способом плоской полости размером 150×1500 мкм и толщиной 700 нм со слоем приборного кремния над ним такой же толщины. Исходная литографическая структура представляла собой решетку из $1,1 \cdot 10^{15}$ $1/\text{см}^2$ лунок размером 290×430 нм и глубиной 2,4 мкм. Подтвержденные экспериментально теоретические оценки на основании модели микрокристаллической трансформации кремния, определяемой поверхностной диффузией, показали, что для объединения соседних сферических областей в одну сплошную полость необходимо, чтобы расстояние между ними не превышало их удвоенного радиуса. Были проведены и оценки других технологических параметров, позволяющих достаточно точно контролировать все характеристики формируемого воздушного изолирующего слоя.

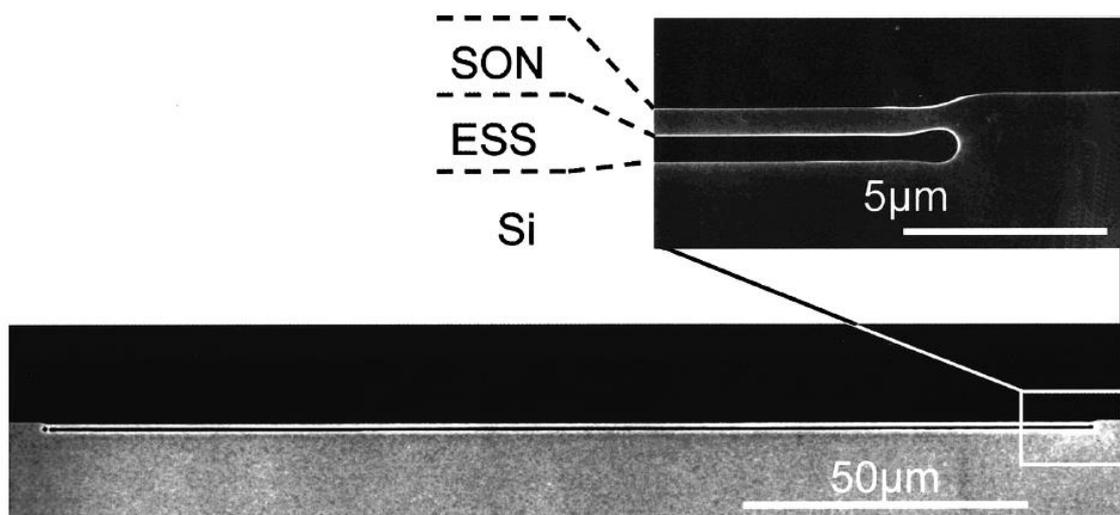


Рис. 5.22. РЭМ-изображение плоского пустого пространства макроскопического размера.

Технология SON с тех пор постоянно совершенствовалась и успешно применялась в массовом производстве не только Toshiba, но и другими производителями, правда, пока не для цифровых логических схем, а для быстродействующих RF МОП ИС и радиационно-стойкой аппаратуры.

2.7. Заключение

КНИ–технология признана рядом ведущих мировых фирм (IBM, AMD, Motorola и другими, в том числе в последнее время и Intel) генеральным направлением развития кремниевой микроэлектроники, обеспечивающим наибольшие преимущества при создании сверхбыстрых транзисторов (например, 3,3 ТГц в варианте IBM) и ультрабольших интегральных схем (УБИС).

Напомним главные ее преимущества.

1. КНИ в настоящее время является наиболее эффективной и наиболее дешевой технологией, которая позволяет продолжать повышение производительности современных логических цифровых ИС, включая и уже внедренные в производство многозатворные МОП-транзисторы (FinFET MOS).

2. Эта технология также весьма естественна для очень популярного сейчас направления на трехмерную (3D) интеграцию, позволяющего продолжить увеличение плотности упаковки активных элементов в соответствии с законом Мура путем создания изолированных друг от друга многослойных структур.

3. Наконец, технология КНИ — это наиболее эффективный путь для использования в наружном слое альтернативных материалов (например, A_3B_5), инновационных элементов (нанотрубки, квантовые ямы, нанопроволоки, оптоэлектроника и др.).

Вместе с тем, результаты исследований по данной тематике практически закрыты, поскольку одновременно затрагиваются аспекты двойного применения, такие как обеспечение радиационной и термической стойкости. Ограничен экспорт как КНИ–ИС, так и КНИ–пластин. По коммерческим каналам в Россию часто поставляются КНИ–структуры, намеренно непригодные для создания радиационно – стойких СБИС, скрываются существенные результаты, важные для разработки библиотечных элементов для КНИ–ИС.

В подобных условиях особенно важно наладить отечественную технологию производства КНИ-подложек. Все предпосылки для этого есть, а будет ли выделено на это финансирование и куда оно пойдет — покажет время.