

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ И ГЕТТЕРИРУЮЩИХ СЛОЕВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПЛАНТАЦИИ ПРОТОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

**Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.М. Миронов, А.И. Купчишин\***

*НИИ прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ (Минск)*

*Беларусь*

*\*Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы)*

*Казахстан*

Поступила в редакцию 09.12.2008

На основании результатов исследований процессов дефектообразования в кремнии и арсениде галлия при внедрении протонов и перестройки дефектной системы кристаллов в результате последующих термообработок получены оптимальные режимы этих обработок для формирования приборных структур микро- и оптоэлектроники. Представлен ряд разработок, доведенных до технологического исполнения, позволяющих получать уникальные структуры с использованием протонных пучков: создание структур кремний-на-изоляторе, создание внутренних геттерирующих слоев в кремнии и формирование межприборной изоляции на полупроводниках  $A^3B^5$ .

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, в современных технологиях создания СБИС и оптоэлектронных полупроводниковых приборов, можно уверенно выделить тенденцию использования ионной имплантации примесей, не относящихся к легирующим. В данном случае используются эффекты накопления и трансформации дефектов для создания локальных областей полупроводника, обладающих специфическими (требуемыми) свойствами. Можно говорить о появлении целого класса технологий, где используются протонные пучки. Использование протонной имплантации обусловлено уникальными свойствами атомов водорода. Благодаря большой химической активности, водород может образовывать специфичный тип дефектов, как с атомами матрицы, так и с атомами легирующей примеси, а также собственные водородо-индуцированные дефекты, которые при определенных условиях остаются стабильными даже при высоких температурах отжига. С другой стороны, благодаря малой массе ионов водорода, имплантационные слои за исключением области остановки ионов (вблизи проективного пробега  $R_p$ ) остаются практически бездефектными. Все эти уникальные свойства протонных пучков позволили разработать ряд новых технологий, используя

щих эффекты примесно-дефектной инженерии. В данной работе авторами представлен ряд разработок, доведенных до технологического исполнения, позволяющих получать уникальные структуры с использованием протонных пучков.

### СОЗДАНИЕ СТРУКТУР КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ

Реализация возможностей создания КНИ-приборов, в которых интегрированы цифровые и аналоговые, низковольтные и высоковольтные схемы различной мощности, КМОП- и биполярные схемы, открывает новые пути развития и дает шанс на “продление жизни” традиционной кремниевой технологии. Среди десятка различных методов производства КНИ-пластин можно выделить два доминирующих и достигших промышленного освоения: SIMOX [1] и Smart-Cut [2]. При оценке стоимости конечных КНИ-пластин, возможности варьирования их свойств, использования стандартного технологического оборудования и техпроцессов, наиболее простым и перспективным выглядит метод Smart-Cut, сочетающий процессы прямого соединения окисленных пластин и прецизионного ионного отслоения. Авторами выполнены работы по отработке, развитию и адаптации к существующему технологическому

оборудованию на НПО “Интеграл” технологии производства КНИ-пластин (“по мотивам” метода Smart-Cut).

В качестве исходных использовали стандартные 100 мм пластины кремния (100)-ориентации, легированные бором (КДБ-12). Исходные пластины отбирались с учетом минимальных прогиба (менее 5 мкм) и неплоскостности (менее 10 мкм) пластин. Имплантация ионов водорода проводилась на ускорителе Skanibal 128S, имеющем газовый источник. Режимы имплантации: энергия 80 – 100 кэВ, доза  $4 - 5 \cdot 10^{16} \text{ H}_2^+/\text{см}^2$ , температура мишени 50 °С. Имплантация проводилась в структуре  $\text{SiO}_2$  (20 – 300 нм) /Si. Набор дозы осуществлялся поэтапно, в несколько шагов с выдержкой пластин между режимами имплантации в вакууме при комнатной температуре в течение 6 – 8 часов. Для очистки пластин и формирования гидрофильных поверхностей использовались в различных вариациях процедуры плазменной обработки, химической и гидромеханической очистки. Были отработаны оригинальные методики подготовки химически чистых оксидированных поверхностей пластин с высокой степенью гидрофильности. Процедура связывания имплантированных пластин со структурами  $\text{SiO}_2$  (20 – 200 нм) /Si проводилась вручную с использованием специально разработанной оснастки. Контроль качества связывания осуществлялся на просвет в ближнем ИК-диапазоне электромагнитного излучения. Для усиления связи между пластинами, а также для исследований влияния дополнительных низкотемпературных обработок (НТО) на качество получаемых КНИ-пластин, отжиги проводили при температурах 80 – 200 °С с различными длительностями (вплоть до 24 часов). Для термически вызываемого полного скола по водородо-индуцированному дефектному слою проводили отжиг при температурах 450 – 550 °С в течение 20 – 60 минут. Для части образцов использовался неполный отжиг (длительность 1 – 15 минут) с последующим механическим сколом по дефектному слою. Финишная термообработка получаемых КНИ-структур (для полного отжига дефектов структуры в верхнем кристаллическом слое кремния) проводилась при темпе-

ратурах 1050 – 1100 °С в среде кислорода или азота.

На рис. 1 представлены ПЭМ микрофотографии поперечных сечений образцов после имплантации ионов водорода и последующей термообработки. Дефектный слой, формируемый имплантацией ионов водорода с дозами  $4 - 5 \cdot 10^{16} \text{ H}_2^+/\text{см}^2$ , достаточно протяженный и состоит из кластеров точечных дефектов. Отжиг при 450 °С уже в течение 5 минут приводит к существенному уменьшению толщины дефектного слоя. При этом по всей толщине этого слоя формируются микро трещины (рис. 1Б). Увеличение длительности термообработки приводит к формированию макротрещины параллельно поверхности пластин (рис. 1В). Отжиг имплантированных пластин кремния ионами водорода (с дозами  $4 - 5 \cdot 10^{16} \text{ H}_2^+/\text{см}^2$ ) при температурах 400 °С не всегда приводил к формированию макротрещин даже при больших длительностях (60 минут). При использовании термообработок при более высоких температурах (500 – 600 °С) макротрещины формируются быс-

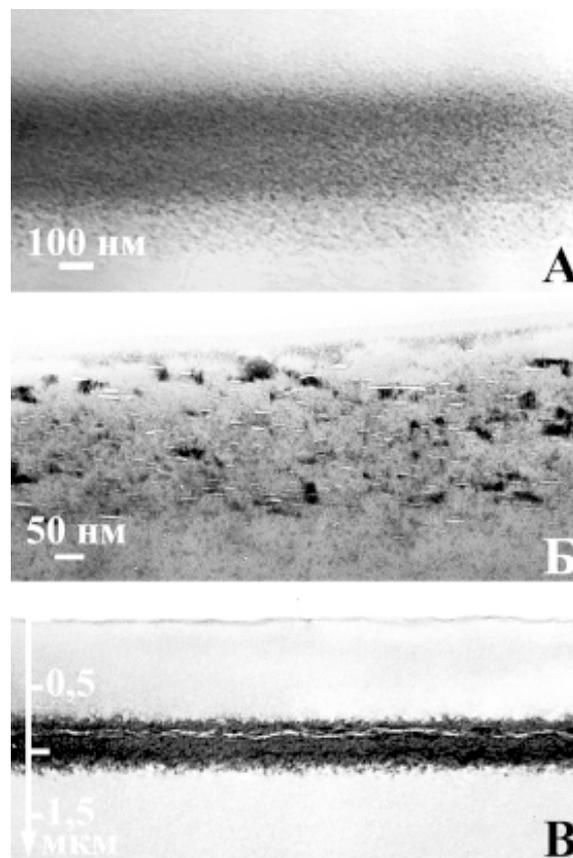


Рис. 1. Светлопольные ПЭМ микрофотографии дефектного слоя в кремниевых пластинах после имплантации ионов водорода – А) и отжига при 450 °С: 5 минут – Б) и 10 минут – В).

трее, однако в этом случае наблюдается больший разброс их местоположения в дефектном слое. Отжиг пакета связанных пластин (имплантированной водородом и окисленной) при температуре 450 °С и длительности до 15 минут не приводил к разъединению по водородо-индуцированному слою. Но пластины удавалось разделить механически. Исследования методом РЭМ сразу после отжига не выявили отличий в шероховатости поверхностей образцов КНИ-структур, полученных как полным термическим так и механическим сколом. Но при этом в образцах сколотых механически были обнаружены протяженные дефекты (трещины) в переносимом слое, по-видимому, за счет напряжений при механическом воздействии.

Финишная термообработка КНИ-структур, сколотых от пластин доноров, при температурах 1050 – 1100 °С приводит к полному отжигу структурных дефектов в поверхностном слое (рис. 2А). На рис. 2Б представлен типичный профиль элементного состава в КНИ-структуре, полученный методом ОЖЕ-спектроскопии в сочетании с послойным травлением образца. Можно отметить, что наблюдаются резкие ступеньки атомной концентрации на границах раздела в КНИ структуре. Симметричность профиля примеси относительно захороненного оксидного слоя свидетельствует о сравнимых границах раздела Si/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/Si. Результаты ПЭМ исследований хорошо согласуются с ОЖЕ-профилями. Можно отметить высокое качество и гомогенность слоев и границ раздела в КНИ-структуре. По структурным свойствам верхний кристаллический слой КНИ пластин сравним с исходными пластинами кремния – не выявлено образования дополнительных дефектов структуры в слое при формировании КНИ-структур. Исследования КНИ-образцов методом АСМ показывают, что шероховатость верхнего кристаллического слоя кремния в образцах, изготавливаемых без дополнительного низкотемпературного отжига, не превышает 7 – 7,5 нм. Это значение ниже, чем указывается в ряде работ ~10 – 20 нм [2 – 4]. Данный факт, вероятно, связан с большим отжигом радиационных дефектов во время имплантации за счет ступенчатого на-

бора дозы и длительной выдержки между этапами имплантации. И, как результат, финальный дефектный слой становится более узким (по сравнению с одностадийным набором дозы) [5]. Минимальная шероховатость поверхности (на уровне 2 нм) зарегистрирована для образцов, где использовались также и режимы низкотемпературных обработок.

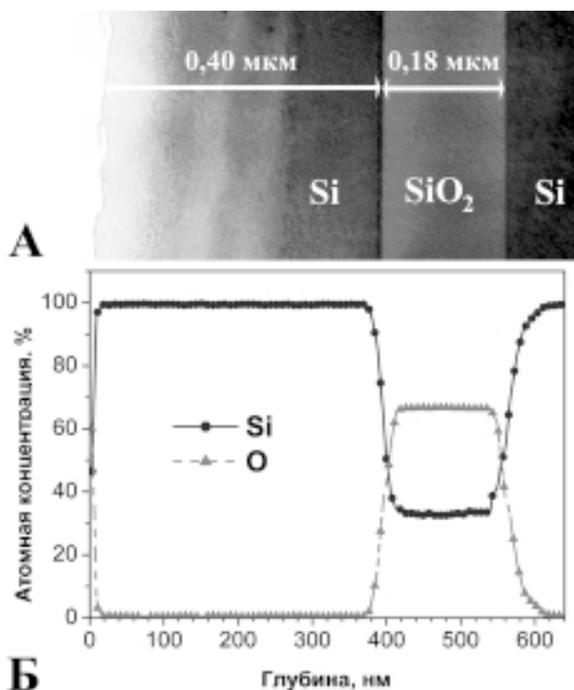


Рис. 2. ПЭМ фотография сечения КНИ-пластины – А) и ОЖЕ-профиль элементного состава – Б).

Таким образом, продемонстрирована возможность создания качественных КНИ-пластин с использованием стандартного технологического оборудования. С использованием многоступенчатого набора дозы имплантации водорода, а также дополнительных низкотемпературных отжигов, в работе показана возможность существенного снижения шероховатости поверхности КНИ-пластин (изготавливаемых в сочетании методов прямого связывания окисленных пластин и прецизионного ионного скола) вплоть до 2 нм.

### СОЗДАНИЕ ВНУТРЕННИХ ГЕТТЕРИРУЮЩИХ СЛОЕВ В КРЕМНИИ

Спецификации современных изделий микроэлектроники допускают максимальное содержание металлических примесей порядка 10<sup>9</sup> ат./см<sup>3</sup> [6]. Поэтому, при создании Si-приборов, производители все чаще дополняют строгий регламент чистых комнат процес-

сами геттерирования. Традиционно, для очистки активных областей от примесей металлов и дефектов применяются геттерирующие слои, создаваемые на непланарной стороне пластины. Но, для уменьшения глубины залегания *p-n*-переходов требуются более низкие температуры термообработки и короткие времена отжига, что приводит к снижению эффективности геттерирующих слоев, сформированных на непланарной стороне пластины. Поэтому, создание геттерирующих слоев, локализованных в непосредственной близости к активным элементам, стало в последнее время объектом интенсивных исследований. Интересными для промышленного применения являются методы создания внутреннего геттерирующего слоя основанные на внедрении средних доз ионов  $H^+$  и  $He^+$ . Исследования по формированию микропустот (пор) при имплантации ионов водорода или гелия в кремний продемонстрировали высокую эффективность геттерирования таких примесных металлов как Cu, Ni, Co, Fe, Ag, Au, Pd [7 – 8]. Но, следует отметить, что эффективность геттерирования, как правило, определяют на модельных экспериментах. Авторами работы было исследовано влияние создаваемого геттерирующего слоя, с использованием протонной имплантации, на работу тестовых структур, максимально приближенных к реальным полупроводниковым приборам.

В качестве исходных использовались пластины Cz-Si (001)-ориентации *n*-типа проводимости (КЭФ-4,5) и структуры, содержащие эпитаксиальные слои Si (2 мкм, 1 Ом·см) на (111)-Si (КЭФ-0,01). Режимы формирования внутренних геттерирующих слоев представлены в табл. 1.

Для конкретной энергии имплантации водорода выбирали дозы, при которых концентрация водорода в области максимума распределения достаточно высока для создания структурных дефектов, но ниже критической ( $\sim 1,5 - 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), когда происходит выделение большого количества газовых пузырьков уже после имплантации, что приводит к появлению микротрещин и других нежелательных дефектов структуры. Для определения оптимальных условий формирования

Таблица 1

## Режимы формирования геттерирующих слоев

Тип подложки	Энергия и доза имплантации $H^+$	Режимы термического отжига
Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111) Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 ( $H_2^+$ ) кэВ, $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	1) 800 °С, 5 мин. 2) 800 °С, 30 мин. 3) 900 °С, 5 мин. 4) 1000 °С, 5 мин. 5) 900 °С, 15 мин.
Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111) Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 ( $H_2^+$ ) кэВ, $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	1) 800 °С, 5 мин. 2) 800 °С, 30 мин. 3) 900 °С, 5 мин. 4) 1000 °С, 5 мин. 5) 900 °С, 15 мин.
(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 ( $H^+$ ) кэВ, $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	900 °С, 30 мин.
(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 ( $H^+$ ) кэВ, $3,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	900 °С, 30 мин.

геттерирующих слоев, последующий термический отжиг образцов проводился при различных температурах. Для исследований образцов с геттерирующими слоями были изготовлены специальные тестовые структуры, содержащие диоды Шоттки. Режимы получения тестовых структур представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Режимы формирования тестовых структур

Проводимая операция	Описание режимов операции	Температура обработки
Формирование диодов Шоттки	1. Напыление пленки металла (Ni) испарения 2. Формирование силицида никеля (NiSi)	< 50 °С 450 °С
Формирование контактных областей	1. Напыление пленки металла (Al) 2. Вжигание алюминия для формирования контакта	< 50 °С 450 °С

Были проведены структурные исследования слоев кремния, содержащих водородоиндуцированные слои и дефекты как после имплантации, так и после термообработок. На рис. 3А представлено светлопольное ПЭМ изображение структуры внутреннего дефектного слоя, сформированного имплантацией ионов водорода с выбранными режимами (табл. 1). Детальный анализ структуры показывает, что данный барьерный слой состоит из мелких водородо-вакансионных комплексов и кластеров точечных дефектов. По-

следующая термическая обработка при температурах ниже 600 °С (в течение 15 – 120 минут) не приводит к существенным изменениям структуры и перераспределению примеси в имплантированных водородом слоях кремния. Лишь при температурах отжига выше 650 °С наблюдается отжиг радиационно-индуцированных дефектов вблизи  $R_p$ . Плотность дефектов в области  $R_p$  значительно уменьшается и наблюдается формирование только двух типов водородо-индуцированных дефектов: “пластинчатых” и “петлеподобных” дефектов структуры, размер которых составляет 10 – 60 нм и 150 – 250 нм, соответственно. Дальнейшее увеличение температуры отжига до 800 °С (в течение 5 минут) приводит к сильному снижению концентрации “пластинчатых” дефектов (рис. 3Б). С другой стороны, зарегистрировано увеличение слоевой плотности и размеров “петлеподобных” дефектов. При этом, в центральной части отдельных больших “петлеподобных” дефектов наблюдается формирование микропустот. При более высоких температурах обработки или увеличении длительности отжига происходит практически полный отжиг водородо-индуцированных дефектов вблизи  $R_p$ . На рис. 3В представлено изображение структуры кремния имплантированного ионами водорода после отжига при температуре 900 °С в течение 15 минут. Наблюдается узкий дефектный слой вблизи  $R_p$ , содержащий большое количество микропустот, которые, как правило, соединены дефектами дислокационного типа. При этом, структурное качество кремниевой матрицы от поверхности до дефектного слоя сравнимо с чистыми исходными подложками, что подтверждается РОР исследованиями в сочетании с каналированием.

Исследования тестовых диодов Шоттки, сформированных в эпитаксиальном кремнии, содержащем внутренние геттерирующие слои, проводили с использованием CV-измерений. Результаты исследований можно обобщить следующим образом:

– наблюдается сильное уменьшение высокочастотной проводимости при измерениях в обратносмещенных диодах Шоттки в образцах с геттерирующими слоями по сравнению

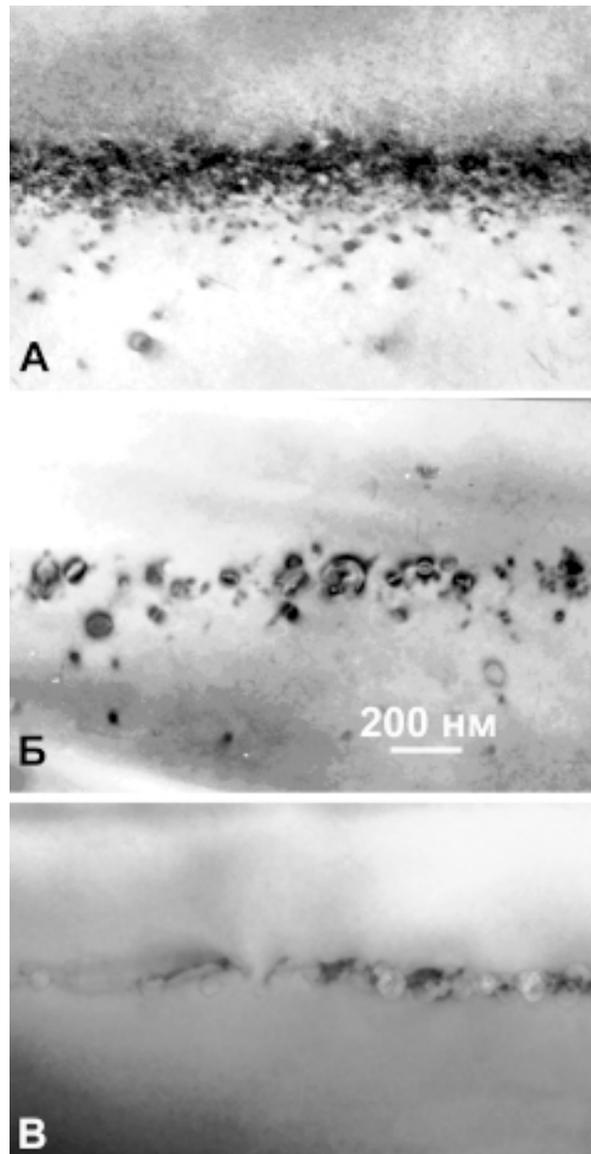


Рис. 3. Светлопольные ПЭМ изображения в поперечном сечении структуры внутреннего дефектного слоя в кремнии после имплантации ( $140 \text{ кэВ}$ ,  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) ионов водорода (А) и последующего термического отжига: 800 °С, 5 минут (Б); 900 °С, 15 минут (В).

с исходными, что связано с уменьшением центров захвата для неосновных носителей заряда;

– геттерирующая эффективность увеличивается как с повышением температуры, так и длительности отжига (рис. 4). Время жизни неосновных носителей заряда существенно увеличивается (в 160 раз, что более чем на 2 порядка величины больше чем для исходных структур) в случае формирования геттера в режимах: имплантация ионов водорода –  $215 \text{ кэВ}$ ,  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , последующий отжиг в среде  $\text{N}_2$  при температуре 900 °С в течение 15 минут.

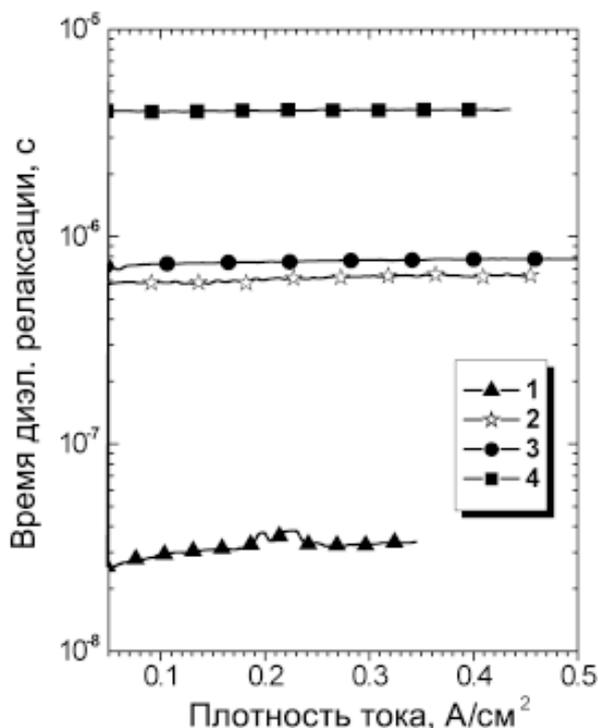


Рис. 4. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от плотности тока обратносмещенного диода Шоттки в образцах без (1) и с внутренним геттером (2 – 4), полученным имплантацией ионов водорода ( $215 \text{ кэВ}$ ,  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и последующим термическим отжигом: 2 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 3 –  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 30 минут; 4 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15 минут.

Данные DLTS исследований находятся в хорошем согласии с результатами CV-измерений. В тестовых структурах диодов Шоттки, созданных на эпитаксиальных слоях кремния, обнаруживаются глубокие уровни, связанные с ловушечными состояниями для носителей заряда, что приводит к появлению пиков DLTS спектров. При наличии геттера наблюдается практически полная аннигиляция глубоких уровней в тестовых диодах Шоттки.

Таким образом, были разработаны основные режимы формирования в кремниевых пластинах внутреннего геттера, состоящего из узкого барьерного слоя, содержащего большое количество микропустот. Результаты исследований методами DLTS и CV-измерений свидетельствует о повышении структурного совершенства эпитаксиальных слоев кремния (за счет геттерирования) в тестовых диодах Шоттки. Установлено, что использование геттерирующих слоев позволяет на 2 порядка снизить концентрацию глубоких уровней в эпитаксиальных слоях кремния, связанных с

наличием дефектов и нежелательных металлических примесей.

### ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРИБОРОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ $A^3B^5$

Ионная модификация полупроводниковых кристаллов бинарных и тройных полупроводниковых соединений, таких как GaN, GaAs, InP, AlGaAs делает возможным формирование в них изолирующих областей. Внедряемые ионы, передавая энергию атомам материала, создают дефекты структуры кристалла, которым соответствуют глубокие уровни-ловушки в запрещенной зоне полупроводника, захватывающие свободные носители заряда, в результате чего материал становится изолирующим [9 – 13]. Преимущество ионной имплантации перед традиционным методом изоляции – мезатравлением, состоит в сохранении планарности, даже при интеграции приборов вертикальной структуры (PIN-диоды) с планарными приборами (FET). В настоящее время технология изоляции с помощью имплантации протонов используется для создания гетероэпитаксиальных транзисторов, фотодетекторов, лазеров, волноводов, а также для электрической изоляции приборов в монолитных интегральных схемах [13].

Для создания изоляции необходимого качества требуются равномерные по толщине эпитаксиального слоя распределения дефектов с концентрацией, специфической для типа полупроводника и уровня его легирования. Дозы внедряемых ионов при этом должны соответствовать оптимальной концентрации создаваемых дефектов. При более низких дозах ионного облучения скорость удаления носителей оказывается недостаточной для подавления проводимости; при повышенных дозах плотность дефектов становится настолько высокой, что сопротивление уменьшается из-за включения механизма прыжковой проводимости. Чем выше уровень легирования, тем большая концентрация дефектов требуется для создания изолирующей области.

Таким образом, широкое практическое использование ионной имплантации для формирования изоляции в бинарных и тройных полупроводниковых соединениях возможно

только при условии, что для заданных типов полупроводников определены оптимальные параметры ионного легирования и термообработок. В связи с этим, нами разработана физико-математическая модель, позволяющая рассчитать оптимальные энергии и дозы для имплантации заданного типа ионов в заданный материал исходя из формы профиля радиационных дефектов (обратная задача полиэнергетической ионной имплантации). Применительно к задаче формирования изолирующих областей в полупроводниках бинарных и тройных полупроводниковых соединений, искомый профиль является равномерным распределением дефектов кристаллической структуры до заданной глубины эпитаксиального слоя [12]. Пример расчета распределения вакансий при имплантации протонов с оптимальными энергиями и дозами приведен на рис. 5.

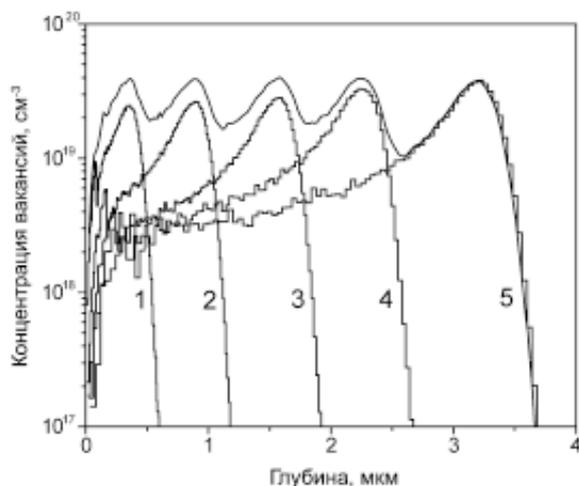


Рис. 5. Распределения вакансий, сформированных в GaAs полиэнергетической имплантацией ионов Н<sup>+</sup> в арсенид галлия с энергиями 50 (1), 130 (2), 220 (3), 300 (4) и 400 (5) кэВ и дозами соответственно  $4,2 \cdot 10^{13}$ ,  $5,3 \cdot 10^{13}$ ,  $6,2 \cdot 10^{13}$ ,  $8,0 \cdot 10^{13}$  и  $1,0 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Видно, что для получения равномерного распределения вакансий по глубине от 0 до 3,5 мкм достаточно провести полиэнергетическую имплантацию ионов Н<sup>+</sup> с энергиями от 50 до 400 кэВ.

Изготовлены экспериментальные образцы на эпитаксиальных структурах GaAs *n*-типа (рис. 6) и измерены электрофизические параметры сформированных изолирующих областей. Проведены испытания стабильности созданной изоляции. В допустимых пределах не обнаружено изменения электрофизичес-

ких свойств созданной изоляции. Результаты испытаний: термостабильность изоляции – не менее 300 °С; пробивное напряжение при ширине изолирующего слоя не менее 4 мкм – не менее 200 В; ток утечки при напряжении 5 В – не более 10 нА.

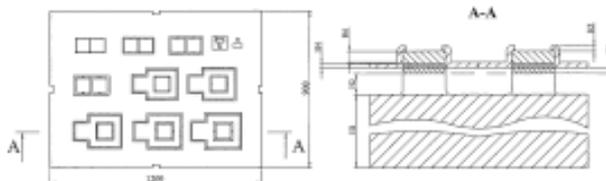


Рис. 6. Тестовая структура для оценки качества изоляции.

Нами также исследовалась зависимость слоевого сопротивления изолирующих слоев, полученных имплантацией протонов в GaAs *n*-типа, от температуры постимплантационного отжига, а также частотная зависимость проводимости до и после отжига. Полиэнергетическая имплантация протонов в образцы кристаллического GaAs *n*-типа (толщина  $400 \pm 20$  мкм, сопротивление  $0,55 \pm 0,05$  Ом·см, концентрация носителей  $2,7 \pm 0,4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, подвижность  $4180$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>) проводилась на ускорителе Van de Graaf, с поддержанием плотности ионного тока  $0,15$  мА/см<sup>2</sup>. Предварительно на поверхность пластин GaAs были нанесены слои омических контактов (слой эвтектического сплава 88 ат.% Au + 12 ат.% Ge толщиной  $0,15$  мкм, слой Ni толщиной  $0,5$  мкм и слой Au толщиной  $0,1$  мкм) и дополнительно слой Au толщиной  $1$  мкм на обратную сторону пластин. Энергии (400, 300, 220, 130 и 60 кэВ) и дозы ( $2 \cdot 10^{14}$ ,  $1,5 \cdot 10^{14}$ ,  $1,2 \cdot 10^{14}$ ,  $1,1 \cdot 10^{14}$  и  $1,0 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> соответственно) имплантируемых протонов были рассчитаны с помощью разработанной нами программы PROFCON [12] исходя из условия получения равномерного распределения радиационных повреждений на глубине до  $3,7$  мкм от поверхности GaAs. Отжиг производился в течение 15 минут при температурах в диапазоне 50 – 500 °С. Проводимость при постоянном и переменном токе измерялась с помощью системы НИОКИ 3532, с ошибкой не более 0,1%. Частота переменного тока изменялась в пределах от 50 Гц до 1 МГц.

На рис. 7 приведены зависимости слоевого сопротивления от температуры отжига, измеренные при частотах 1, 10, 100 кГц и 1 МГц

переменного тока (АС) и при постоянном токе (DC). Видно, что сразу после имплантации протонами слоевое сопротивление образцов составляет примерно  $10^8$  Ом·см. При отжиге сопротивление увеличивается и достигает максимума  $5 \cdot 10^8$  Ом·см при  $320^\circ\text{C}$  для постоянного тока. Из частотной зависимости сопротивления можно сделать вывод о том, что проводимость обусловлена прыжковым механизмом. При увеличении температуры отжига прыжковая проводимость подавляется, при температуре более  $380^\circ\text{C}$  зонный механизм проводимости становится основным, а роль прыжкового механизма снижается, что соответствует отжигу радиационных дефектов.

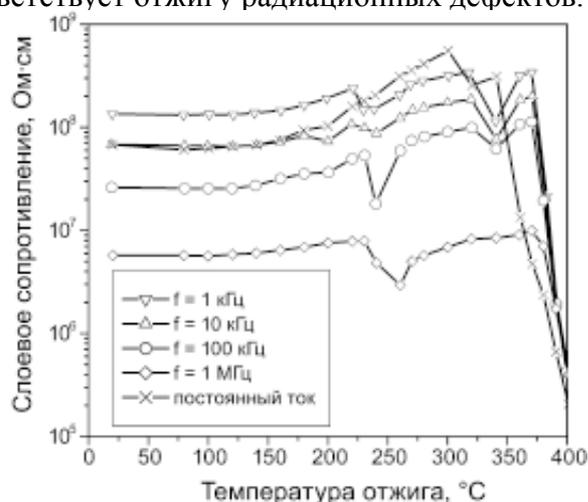


Рис. 7. Зависимость слоевого сопротивления от температуры отжига, измеренная при различных частотах переменного тока и при постоянном токе.

Для групп образцов, отожженных при различных температурах, на частоте 1 МГц была измерена зависимость проводимости от температуры, что позволило определить энергию активации  $\Delta E$  прыжковой проводимости. Для образцов, отожженных при низких температурах ( $160^\circ\text{C}$ ), получена величина  $\Delta E = 0,4$  эВ. Температуре  $240^\circ\text{C}$  соответствует две величины энергии активации, 0,2 эВ и 0,5 эВ. Для  $340^\circ\text{C}$  энергия активации составляет 0,65 эВ. Такие значения энергии активации прыжковой проводимости характерны для переходов электронов через потенциальный барьер между уровнями дефектов [14]. Энергия активации 0,65 эВ соответствует уровню  $E_4$  (0,67 эВ) [15], связанному с дефектным комплексом  $\text{As}_{\text{Ga}} + \text{V}_{\text{As}}$ . Уровень с энергией активации 0,39–0,40 эВ, наблюдавшийся в облученном протонами

GaAs  $n$ -типа [16], также связан с комплексным дефектом.

Таким образом, проведенные исследования имплантированного протонами GaAs  $n$ -типа позволили получить изоляцию достаточного качества и сделать выводы о механизмах переноса заряда в облученных слоях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны технологические режимы, обеспечивающие создание качественных КНИ-пластин с использованием стандартного технологического оборудования электронной промышленности. С использованием многоступенчатого набора доз имплантации протонов, а также дополнительных низкотемпературных отжигов, показана возможность существенного снижения шероховатости поверхности КНИ-пластин вплоть до 2 нм.

Определены оптимальные режимы формирования в кремниевых пластинах внутреннего геттера, состоящего из тонкого барьерного слоя, содержащего большое количество микропустот. Результаты исследований методами DLTS и CV-измерений свидетельствуют о повышении структурного совершенства эпитаксиальных слоев кремния в тестовых диодах Шоттки. Установлено, что применение геттерирующих слоев позволяет на 2 порядка снизить концентрацию глубоких уровней в эпитаксиальных слоях кремния, связанных с наличием дефектов и нежелательных металлических примесей.

Проведенные исследования влияния процессов имплантации протонов в кристаллы GaAs  $n$ -типа позволили установить энергетические характеристики формируемых дефектов структуры, выяснить термостабильность таких дефектов и на основании этих данных получить межприборную изоляцию промышленного качества и сделать заключение о механизме переноса заряда в облученных протонами слоях GaAs.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Izumi K., Doken M., Ariyoshi H. C.M.O.S. devices fabricated on buried  $\text{SiO}_2$  layers formed by oxygen implantation into silicon//Electronics Letters. – 1978. – Vol. 14. – P. 593-594.
2. Bruel M. Silicon on insulator material technology//Electronics Letters.– 1995. – Vol. 31,

- No. 14. – P. 1201-1202.
3. Bruel M. Application of hydrogen ion beams to Silicon On Insulator material technology//Nucl. Instr. and Meth. – 1996. – B108. – P. 313-319.
  4. Tong M., Gan Q., Hudson G., Fountain G., Enquist P. Low-temperature hydrophobic silicon wafer bonding//Appl. Phys. Lett.–2003.– Vol. 83, No. 23. – P. 4767-4769.
  5. Челябинский А.Р., Комаров Ф.Ф.//Успехи физ. наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813-846.
  6. The National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Assoc., San Jose, CA. – 1994. – P. 110-131.
  7. Fichtner P.F.P., Kaschny J.R., Yankov R.A., Mucklich A., Kreissig U., Skorupa W. Overpressurized bubbles versus voids formed in helium implanted and annealed silicon//Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70. – P. 732-734.
  8. Petersen G.A., Myers S.M., Follstaedt D.M. Gettering of transition metals by cavities in silicon formed by helium ion implantation//Nucl. Instr. Meth. B. – 1997. – Vol. 127-128. – P. 301-306.
  9. Pearton S.J. Ion implantation for isolation of III-V semiconductors technology//Mater. Sci. Rep. – 1990. – No. 4. – P. 313-367.
  10. Pearton S.J. Ion impantation in III-V semiconductor technology//Intern. J. of Mod. Phys. – 1993. – Vol. B7. – P. 4687-4761.
  11. Ahmed S., Knights A.P., Gwilliam R., Sealy B.J. The effect of substrate temperature on the isolation of n-type GaAs layers using MeV boron implantation//Semicond. Sci. Technol.– 2001. – No. 16(3). – P. L17-L19.
  12. Komarov F., Kamyshan A., Mironov A.M., Lagutin A.E., Martynov I.S. Formation of device isolation in GaAs with polyenergetic ion implantation//Vacuum. – 2001. – Vol. 63. – P. 577-579.
  13. Huang T.C., Chung Y., Coldren L.A., Dagli N. Field-induced waveguides and their application to modulators//IEEE J. Quantum Electron. – 1993. – Vol. 29. – P. 1131-1143.
  14. Mott N.F., Davies E.A. Electronic process in ion-crystalline materials. – Clarendon Press: Oxford, 1971. – 42 p.
  15. Tan H.H., Williams J.S., Jagadish C. Characterization of deep levels and carrier compensation created by proton irradiation in undoped GaAs //J. of Appl. Phys.– 1995. – Vol. 78(3). – P. 1481-1487.
  16. Boudinov H., Coelho A.V.P., Tan H.H., Jagadish C. Characterization of deep level traps responsible for isolation of proton implanted GaAs//J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93. – P. 3234-3238.

**ФОРМУВАННЯ ІЗОЛЮЮЧИХ І  
ГЕТТЕРУЮЧИХ ШАРІВ У  
НАПІВПРОВІДНИКАХ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ІМПЛАНТАЦІЇ  
ПРОТОНІВ СЕРЕДНІХ ЕНЕРГІЙ**

**Ф.Ф. Комаров, О.В. Мільчанин,  
А.М. Міронов, А.І. Купчішин**

На підставі результатів досліджень процесів дефектоутворення в кремнії та арсеніді галію при впровадженні протонів і перебудови дефектної системи кристалів у результаті наступних термообробок отримані оптимальні режими цих обробок для формування приладових структур мікро- і оптоелектроніки. Представлено ряд розробок, доведених до технологічного виконання, які дозволяють одержувати унікальні структури мікро- і оптоелектроніки з використанням протонних пучків.

**THE FORMATION OF ISOLATING AND  
GETTERING LAYERS IN  
SEMICONDUCTORS WITH USE OF  
MEDIUM ENERGY PROTON  
IMPLANTATION**

**F.F. Komarov, O.V. Milchanin,  
A.M. Mironov, A.I. Kupchishin**

On the basis of results of researches of processes of defect formation in silicon and arsenide of gallium at introduction of protons and alteration of the imperfect system of crystals as a result of subsequent heat treatments the optimum modes of these treatments are got for forming of device structures micro- and optoelectronics. A few important implementations of proton beams to produce unique structures of microelectronics and optoelectronics are presented.