

Свойства структур и приборов на кремний-на-изоляторе

© В.П. Попов[†], А.И. Антонова, А.А. Французов, Л.Н. Сафронов,
Г.Н. Феофанов, О.В. Наумова, Д.В. Киланов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 февраля 2001 г. Принята к печати 15 февраля 2001 г.)

Рассмотрены физические основы способа создания структур кремний-на-изоляторе (КНИ) методом, названным "DeleCut" (ion irradiated Deleted oxide Cut). Способ является модификацией известного метода Smart Cut[®] и предназначен для устранения недостатков базового метода [1]. Предложенный способ позволяет существенно снизить температуру отжига и концентрацию радиационных дефектов в структурах КНИ, уменьшить толщину отсеченного слоя кремния и переходного слоя между слоем КНИ и скрытым окислом. Одновременно достигается увеличение однородности толщины слоев КНИ и диэлектрика до нескольких нанометров. Методом DeleCut созданы структуры КНИ с бездислокационными слоями КНИ толщиной 0.003–1.7 мкм с захороненным термическим окислом SiO₂ (0.05–0.5 мкм) на пластинах диаметром до 150 мм. Структуры КНИ обладают высокими электрофизическими характеристиками, подтвержденными изготовлением на них субмикронных (0.2–0.5) транзисторов КМОП и тестовых интегральных схем.

1. Введение

Известно, что переход от кремниевых пластин, в том числе с эпитаксиальным слоем, на структуры КНИ при производстве большого класса полупроводниковых приборов и микросхем дает заметные преимущества по сравнению с объемным материалом, в частности, снижение потребляемой мощности и увеличение быстродействия. С начала семидесятых годов развитие микроэлектронной техники строго следует закону Мура — производительность микропроцессоров удваивается каждые 18 месяцев. Минимальный размер элементов быстро приближается к 50 нм, а переключаемый заряд снижается до 1000 или менее электронов. Несмотря на успехи отдельных фирм (Intel, NEC, Lecent Technology) в уменьшении размеров элементов (менее 50 нм) [2], физические пределы (квантовые эффекты и неопределенность поведения малых токов) и технологические пределы (ограниченная рассеиваемая мощность, сложность топологии и туннельные токи) могут существенно затормозить процесс микроэлектроники на основе масштабированного уменьшения размеров элементов в рамках стандартной технологии на объемном кремнии КМОП. Технологические проблемы вместе с непомерно растущими затратами на развитие обычной технологии КМОП резко понижают барьеры по внедрению альтернативных приборных концепций на базе новых материалов.

Использование КНИ уменьшает длину канала МОП транзистора до 15 нм [2], а дизайн двойного затвора позволяет достичь длины канала 5–6 нм [2]. В настоящее время в мире используются два основных метода создания пластин КНИ (зарубежное название Silicon On Isolation — SOI): имплантационный метод — внедрение в глубину кристалла ионов кислорода (Silicon Implanted by Oxygen — SIMOX) с последующим синтезом скрытого окисла при отжиге и метод водородного переноса кремния с окислом (Smart Cut[®] SOI), состоящий в

прямом сращивании облученной водородом донорной окисленной пластины кремния с опорной подложкой с последующим почти полным удалением донорной пластины путем ее скола имплантированным водородом. Пластины КНИ, изготовленные с помощью этих двух методов, нашли коммерческое применение несмотря на то, что их стоимость в 5–8 раз выше стоимости пластин кремния того же диаметра. Дело в том, что только этими двумя методами удастся обеспечивать требования глубоко субмикронной технологии при толщине отсеченного слоя КНИ менее 50 нм.

Наиболее близким к рассматриваемому в работе способу создания КНИ является метод Smart Cut[®], предложенный М. Брюэлем [3]. Заключительными операциями в методе Брюэля после переноса слоя кремния с окислом на опорную подложку являются термообработка при 1100–1200°С, улучшающая параметры структуры КНИ за счет отжига радиационных дефектов в кремнии, захороненном SiO₂, удаление остаточного водорода и укрепление связей на границе сращивания. Последняя операция состоит из прецизионной полировки структуры КНИ, удаляющей 0.1–0.2 мкм верхнего шероховатого и все еще дефектного слоя кремния.

Недостатком метода [3] являются трудоемкость и увеличенная неоднородность толщины отсеченного слоя кремния из-за последней операции и повышенная по сравнению с кремнием температурная стабильность дефектов в облученном ионами диэлектрике.

Использование структур КНИ толщиной 30–50 нм для УБИС и одноэлектронных приборов выдвигает очень высокие требования к совершенству границы ⟨отсеченный слой Si⟩–⟨скрытый SiO₂⟩ как с точки зрения структурных, так и с точки зрения электрофизических свойств. Известно, что переходный слой на границе Si–⟨термический SiO₂⟩ может достигать нескольких нанометров [4]. Улучшение свойств границы Si/SiO₂ и уменьшение толщины переходного слоя также представляются исключительно важными для структур КНИ.

[†] E-mail: popov@isp.nsc.ru

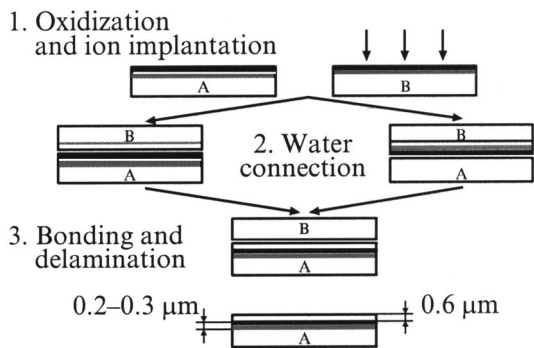


Рис. 1. Два варианта создания структур кремний-на-изоляторе: слева — методом DeleCut, справа — методом Smart Cut®.

Цель наших исследований — разработка метода изготовления пластин КНИ со свойствами отсеченного слоя кремния и скрытого диэлектрика, не уступающими свойствам эпитаксиального или объемного материала и термического окисла, а также разработка технологии и изготовление субмикронных (0.5–0.2 мкм) КНИ КМОП транзисторов для изучения особенностей технологических процессов и электрофизических параметров структур КНИ.

Искомые результаты достигались тем, что в способе изготовления структур кремний-на-изоляторе донорную пластину, как и в методе Smart Cut®, подвергали окислению до облучения [3]. Защитный слой окисла препятствовал выходу внедренного водорода, отжигу имплантационных дефектов, развитию микротрещин в объеме и имплантационного рельефа на поверхности в процессе облучения, но в отличие от метода [3] перед соединением пластин слой стравливался [1] (рис. 1). Скрытый диэлектрик формировался термическим окислением на опорной пластине и не подвергался облучению в отличие от метода Smart Cut®.

2. Механизмы срачивания, отслоения и переноса

Процесс срачивания пластин кремния состоит в основном из двух этапов: 1) соединение пластин планарными сторонами внутрь при комнатной температуре за счет Ван-дер-Ваальсовых сил и дипольного взаимодействия адсорбированных на поверхности радикалов; 2) нагрев этой соединенной пары при повышенной температуре (800–1200°C) для замены слабых межмолекулярных связей прочными ковалентными. Наиболее важной проблемой в срачивании является отсутствие областей контакта в локальных местах (макро- и микропустоты из-за микрочастиц и неровностей поверхности), которые уменьшают силу связывания между пластинами кремния и выход годных структур [4]. Второе требование, предъявляемое к процессу срачивания — чистота поверхности пластин.

Существует много способов химической очистки пластин Si, но наиболее распространенной является RCA-очистка [4], т.е. обработка в перекисно-аммиачном растворе, снятие естественного окисла в разбавленной плавиковой кислоте и обработка в перекисно-кислотном растворе. RCA-обработка применялась и в данной работе. После каждой операции выполнялась тщательная промывка в деионизованной воде марки А. Срачивание проводилось между гидрофильными поверхностями, полученными обработкой в перекисно-аммиачных растворах разного соотношения, которые имели контактный угол смачивания для кремния и для SiO₂ от 0 до 10°. После гидрофилизации проводилась сушка в центрифуге и соединение пластин в пары в установке срачивания. Качество срачивания контролировалось по изображению на просвет в ближнем ИК диапазоне с помощью ПЗС камеры.

Основной технологии водородного переноса [1,3] является эффект формирования на глубине проективного пробега ионов водорода R_p микротрещин размерами до 100 нм, в которых при последующей термообработке идет накопление газообразного водорода, приводящее к повышенному давлению в микротрещине, ее росту и к отделению пленки кремния от остального кристалла. В нарушенном ионами слое кремния после отжига при 400–600°C образуются уже крупные микротрещины ~ 1 мкм. Характерной особенностью водорода является его активное взаимодействие с примесями и дефектами. В результате водород захватывается на растянутые и ослабленные связи Si–Si на краях микротрещин. Размеры трещин увеличиваются по мере накопления водорода, происходит полный разрыв связей и формирование куполов (блистеров) на поверхности размерами 10–50 мкм.

Появление куполов наблюдается при отжиге имплантированного кристалла, начиная с некоторой дозы водорода. Подобный рельеф на поверхности может также образоваться при имплантации, если доза будет превышать другое критическое значение. Таким образом, существует некоторый интервал доз, внутри которого не происходит нарушение поверхности в процессе облучения и в то же время концентрация водорода уже достаточна для отслоения кремния при отжиге. Этот интервал доз зависит от температуры облучения, используемой энергии и интенсивности потока ионов, наличия дополнительных покрытий на поверхности кремния (например, пленки SiO₂) и исходного материала.

Если поверхность облученного кристалла покрыть механически прочной пленкой или соединить с другой пластиной, то формирование высоких куполов будет подавлено, а трещины будут развиваться преимущественно параллельно поверхности, приводя к полному отделению пленки от остального кристалла [3].

Рассмотрим кинетику формирования блистеров и отслаивания пленок при последующем отжиге согласно данным ИК спектроскопии. Исследовалось ИК поглощение Si–H-связями в кремнии, облученном ионами водорода H₂⁺. Пластины кремния *p*-типа (концентрация

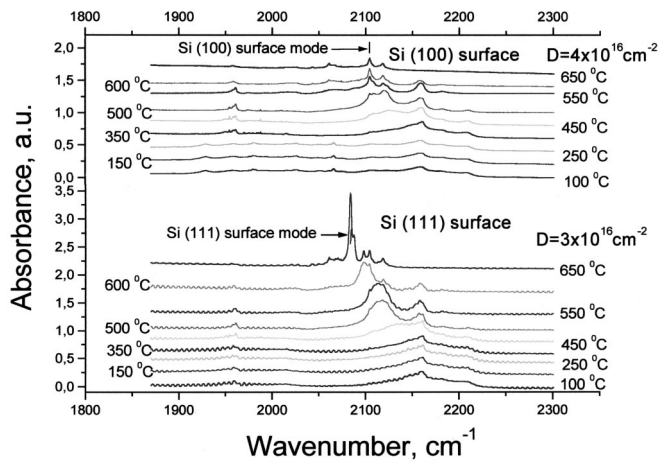


Рис. 2. Трансформация при отжиге спектров поглощения кремния, имплантированного разными дозами водорода D : внизу — $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, вверху — $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

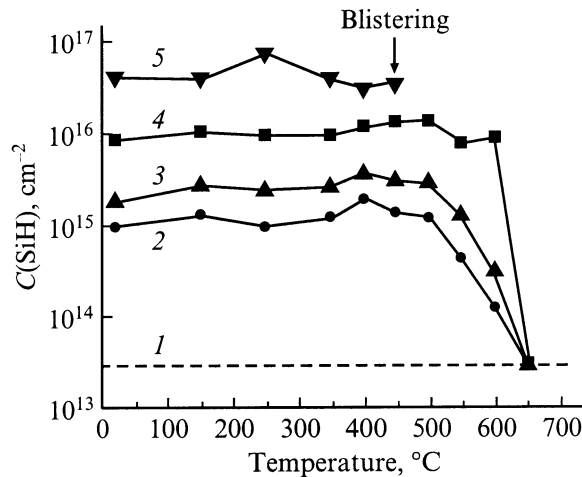


Рис. 3. Изменение концентрации Si–H-связей при отжиге имплантированного водородом кремния (см^{-2}): 1 — минимальное значение, 2 — $3 \cdot 10^{15}$, 3 — 10^{16} , 4 — $3 \cdot 10^{16}$, 5 — $8 \cdot 10^{16}$.

бора 10^{14} см^{-3}) толщиной 400 мкм с ориентацией (100) облучались ионами водорода с энергией 112 кэВ (проективный пробег $R_p = 0.6 \text{ мкм}$) до доз, лежащих в интервале $(0.3\text{--}8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Для повышения чувствительности ИК поглощение измерялось в геометрии полного внутреннего отражения. Для этого из пластин изготавливались призмы размером $40 \times 20 \text{ мм}$, короткие грани которых полировались под углом 45° к большой плоскости. Призмы помещались в вакуумную камеру спектрометра IFS 66-V/S. Пучок света вводился в короткие грани призм при помощи зеркал. Многократные отражения внутри пластины позволяли световому пучку пройти через насыщенный водородом слой кремния около 100 раз. Спектры поглощения (рис. 2) регистрировались при комнатной

температуре с разрешением 1 см^{-1} . Спектры поглощения облученного кремния содержат большее число линий в области $1800\text{--}2300 \text{ см}^{-1}$. Эти линии обусловлены поглощением упругими модами Si–H-связей атомов водорода, который насыщает оборванные связи различных вакансионных и межузельных комплексов [5]. Трансформация спектра ИК в области поглощения Si–H-связями при прогревах показана на рис. 2. При отжиге кремния, облученного большими дозами ионов водорода, появляется широкая полоса поглощения водородом, содержащимся в пластинчатых дефектах с максимумом вблизи 2110 см^{-1} . Используя известное соотношение $C(\text{SiH}) = 1.1 \cdot 10^{20} [\text{см}^{-1}] \times \int \alpha(\omega) / \omega d\omega$ [6], где ω — волновое число, определялась концентрация Si–H-связей C и, следовательно, концентрация химически связанного водорода. Интегральная плотность Si–H-связей после облучения в зависимости от температуры изохронного 30 минутного отжига приведена на рис. 3.

Результаты ИК измерений показали, что доля химически связанного водорода непосредственно после облучения водородом составляет приблизительно 20–50% от дозы водорода. Доля связанного водорода имеет тенденцию увеличиваться с дозой, причем весь этот водород существует в виде различных комплексов с дефектами. Формирование водородосодержащих пластинчатых дефектов происходит при дозах облучения выше 10^{16} см^{-2} . Прогрев при температурах $200\text{--}450^\circ\text{C}$ увеличивает интенсивность полосы поглощения, связанной с пластинчатыми выделениями водорода (рис. 2), и соответственно растет доля химически связанного водорода. При дозах около 10^{17} см^{-2} после отжига 300°C практически весь внедренный водород химически связан с кремнием.

При выбранных условиях облучения и отжига блистеринг наблюдался только на пластинах кремния, облученных дозами более $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. В интервале доз $(2\text{--}4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при высокотемпературных прогревах ($450\text{--}550^\circ\text{C}$) в спектрах ИК поглощения появлялись линии моногидридов, покрывающих поверхность трещин внутри пластины кремния. Сравнение положения линий спектра моногидридов для пластин с ориентацией (111) и (100) позволяет утверждать, что при данных дозах облучения трещины ориентируются в основном параллельно поверхности.

При дозах менее $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ большинство водородосодержащих дефектов отжигаются до температур 250°C . Исключения, по-видимому, представляют VH_3 (2159 см^{-1}), VH_4 (2228 см^{-1}) (рис. 2, 3). При дозе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и выше в области R_p образуются локальные скопления атомов водорода в пластинчатых водородных выделениях ($\sim 2110 \text{ см}^{-1}$). Такие же дефекты наблюдались при обработке кремния в водородной плазме в виде пластинок, залегающих в плоскостях (111) [7] или (100) [8], однако они стабильны только до температур $300\text{--}400^\circ\text{C}$. При имплантации из-за высокой концентрации содержащих водород межузельных и ва-

кансионных комплексов в области R_p , их совместная кластеризация ведет к образованию более стабильных пластинчатых дефектов, плоскость залегания которых соответствует минимуму свободной энергии. Часть водородсодержащих комплексов (например, VH_2 и SiH_2) могут аннигилировать на границах скоплений с образованием газовых молекул H_2 внутри микрополости. Это должно приводить вместо отжига к резкому возрастанию механических напряжений, что и наблюдается экспериментально в виде "отрицательного" отжига дефектов при температурах 300–400°C, когда такие комплексы способны мигрировать [9].

3. Структуры кремний-на-изоляторе

При изготовлении КНИ структур методом DeleCut имплантация ионов водорода проводилась через тонкий слой SiO_2 , который служил для сохранения имплантированного водорода, защиты пластины от загрязнений и разрушения поверхности в процессе имплантации. В отличие от метода Smart Cut® после имплантации этот слой убирался. В результате доза атомов водорода, необходимая для отслаивания тонкой пленки кремния при последующих термообработках, была уменьшена до $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При использовании дозы более $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ сразу после облучения на поверхности пластины формировались дефекты, препятствующие плотному соединению и однородному переносу слоя на окисленную опорную подложку. При дозе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ имплантированного водорода было недостаточно для однородного отслоения пленки по всей поверхности облученной пластины, что соответствует данным ИК поглощения.

Операция переноса проводилась аналогично методу Smart Cut®. Завершающий отжиг КНИ структуры при 1100°C был необходим для увеличения силы срачивания между пластинами кремния до величин, равных силе разрыва объемного кремния, а также для удаления из отсеченного слоя кремния остаточных радиационных дефектов и водорода. Он проводился в течение 0.5–1 ч. Короткие времена отжига при относительно низких для оксида температурах были возможны, так как захороненный диэлектрик не подвергался облучению, и поэтому не было необходимости в длительном отжиге дефектов для восстановления его свойств. Удаление верхнего нарушенного слоя отсеченной пленки кремния проводилось окислением.

Такой способ создания структур КНИ существенно улучшает границу Si/SiO_2 . Граница срачивания в структурах, изготовленных этим методом, расположена между отсеченным слоем Si и скрытым SiO_2 . По данным микрокопии атомарного разрешения величина переходного слоя составляет 1–2 атомных монослоя (0.3–0.6 нм). Атомарно-плоские структуры КНИ (рис. 4) были получены в стандартных режимах. Толщина переходного слоя между Si и термическим SiO_2 , выращенным при 1000°C

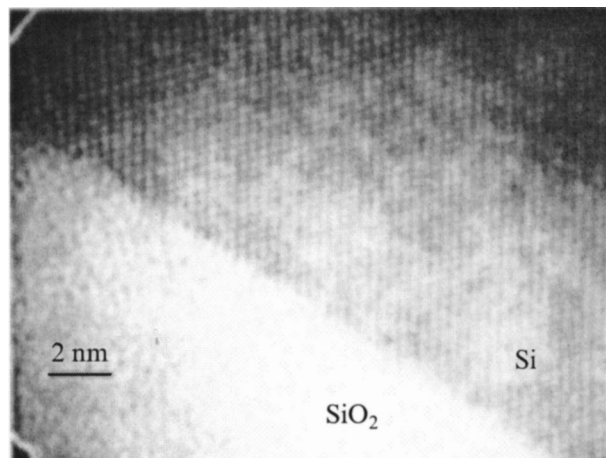


Рис. 4. Атомарное разрешение сечения КНИ (на снимке интерфейс между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком). Подложка внизу.

и имеющим толщину 280 нм, составляет по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и эллипсомерии около 3 нм [10]. По данным эллипсомерии, переходной слой на границе срачивания Si/SiO_2 составляет 0.3 нм. С помощью послыйного термического окисления и травления в растворах HF были получены рекордно тонкие пленки монокристаллического кремния в структуре КНИ/ SiO_2 с толщинами 1–3 нм и 0.2 мкм соответственно. Ультратонкие слои необходимы для реализации одноэлектронных МОП транзисторов и элементов памяти, работающих при комнатных температурах.

Таким образом, основным отличием данного способа создания структур КНИ от метода Smart Cut® является формирование скрытого диэлектрика (термического окисла) на необлучаемой подложке и уменьшение совокупности радиационно-термических воздействий на структуру, используемую в процессе изготовления КНИ. Исследования методами электронной микроскопии, полученных данным способом структур, показали, что в отсеченном слое кремния не наблюдается каких-либо структурных дефектов. По данным вторичной масс-спектропии ионов (ВИМС) отжиг при 1100°C является достаточным для удаления водорода из отсеченного слоя кремния.

Вторым важным достоинством метода DeleCut является практически полное отсутствие механических напряжений в структуре КНИ (менее 10^{-5}) по данным высокоразрешающей рентгеновской дифракции [11].

4. Электрофизические свойства структур кремний-на-изоляторе

Так как граница срачивания при создании структур КНИ находится между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком, очень важным моментом становится чистота срачиваемых поверхностей, так как

Таблица 1. Основные параметры исходного материала

Исходный Si	Тип проводимости	Легирование, см ⁻³	Концентрация кислорода, см ⁻³	Подвижность, см ² /(В · с)	Ориентация
Cz-Si-1	<i>n</i> -тип	$4 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{17}$	1100	$\langle 100 \rangle$
Cz-Si-2	<i>p</i> -тип	$3 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{17}$	320	$\langle 100 \rangle$
Cz-Si-3	<i>p</i> -тип	$2 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{17}$	350	$\langle 100 \rangle$
Cz-Si-4	<i>p</i> -тип	$2 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{17}$	106	$\langle 111 \rangle$

Таблица 2. Сочетание пластин, используемое при создании структур КНИ, продолжительность отжига при 450°C (ТО1) и проводимость отсеченного слоя кремния после высокотемпературного отжига (ТО2, 1100°C)

Сочетание пластин	Обозначение	Время ТО1, ч	Проводимость после ТО1	Проводимость после ТО2
Cz-Si-3/4000A SiO ₂ /Cz-Si-3	SOI-1	0.5	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип
Cz-Si-4/4000A SiO ₂ /Cz-Si-3	SOI-2	0.5	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип, $2.5 \cdot 10^{16}$ см ⁻³
Cz-Si-1/4000A SiO ₂ /Cz-Si-1	SOI-3	1	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип
Cz-Si-2/2800A SiO ₂ /Cz-Si-2	SOI-4	2	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип
Cz-Si-3/2800A SiO ₂ /Cz-Si-3	SOI-5	2	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип, $3 \cdot 10^{15}$ см ⁻³
Cz-Si-1/4000A SiO ₂ /Cz-Si-1	SOI-6	2	<i>n</i> -тип	<i>n</i> -тип, $5 \cdot 10^{15}$ см ⁻³
Cz-Si-3/4000A SiO ₂ /Cz-Si-3	SOI-7	3	<i>n</i> -тип	<i>p</i> -тип, $\sim 2 \cdot 10^{15}$ см ⁻³
Cz-Si-4/4000A SiO ₂ /Cz-Si-3	SOI-8	3	<i>p</i> -тип	<i>p</i> -тип, $2 \cdot 10^{18}$ см ⁻³

в процессе срачивания может иметь место достаточно сильное загрязнение поверхностей с последующей деградацией электрофизических параметров структуры. В данном разделе приведены результаты исследования электрофизических параметров структур КНИ, включающих в себя следующее: 1 — проводимость отсеченного слоя кремния, 2 — центры с глубокими уровнями в отсеченном слое кремния, 3 — состояния на границах раздела, 4 — заряд в скрытом диэлектрике.

Толщина отсеченного слоя кремния составляла во всех случаях 0.5 мкм. Некоторые параметры исходного материала, использованного для создания структур КНИ, представлены в табл. 1. Две основные термообработки использовались в процессе создания КНИ: первая термообработка (ТО1) — это отжиг при 450°C для расслоения донорной пластины и упрочнение соединения перенесенного слоя с подложкой. Заключительной операцией создания КНИ является отжиг при 1100°C (ТО2), что позволяет убрать радиационные дефекты и водород, введенные при имплантации, и укрепить связи на границе срачивания. Для исследования использовались измерения эффекта Холла, вольт-фарадных характеристик, емкостная и зарядовая спектроскопия глубоких уровней (C-, Q-DLTS, ВИМС). Высокочастотные вольт-фарадные характеристики структур КНИ измерялись как с использованием ртутного зонда, когда второй контакт также находился на отсеченном слое кремния и имел радиальную симметрию относительно зонда, так и на меза-структурах. В последнем случае контакты создавались напылением Al и второй контакт наносился на подложку. Площадь меза-структур варьировалась в диапазоне 0.5–1.5 мм².

Было обнаружено, что отсеченный слой кремния в структуре КНИ, как правило, имеет *n*-тип проводимости, даже если в качестве исходного материала был использован кремний *p*-типа проводимости [12,13]. В табл. 2 представлены данные, полученные из измерений методом *C-V* и эффекта Холла, иллюстрирующие данный эффект. В случае использования исходного материала *n*-типа проводимости концентрация электронов в отсеченном слое структуры КНИ также возрастала (табл. 2). Исследования пространственного распределения носителей в отсеченном слое кремния были возможны только для сильно легированного слоя [13]. Было получено, что концентрация носителей в пленке кремния увеличивается при приближении к поверхности и границе Si/SiO₂. Измерения методом DLTS показали, что доноры, формируемые в отсеченном слое кремния в процессе изготовления КНИ, являются мелкими донорами. Экспериментальные результаты позволяют высказать предположение об участии водорода в формировании донорных центров, стабильных до высоких температур (1100°C). Высокая температура отжига доноров связана, по-видимому, с участием структурных нарушений (например, мелких дислокационных петель или оборванных связей на границе раздела и др.) в формировании доноров. Стабильность данного центра скорее всего определяется именно стабильностью структурных нарушений.

Нужно отметить, что формирование донорных центров в отсеченном слое кремния имеет место не только для структур КНИ, полученных методом DeleCut. Конверсия типа проводимости из *p*- в *n*-тип наблюдается и для структур, полученных методом Smart Cut®. Кроме

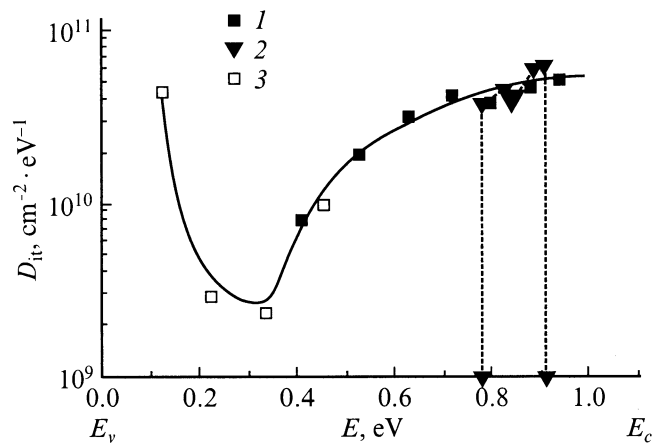


Рис. 5. Распределение состояний на границе раздела подложка/(термический окисел) и на сращенной границе Si/SiO₂: 1 — SOI-5, подложка/SiO₂; 2 — SOI-6, Si/SiO₂; 3 — SOI-8, подложка/SiO₂.

того, было обнаружено, что, варьируя условия изготовления КНИ, можно выбрать режим, когда проводимость отсеченного слоя КНИ будет соответствовать проводимости исходного материала [13].

Подвижность носителей в отсеченном слое, созданном из слабо легированного исходного материала (SOI-1, 3–6), по данным измерения эффекта Холла составляет 400–550 см²/(В·с). Подвижность носителей заряда в случае SOI-8 составляет 80 см²/(В·с).

Исследование центров с глубокими уровнями в отсеченном слое кремния методом DLTS показало [14], что в структурах КНИ наблюдаются глубокие уровни с энергией $E_c - 0.39$ эВ, сечением $\sigma = 10^{-15}$ см² и $E_c - 0.58$ эВ, $\sigma = 4 \cdot 10^{-14}$ см². Причем оказалось, что оба центра локализованы в слое от поверхности до глубины 0.2 мкм и имеют спадающие с поверхности пространственные распределения концентраций, начиная с концентраций $(2-5) \cdot 10^{15}$ см⁻³ [14]. Сравнение уровней, наблюдающихся в данной работе в пленке КНИ, с уровнями, вводимыми в кремний протяженными дефектами, показывает, что они близки по энергетическому положению. Следует отметить, что структуры КНИ, исследованные методом DLTS, не проходили стадию утончения отсеченного слоя кремния путем полировки или окисления. Такая обработка обычно проводится для удаления остаточных нарушений, введенных имплантацией водорода и сохранившихся в процессе отжига (максимум нарушений, вызванных имплантацией водорода, находится на поверхности структур КНИ). Локализация уровней в относительно тонком приповерхностном слое кремниевой пленки и наличие спадающего с поверхности профиля в распределении глубоких центров, с нашей точки зрения, позволяют предположить, что уровни связаны с остаточными пост-имплантационными дефектами.

В остальной части отсеченного слоя толщиной ~0.3 мкм центров с глубокими уровнями не наблю-

дается. Этот факт позволяет однозначно утверждать, что сращивание пластин на границе (отсеченный слой кремния)/(скрытый диэлектрик) не сопровождается ухудшением электрофизических характеристик структур КНИ по сравнению со Smart Cut®. Удаление приповерхностного слоя порядка 0.2 мкм позволяет получать отсеченный слой кремния, не содержащий центров с глубокими уровнями.

Не менее важным параметром структуры КНИ являются ловушки на границе раздела. Методика Q-DLTS, имеющая относительно низкую рабочую частоту (1 кГц), обладает рядом преимуществ по сравнению с классической высокочастотной DLTS и позволяет проводить исследование границ раздела в структурах КНИ [15]. Использование меза-структур с одним типом проводимости в отсеченном слое и подложке дало возможность независимо измерить распределения ловушек на сращенной границе и на нижней границе между подложкой и скрытым (термическим) окислом. На рис. 5 представлены распределения ловушек в запрещенной зоне на границе подложка/(скрытый окисел) и (отсеченный слой)/(скрытый окисел) соответственно [16]. Распределение на рис. 5 получено в результате исследования на структурах типа *n*-Si/SiO₂/*n*-Si и *p*-Si/SiO₂/*p*-Si, что позволило получить информацию для всей запрещенной зоны кремния. Результаты, представленные на рис. 5, соответствуют структурам типа *n*-Si/SiO₂/*n*-Si, когда тестировалась только верхняя половина запрещенной зоны кремния. Видно, что в структурах КНИ на границе подложка/(термический окисел) распределение состояний по запрещенной зоне является непрерывным и близким к тому, что наблюдается при исследовании состояний на границе Si/(термический SiO₂) в обычных МДП структурах [4]. Распределение состояний в верхней половине запрещенной зоны для сращенной границы Si/SiO₂ характеризуется относительно узкой полосой состояний в пределах $E_c - (0.17-0.36)$ эВ. Такое изменение спектра ловушек на сращенной границе скорее всего не связано с пассивацией водородом, так как водород практически в одинаковой концентрации присутствовал во время изготовления КНИ на обеих границах [13]. Из кривых рис. 5 следует, что плотности ловушек практически совпадают. Но очевидно, что интегральная плотность ловушек на сращенной границе оказывается меньше, чем на границе подложка/(термический окисел).

Таблица 3. Величина заряда в скрытом диэлектрике для структур КНИ, получаемых разными методами

Типы КНИ	Q_f , см ⁻²	Q_{ss} , см ⁻²
DeleCut	$(2-4) \cdot 10^{11}$	$(1.2-5) \cdot 10^{11}$
Smart Cut	$\sim 4 \cdot 10^{11*}$	$3.5 \cdot 10^{10*}$
SIMOX	$(1-3) \cdot 10^{11}$	$(1-3) \cdot 10^{11}$

Примечание. *Значения приведены по данным, полученным для одной структуры без учета статистики.

В табл. 3 представлены значения фиксированного заряда Q_f и плотности поверхностных состояний Q_{ss} на границе (отсеченный слой кремния)/(скрытый диэлектрик), полученные из $C-V$ характеристик. Эти же параметры приведены и для КНИ, полученных методом Smart Cut® (фирма SOITEC), и SIMOX-структур. Как видно из сравнения, величина встроенного заряда практически одинакова для всех структур и составляет $(1-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Несколько иная ситуация получается с плотностью состояний на границах раздела. В структурах DeleCut величина Q_{ss} близка к тому, что наблюдается для SIMOX-структур. Структуры КНИ, изготовленные SOITEC, имеют меньшую плотность поверхностных состояний.

Пробивные напряжения диэлектрика в способе DeleCut выше, чем в методе Smart Cut® (≥ 100 и ~ 60 В соответственно для толщины SiO_2 200 нм). Более высокие пробивные напряжения обусловлены тем, что в рассматриваемом способе не происходило нарушение свойств SiO_2 в процессе облучения.

5. КНИ КМОП транзисторы

Изготовленные методом DeleCut пластины КНИ тестировались путем создания на них приборных структур. Для этого была разработана топология тестового кристалла. Тестовый кристалл включал в себя 26 типов n - и p -канальных транзисторов как с линейной, так и с кольцевой геометрией. Транзисторы имели три вариации по длине канала: 20, 0.5, 0.3 мкм. Варьировалась также доза имплантации в базовый слой транзистора.

Для создания короткоканальных транзисторов были изготовлены шаблоны, обеспечивающие длину канала

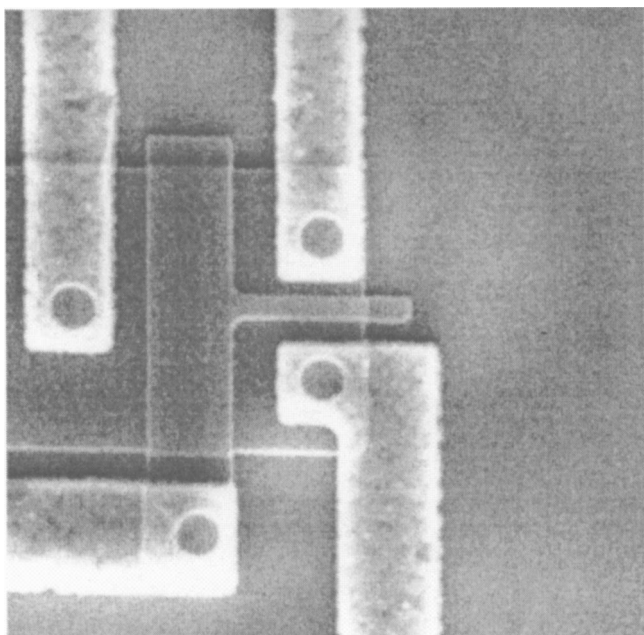


Рис. 6. Изображение КНИ МОП транзистора в сканирующем электронном микроскопе. Размер изображения 20×20 мкм.

Таблица 4. Конструктивные и электрические параметры тестовых структур

Конструктивные параметры		Величина
Толщина базового слоя кремния	d_{Si}	100 нм
Толщина лицевого окисла	d_{ox1}	12 нм
Толщина захороненного слоя окисла	d_{ox2}	280 нм
Длина затвора	L	20, 0.5, 0.3 мкм
Ширина затвора	W	15–50 мкм
Электрические параметры		Величина
n -канал	Порог V_{T1}	0.6 ± 0.05 В
	μ_n при $L = 20$ мкм	$350 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
	$L = 0.5$ мкм	$60 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
	$L = 0.3$ мкм	$45 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
S		100 мВ/дек
	Порог тылового транзистора V_{T2}	9 В
p -канал	Порог V_{T1}	-1.3 В
	μ_p при $L = 20$ мкм	$125 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
	$L = 0.5$ мкм	$45 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
	$L = 0.3$ мкм	$35 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
S		120 мВ/дек
	Порог V_{T2}	-12 В
Плотность поверхностных состояний Dit_2		$(1-3) \cdot 10^{11} \text{ В}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

около 0.5 и 0.3 мкм после фотолитографии по поликремнию. На рис. 6 показано изображение поликремниевое затвора, полученное в сканирующем электронном микроскопе. Затвор имеет T -образную форму. Слева за вертикальной перемычкой p^+ область контакта к базовой области n -канального транзистора. Перемычка имеет ширину 3 мкм. Для выбора уровня легирования базового слоя было проведено численное моделирование проектируемых короткоканальных транзисторов. Была разработана программа, решающая двумерное уравнение Пуассона. Программа находит величину потенциала φ во всех точках отсеченного слоя кремния между истоком и стоком. Далее вычисляется концентрация свободных носителей заряда и проводимость этого слоя в приближении малых токов. На основании расчетов был выбран уровень легирования в n -канальном транзисторе атомов бария и в p -канальном атомов фосфора, при котором проводимость слоя не превосходит $2 \cdot 10^{-11} \text{ см/мкм}$ при нулевом напряжении на затворе и длине канала 0.3 мкм. Такая величина соответствует току утечки, не превышающему $4 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ при ширине канала 20 мкм, что вполне удовлетворяет требованиям допустимой утечки закрытого транзистора.

Для создания слоя отсеченного кремния толщиной 100 нм на пластинах КНИ несколько раз выращивался термический окисел, который затем удалялся. Толщина остающегося слоя кремния измерялась эллипсометром.

В табл. 4 представлены конструктивные и электрофизические параметры транзисторов, полученные в процессе измерений. Были определены параметры лицевого транзистора: пороговое напряжение V_T , подвижность μ и наклон подпороговой характеристики S . Из характеристик тылового транзистора была определена плотность поверхностных состояний Dit_2 на границе отсеченного слоя кремния (базового слоя) и скрытого окисла.

Как и ожидалось, на стоковых характеристиках заметно влияние короткоканальных эффектов: ток не насыщается при $V_D > V_G - V_T$, а продолжает расти сверхлинейно на этом участке характеристики. Величина максимального тока составляет соответственно 130 мкА/мкм для n -канального транзистора и 70 мкА/мкм для p -канального. Величины проводимости канала при малых V_D составляют 0.5 См/см для n -канального и 0.2 См/см для p -канального транзистора. Меньшие величины для p -канального транзистора объясняются меньшей подвижностью и большей величиной порога V_T .

Наиболее неожиданным результатом явилось снижение эффективной подвижности электрона и дырок по мере уменьшения длины канала. На контрольной пластине, на которой транзисторы изготавливались в объемном материале, также наблюдается снижение величины $\mu_{\text{эф}}$ от 550 до 170 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при уменьшении длины канала от 20 до 0.3 мкм. Подвижность в объемном материале уменьшается в 3 раза, а на пластинах КНИ в 6 раз. Разница, возможно, объясняется разными условиями для диффузии и отжига дефектов в КНИ и объемном кремнии, поскольку при толщине слоя КНИ 0.4 мкм разницы в подвижности при длине канала 20 мкм не наблюдалось. Вероятной причиной снижения подвижности являются остаточные дефекты, диффундирующие при отжиге из областей сток-исток в область канала транзисторов.

6. Заключение

Преимущества технологии DeleCut по сравнению с технологией Smart Cut[®] связаны с использованием в качестве скрытого диэлектрика термического окисла на необлученной пластине. Это позволяет избежать его радиационных повреждений. Кроме того, граница сращивания Si/SiO₂ между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком практически не имеет переходного слоя, позволяя получать слои кремния до 3–5 нм. Главным достоинством технологии DeleCut является электрофизическое совершенство границы сращивания (слой перенесенного кремния)/(скрытый термический окисел SiO₂). В частности, распределение состояний в верхней половине запрещенной зоны для этой границы характеризуется относительно узкой полосой в пределах $E_c - (0.17-0.36)$ эВ, а их полная концентрация меньше 10^{11} см^{-2} . Внутренняя граница (скрытый термический SiO₂)/(подложка Si) в структуре КНИ характеризуется непрерывным спектром состояний. В отсеченном слое кремния наблюдаются два центра с уров-

нями $E_c - 0.39$ эВ, $\sigma = 10^{-15} \text{ см}^2$ и $E_c - 0.58$ эВ, $\sigma = 4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, которые локализованы в приповерхностном слое толщиной 0.2 мкм и предположительно связаны с остаточными дефектами. Удаление этого слоя термическим окислением после приготовления структуры кремний-на-изоляторе позволяет получить электрически совершенный слой кремния толщиной 1–0.003 мкм, не содержащий центров с глубокими уровнями.

Изготовленные субмикронные n - и p -канальные МОП транзисторы с длиной канала менее 0.5 мкм в слое кремний-на-изоляторе толщиной 0.1 мкм имеют ток канала 130 мкА/мкм и 70 мкА/мкм при $V_G = V_D = 3$ В. Величина проводимости канала при малых V_D равна 0.5 См/см и 0.2 См/см соответственно для n - и p -канальных транзисторов. Токи утечки транзисторов не превышают 10^{-9} А при ширине канала 20 мкм. Эти данные подтверждают перспективы применения технологии DeleCut для изготовления КНИ УБИС с низким энергопотреблением.

Список литературы

- [1] В.П. Попов, А.И. Антонова, Л.В. Миронова, В.Ф. Стась. Патент РФ № 99120527/28(021735) от 28.09.99 г.
- [2] R. Chau, J. Kavalieros, R. Schenker, B. Roberds, D. Zionberger, D. Barlage, B. Doyle, R. Arghavani, A. Murthy. Abstracts Int. Electron. Dev. Meeting (San Francisco, 2000).
- [3] M. Bruel. Electron. Lett., **31**, 1201 (1995).
- [4] Q.-Y. Tong, U. Goesele. *Wafer bonding* (N.Y. Wiley-Interscience Publication, 1999) p. 52.
- [5] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990) с. 216.
- [6] L.S. Sidhu, T. Kostas, S. Zukotynski. J. Appl. Phys., **85**, 2574 (1999).
- [7] S. Muto, S. Takeda, M. Hirata. Mater. Sci. Forum, **143-7**, 897 (1994).
- [8] A.G. Ulyashin, A.I. Ivanov, R. Job, W.R. Farnier, F.F. Komarov, A.C. Kamyshan. J. Mater. Sci. Eng. B, **58**, 91 (1999).
- [9] V.P. Popov, A.K. Gutakovskiy, I.V. Antonova, K.S. Zhuravlev, G.P. Pokhil, I.I. Morosov. MRS, **536**, 109 (1999).
- [10] V.P. Popov, I.V. Antonova, V.F. Stas, L.V. Mironova, A.K. Gutakovskii, E.V. Spesivtsev, A.A. Franzusov, A.S. Mardegov, G. Feofanov. J. Mater. Sci. Eng. B, **73**, 82 (2000).
- [11] V.P. Popov, I.V. Antonova, J. Bak-Misiuk, J. Domagala. Spring E-MRS, Meeting. (Strasbourg, 2000) (to be publ. in J. Mater. Sci. Eng. B).
- [12] I.V. Antonova, V.P. Popov, V.F. Stas, A.K. Gutakovskii, A.E. Plotnikov, V.I. Obodnikov. Microelectron. Eng., **48**, 383 (1999).
- [13] И.В. Антонова, В.Ф. Стась, В.П. Попов, В.И. Ободников, А.К. Гутаковский. ФТП, **34**, 1095 (2000).
- [14] И.В. Антонова, Й. Стано, Д.В. Николаев, О.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов. ФТП, **35** (8), (2001).
- [15] J.W. Farmer, C.D. Lamp, J.M. Meese. Appl. Phys. Lett., **41**, 1064 (1982).
- [16] T. Katsube, K. Kakimoto, T. Ikoma. J. Appl. Phys., **52**, 3504 (1981).

Редактор Н.М. Колчанова

Properties of structures and devices on SOI substrates

V.P. Popov, I.V. Antonova, A.A. Franzusov,
L.N. Safronov, G.N. Feofanov, O.V. Naumova,
D.V. Kilanov

Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract A new variant of hydrogen ion cut technology for SOI creation was proposed. The main advantage of the method named DeleCut is the improvement of structural and electronic properties of buried oxide and SOI films. Test SOI CMOS structures were designed and their electron transport and a capture at the interface states were investigated computationally and experimentally. These characteristics were compared with data obtained for the same structures prepared on volume silicon wafers. Threshold voltage and leakage current increase were observed simultaneously. The differences between SOI and volume short channel CMOSFETs are explained in terms of processes of annealing and diffusion of defects in these two materials.