

УДК 621.382.28

В.Н. ЛИТВИНЕНКО

Херсонський національний технічний університет

Н.В. БОГАЧ

ООО «Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры», г. Севастополь

ДЕФЕКТЫ И ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ И МЕТОДЫ ИХ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные виды структурных дефектов и примесей в кремнии. Представлен анализ влияния структурных дефектов и примесей в кремнии на электрические характеристики p-n структур. Сделан обзор основных методов геттерирования структурных дефектов и примесей в кремнии. Проанализированы достоинства и недостатки методов геттерирования при их использовании в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. Приведены экспериментальные результаты исследования влияния методов геттерирования на обратные характеристики приборов. Предложены оптимальные режимы проведения процессов геттерирования.

Ключевые слова: структурные дефекты, геттерирование, обратный ток, кремний, примеси, окислительные дефекты упаковки.

В.М. ЛИТВИНЕНКО

Херсонський національний технічний університет

М.В. БОГАЧ

ТОВ «Конструкторське бюро комутаційної апаратури», м. Севастополь

ДЕФЕКТИ І ДОМІШКИ В КРЕМНІІ І МЕТОДИ ЇХ ГЕТЕРУВАННЯ

В статті розглянуті основні види структурних дефектів і домішок в кремнії. Представлено аналіз впливу структурних дефектів і домішок в кремнії на електричні характеристики p-n структур. Зроблено огляд основних методів гетерування структурних дефектів і домішок в кремнії. Проаналізовані переваги і недоліки методів гетерування при їх використанні у виробництві напівпровідникових приладів і інтегральних схем. Приведені експериментальні результати дослідження впливу методів гетерування на зворотні характеристики приладів. Запропоновані оптимальні режими проведення процесів гетерування.

Ключові слова: структурні дефекти, гетерування, зворотний струм, кремній, домішки, окислювальні дефекти пакування.

V.N. LITVINENKO

Kherson National Technical University

N.V. BOHACH

LLC «Design Bureau of switching equipment», Sevastopol

DEFECTS AND IMPURITIES IN SILICON AND METHODS THEIR GETERONOMNAYA

In the article the basic types of structural defects and admixtures are considered in silicon. The analysis of influencing of structural defects and admixtures is presented in silicon on electric descriptions of p-n structures. The review of basic methods of gettering of structural defects and impurities is done in silicon. Dignities and lacks of methods of gettering are analysed at their use in the production of semiconductor devices and integrated circuits. The experimental results of research of influencing methods of gettering are resulted on reverse descriptions of devices. The optimum modes of conducting of processes of gettering are offered.

Keywords: structural defects, gettering, reverse current, silicon, impurities, oxidizing defects of packing.

Постановка проблемы

Основным, базовым материалом электроники является кремний. С использованием кремниевых подложек производится около 95% всех полупроводниковых приборов. Уровень качества именно этого материала в значительной степени определяет развитие отрасли в целом. В реальных кристаллах имеются элементарные дефекты, влияющие на их свойства. Структурные дефекты, особенно декорированные примесями, отрицательно влияют на электрические параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем и их надежность.

Современные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы представляют собой чрезвычайно сложные устройства, отдельные компоненты которых имеют размеры не более доли

микрометра. Изготовление таких устройств осуществляется на монокристаллических полупроводниковых пластинах. Важнейшие свойства полупроводниковых материалов и структур на их основе определяются наличием примесей и структурных несовершенств в кристаллах. Причем нежелательные примеси и дефекты могут появляться не только на стадии получения материалов, но и в технологических процессах изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на их основе.

Перед реализацией современного высокоэффективного производства полупроводниковых приборов становится необходимой предварительная оценка возможного процента выхода годных кристаллов конкретного типа приборов с учетом их технологических особенностей производства, особенностей используемых исходных материалов и с учетом предполагаемого структурного совершенства рабочих областей прибора.

Исследование процессов дефектообразования при формировании приборных структур прежде всего необходимо для конкретизации требований к исходным монокристаллам полупроводниковых материалов и эпитаксиальных структур на их основе. Кроме того, изучение проблемы структурных несовершенств в активных областях приборов может привести к оптимизации самих технологических приемов изготовления приборных структур, а в отдельных случаях - подсказать нестандартные решения при разработке новых перспективных приборов.

Несмотря на большое количество работ по структурным нарушениям в кремнии, вопросы контролируемого управления дефектообразованием при производстве многих кремниевых приборов требуют дальнейшего рассмотрения.

Анализ последних исследований и публикаций

Бурное развитие микроэлектроники, четкая тенденция к миниатюризации рабочих элементов, создание новейших перспективных, конструктивно сложных приборов, а также необходимость наличия высокоэффективного промышленного производства современных полупроводниковых приборов и интегральных схем продолжают оставлять актуальными вопросы влияния структурных дефектов материала на параметры и процент выхода годных приборов.

Методами рентгеновской дифракционной топографии исследованы дефекты в многослойных эпитаксиальных структурах на основе кремния, предназначенных для использования в качестве исходного материала для изготовления силовых эпитаксиально-диффузионных полупроводниковых приборов [1]. Основными методами исследования образцов являлись проекционные методы Ланга и обратного отражения Брэгга. Дополнительно применяли трансмиссионную методику получения «стоп-кадров» при регистрации сильно асимметричных отражений в условиях, когда ширина падающего на образец пучка рентгеновских лучей составляла от 1/3 до 1/5 толщины образца. Эта методика дает возможность оценить распределение дефектов в локальных сечениях образцов по толщине и получить изображение границы эпитаксиальных слоев с подложкой. Установлено, что основной характеристикой реальной структуры сильно легированных подложек с удельным сопротивлением менее 0,003 Ом · см является концентрационная неоднородность в виде круговых зон. При этом дислокации в исходных подложках практически отсутствовали. Показано, что основной вклад в дефектность активных рабочих слоев исследованных приборных структур вносят дефекты, образованные в процессах эпитаксиального роста, а не в термодиффузионных процессах изготовления конечных приборных структур.

Исследована зависимость образования дефектов от энергии упаковки (ЭДУ) [2]. Энергия дефекта упаковки – качественная характеристика любого полупроводникового материала. Она показывает необходимые условия для образования структурных дефектов (главным образом, линейных и объёмных). Определение ЭДУ в кремнии и германии позволяет не только установить дефектостойкость данных материалов, но и определить предельную плотность дефектов и произвести расчет ряда дополнительных параметров, например, критического радиуса дислокационных петель, что позволит более эффективно использовать данные материалы в современной электронике и нанoeлектронике. Проведенные электронно-микроскопические исследования монокристаллов кремния и германия [2] дали возможность определить значение энергии дефекта упаковки: $5 \cdot 10^{-2}$ и $9 \cdot 10^{-2}$ Дж/м² для кремния и германия соответственно. Подтверждена зависимость плотности дефектов от энергии дефекта упаковки: в кремнии, где энергия дефекта упаковки несколько ниже, чем в германии, наблюдалось существенно более высокая плотность дефектов.

В работе [3] обобщены результаты по развитию физических основ технологии, основанной на ионной имплантации, для разработки кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией на область длин волн вблизи-16мкм. Найдены технологические условия, при которых в светоизлучающем слое вводится только один тип протяженных структурных дефектов (петли Франка, совершенные призматические петли или чисто краевые дислокации), что позволило исследовать корреляцию между концентрацией протяженных дефектов определенного типа и интенсивностью линий дислокационной люминесценции. Выявлена определяющая роль собственных точечных решеточных дефектов в зарождении и трансформации протяженных структурных дефектов и люминесцентных

центров, ответственных за дислокационную люминесценцию. Установлено, что эффективность возбуждения люминесценции представляющих наибольший интерес для практического применения так называемых центров D1 изменяется более чем на 2 порядка в структурах, приготовленных разными технологическими методами.

Формирование цели исследования

Данная работа посвящена анализу влияния на электрические характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем структурных дефектов и нежелательных примесей в кремнии и методам их геттерирования.

Изложение основного материала исследования

Все дефекты кристаллической структуры, которые образуются в кремнии, можно условно разделить на две группы: ростовые и технологически внесенные [4]. Наиболее характерными ростовыми дефектами для кремния являются двойники, дефекты упаковки, ростовые дислокации, точечные дефекты (вакансии и атомы в междоузлии), а также разные скопления (кластеры) этих дефектов. К основным технологически внесенным дефектам следует отнести дислокации, которые образуются в процессе термических операций, окислительные дефекты упаковки (ОДУ), примеси тяжелых металлов и их скопления, а также преципитаты кислорода, которые могут образовываться при термообработке кремния.

Переход к использованию бездислокационного кремния не ознаменовался значительным повышением процента выхода годных приборов, что связывают с увеличением влияния технологически вносимых дефектов [4]. Поэтому представляет интерес более детальное рассмотрение влияния этих дефектов на электрические параметры полупроводниковых приборов.

Известно [5], что такие быстродиффундирующие примеси в кремнии, как Au, Cu, Fe, Ni и др. могут приводить к ухудшению электрических характеристик полупроводниковых приборов. Эти примеси вносят в запрещенную зону полупроводника глубокие уровни, которые служат центрами рекомбинации и уменьшают время жизни неосновных носителей заряда. В случае расположения глубоких центров в области объемного заряда, в результате тепловой генерации носителей тока этими центрами, увеличивается уровень обратных токов $p - n$ перехода. При наличии в кремнии дислокаций и дефектов упаковки, быстродиффундирующие примеси осаждаются на них с образованием однородных выделений металлической фазы (преципитатов) [6]. Преципитаты диэлектрических материалов, такие как SiO_2 , также как и металлические преципитаты, ухудшают обратные характеристики $p - n$ перехода.

Использование в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем бездислокационного кремния имело целый ряд далеко идущих последствий [4]. Исчезновение дислокаций повлекло, в частности, ликвидацию существующих в кристалле мест стока для атомов быстродиффундирующих примесей, вакансий. Благодаря этому в кремнии выросла концентрация разного рода преципитатов, кластеров, которые являются зародышами дефектов упаковки. Поэтому, после освоения методов получения бездислокационного кремния в промышленных масштабах, остро встал вопрос борьбы с ОДУ. Указанные дефекты не создают уровней, глубоколежащих в запрещенной зоне кремния, но становятся активными при взаимодействии с определенными примесными атомами [7]. Искривления $p - n$ переходов в месте ускоренной диффузии основной примеси по дислокации, которая ограничивает ОДУ, приводит к уменьшению напряжения пробоя, образованию диффузионных каналов.

Известно, что при высокотемпературном окислении кремния образуются дефекты упаковки [7]. Центрами зарождения поверхностных ОДУ могут быть: механические нарушения поверхности пластин при резке или шлифовке, скопление на поверхности быстродиффундирующих примесей, центры, образующиеся на поверхности после обработки пластин HF и другими травителями. Рассматривая причины появления объемных ОДУ, необходимо прежде всего отметить наличие в пластинах свирл - дефектов, а также преципитатов кислорода. Дефекты упаковки, образующиеся при окислении, имеют междоузельную природу и, следовательно, связаны с аккумуляцией и конденсацией избыточных междоузельных атомов. На рис. 1 приведены окислительные дефекты упаковки, выявленные в кремниевой диодной структуре поле операции «разгонка бора», проводимой в окислительной среде, с помощью травления в реактиве Сиртла [8].

Установлено [7], что ОДУ, образующиеся в процессе таких основных технологических операций как окисление и диффузия, представляют собой дефекты упаковки, ограниченные частичными дислокациями по Франку с вектором Бюргерса $v = a/3 (111)$. Согласно предложенной в данной работе модели, механизм образования ОДУ в пластинах кремния выглядит следующим образом. При окислении кремния разрываются ковалентные связи между всеми атомами, находящимися в поверхностном слое, но с кислородом связываются не все атомы. Оставшиеся несвязанными часть атомов кремния, становятся междоузельными. Пресыщение кремния междоузельными атомами приводит к их конденсации в ОДУ, причем зародышами в этом случае служат разные ростовые дефекты кремния (преципитаты, кластеры).

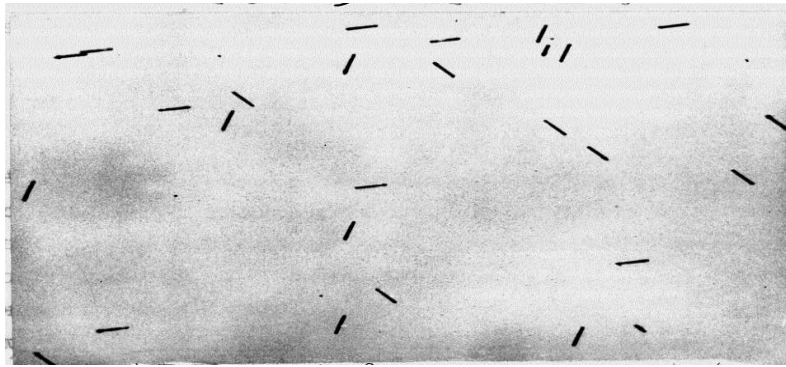


Рис.1. Микротофотографія поверхні структури діода після селективного травлення (увеличение 287^x)

Електрична активність ОДУ досліджувалась в роботі [7]. Исходя из модели ОДУ "внедрения" можно предположить, что он не может быть электрически активным, так как у него нет свободных связей. Однако, из-за наличия ограничивающих ОДУ частичных дислокаций и возможной сегрегации примесей на них, ОДУ могут оказывать заметное влияние на параметры полупроводниковых приборов. Электрическую активность ОДУ определяют несколько взаимосвязанных параметров, а именно: размер дефекта, положение дефекта по отношению к обедненной области р - n перехода, тип примеси и степень декорирования дефекта примесью. Как следствие, не все ОДУ одинаково вредны. Маленькие ОДУ, пересекающие поверхность кристалла, сравнительно легко аккумулируют примеси благодаря близости частичных дислокаций, которыми ограничен ОДУ, к поверхности (примесь попадает с поверхности и проникает в ОДУ за счет ускоренной диффузии вдоль дислокаций). В крупных ОДУ частичные дислокации, ограничивающие их, находятся довольно далеко друг от друга, что снижает средний уровень декорирования ОДУ. Исследования показывают что чем меньше ОДУ, тем больше окружающая его зона генерационно - рекомбинационных центров в области перехода за счет близости маленьких ОДУ к поверхности и, следовательно, к р - n переходу. Для описания влияния отдельного ОДУ на обратную ветвь ВАХ р - n перехода введено понятие "порогового напряжения", выше которого уже наблюдается размножение носителей заряда на ОДУ. Пороговое напряжение для каждого ОДУ в пределах площади р - n перехода может значительно изменяться, а число электрически активных ОДУ может быть гораздо меньше их общего числа.

Причиной зарождения дислокаций являются высокие температурные и концентрационные градиенты. Например, при проведении термического окисления пластины загружают в кварцевую кассету в длинный ряд на достаточно малом расстоянии одна от другой (с целью обеспечения высокой производительности). В этих условиях при охлаждении пластин тепло от них выделяется, главным образом, в радиальном направлении и, как следствие, периферийные области пластин охлаждаются намного быстрее, чем их центральная часть [1]. При этом, образуется большой радиальный температурный градиент, который приводит к возникновению значительных механических напряжений. Величины этих напряжений могут оказаться настолько значительными, что превысят границу упругости кремния, вследствие чего произойдет пластическая деформация, сопровождающаяся образованием и распространением дислокаций.

Влияние дислокаций на электрические свойства р - n перехода может проявляться двояким образом [7]. Во-первых, дислокации могут служить областями рекомбинации носителей, поскольку наличие дислокаций может приводить к появлению уровней в запрещенной зоне благодаря полям упругих напряжений. Присутствие рекомбинационных центров обедненной области р - n перехода будет проявляться в увеличении генерационных токов при обратном смещении на диоде. Вторым, и возможно, более важным эффектом является влияние дислокаций на свойства перехода за счет аккумуляции примесей на дислокациях и вокруг них. Декорированная дислокация, пересекающая р - n переход, приводит к возникновению высокой плотности генерационно - рекомбинационных центров в области пространственного заряда р - n перехода.

Для исключения нежелательного влияния дефектов и примесей на электрические параметры и надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем разработаны технологические способы, которые позволяют накапливать нежелательные примеси в нерабочих участках пластин, полностью ликвидировать (или значительно уменьшить плотность) структурных дефектов. Процесс удаления и дезактивации дефектов называют геттерированием [5].

Выбор эффективного метода геттерирования является нелегкой задачей. Так как кроме высокой эффективности метод геттерирования должен органично вписываться в технологический маршрут изготовления полупроводникового прибора.

Для геттерирования дефектов необходимо обеспечить высокую подвижность точечных дефектов в полупроводниковом материале, в связи с чем любой метод геттерирования включает термообработку, температура и длительность которой должны быть достаточны для диффузии примесей из областей формирования приборов в область геттера.

Выделяют пять основных механизмов взаимодействия точечных дефектов, за счет которых происходит геттерирование [6]:

- 1) взаимодействие точечных дефектов с полем упругих напряжений;
- 2) электрическое взаимодействие точечных дефектов между собой;
- 3) поглощение примесных точечных дефектов жидкой или жидкоподобной фазой;
- 4) выделение собственных и примесных дефектов в вакуум или газовую фазу;
- 5) адсорбция дефектов на развитой поверхности твердого тела.

Так как геттерирование дефектов обычно связано с несколькими механизмами [6], то классификацию методов геттерирования целесообразно провести не по механизмам, а по технологии его осуществления. Таким образом, существующие методы геттерирования осуществляются посредством:

- 1) слоя полупроводникового материала с нарушенной кристаллической структурой;
- 2) наносимого геттерирующего слоя;
- 3) термообработки в специальной среде.

Анализируя конкретные методы геттерирования, необходимо в первую очередь различать геттерирование быстродиффундирующих примесей, дефектов упаковки и их зародышей [7]. Рассмотрим достоинства и недостатки основных методов геттерирования.

Геттерирование с помощью нарушенного слоя основано на том, что области нарушений кристаллической структуры являются стоком для точечных дефектов-вакансий и атомов быстродиффундирующих примесей металлов. Нарушенный слой на оборотной стороне пластины может быть создан шлифовкой [6, 9]. Основной трудностью данного метода геттерирования является обеспечение воспроизводимости величины и глубины введенных нарушений с целью исключения возможности распространения дислокаций от обратной стороны пластины к рабочей при высокотемпературных операциях. Создание геттера с помощью шлифовки обратной стороны пластины было опробовано в производстве высоковольтных варикапов [10]. Чтобы избежать попадания загрязнений на рабочую сторону пластины, ее защищали слоем лака ХВ-784. Шлифовку пластин проводили на шлифовальном станке В1М3.105.000. Шлифовка проводилась абразивом на основе двуокиси алюминия с размером частиц 2-15 мкм. С помощью шлифовки на нерабочей стороне пластины формировался нарушенный слой толщиной примерно 10 мкм, который и использовался для геттерирования. После стравливания защитного слоя лака на рабочей стороне пластин и стандартной химической обработки пластины были переданы на загонку бора. В процессе загонки бора атомы нежелательных примесей (например, Ni, Fe, Cu, Na) мигрируя по кристаллу, осаждаются на дислокациях, которые образуются в области нарушенного слоя. При этом происходит очистка активных областей варикапов от посторонних примесей, что предотвращает образование в них окислительных дефектов упаковки и других структурных дефектов. Металлографические исследования показали отсутствие окислительных дефектов упаковки в активных областях кремниевых структур после загонки бора. На рис. 2 [10] приведены вольт - амперные характеристики (ВАХ) диодных структур, изготовленных по базовой технологии (без использования геттерирования) и по предложенной технологии (с использованием геттерирования). Применение геттерирования шлифовкой обратной стороны пластины дало возможность значительно уменьшить уровень обратных токов варикапов.

Для создания нарушенного слоя используется лазерное излучение [6]. Сфокусированный луч лазера сканирует по нерабочей поверхности пластины, образуя лунки с измененной морфологией поверхности. В работе [11] проведено исследование влияния лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных слоев кремния. Геттерирующий слой создавали с нерабочей стороны пластины при обработке ее непрерывным лазерным излучением. Режимом геттерирования, обеспечивающим минимальную плотность дефектов упаковки и дислокаций в эпитаксиальной пленке, выращенной на геттерированных подложках, является следующий режим: шаг сканирования $H = 250$ мкм, плотность энергии излучения $E_{m0} = 5,5 \cdot 10^3$ Вт/см², скорость сканирования $v = 60$ см/с. Использование такого режима перед первым окислением при $T = 1423$ К (причем, как было установлено в работе, для эффективного геттерирования температура первого окисления должна быть выше последующих длительных высокотемпературных процессов) в течение 30 мин позволяет снизить плотность дефектов упаковки в $4,4 \cdot 10^2$ раза и дислокаций в $2,2 \cdot 10^2$ раза, плотность которых на негеттерированных пластинах составляла $1,1 \cdot 10^3$ и $1,3 \cdot 10^3$ соответственно.

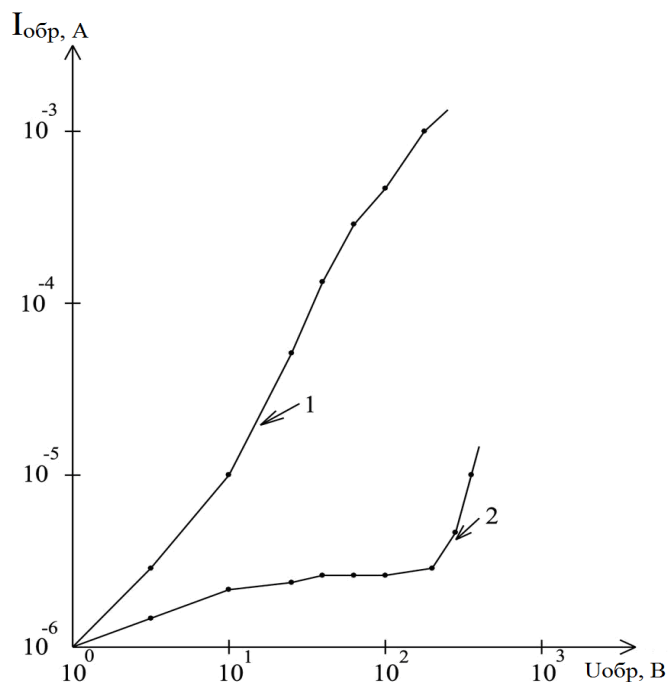


Рис. 2. Вольт - амперные характеристики варикапных структур:
1 – варикапная структура, изготовленная по базовой технологии;
2 – варикапная структура, изготовленная по предложенной технологии

Одним из способов создания механических повреждений кристаллической структуры с обратной стороны является ударно-акустическая обработка [9]. Отсутствие дефектов упаковки после проведения термического окисления пластин, обработанных данным способом перед окислением, указывает на то, что повреждения, создаваемые на обратной стороне пластины при такой обработке, являются эффективным геттером зародышей ОДУ и быстро диффундирующих примесей. На специально созданной установке гидроабразивного геттерирования проведены эксперименты по оценке эффективности этого метода [12]. Показано, что основными типами дефектов, ответственными за эффект геттерирования при последующих высокотемпературных обработках и возникающими при отжиге на центрах деформации, созданными при гидроабразивном воздействии, являются дислокационные розетки вдавливания и дислокационные петли. Плотность дислокационных розеток вдавливания и дислокационных петель возрастала с увеличением давления в жидкой струе, являющейся носителем абразивных частиц. Суммарная поверхностная плотность дефектов возрастала с $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ (при $P = 2 \text{ атм}$) до $2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ (при $P = 3 \text{ атм}$) и $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ (при $P = 4 \text{ атм}$). Эффективность этого метода геттерирования продемонстрирована тем, что микродефекты, создающие эффект «матовости» на рабочей поверхности пластины, исчезают на той части пластины, где на обратной стороне пластины присутствовал внешний механический гидроабразивный геттер.

Одним из способов создания геттера с обратной стороны пластины за счет механических повреждений кристаллической структуры является ультразвуковой удар, так называемая методика ISS [13]. На обратную сторону пластины, которая устанавливается в звукопроводе, засыпается большое количество (1000 шт.) вольфрамовых шариков, имеющих диаметр около 300 мкм. Звукопровод соединяется с диффузором громкоговорителя, имеющего мощность 100 Вт. На громкоговоритель подаются прямоугольные периодические импульсы с частотой, совпадающей с частотой прыжков отдельного шарика (1380 Гц). Изменением мощности, числа и размера импульсов, времени обработки можно управлять степенью повреждения обратной поверхности пластин. Исследования показали [13], что подобная обработка приводит к образованию двух основных видов повреждений: мелких прямолинейных канавок и конусообразных углублений с расходящимися в стороны трещинками. Канавки сливаются в кластеры, типичная площадь которых 10-15 мкм², глубина 0,2-0,4 мкм. Конусообразные углубления распространяются в кристалл кремния на глубину 10-20 мкм. Применение методики ISS позволило значительно увеличить время жизни носителей заряда в эпитаксиальных пленках, используемых в производстве мощных полупроводниковых приборов и больших интегральных схем [13].

Для геттерирования структурных дефектов используют метод получения геттерирующего слоя с помощью диффузионного легирования. Такой слой формируется путем диффузии бора или фосфора в обратную сторону пластины [9]. При этом рабочая сторона пластины защищается диэлектрической пленкой. Диффузию фосфора в обратную сторону пластины проводят при 1073-1473 К [9]. Образовавшийся диффузионный слой, характеризуется высоким градиентом концентрации (около 10^{25} см⁻⁴), что служит причиной генерации густой сетки дислокаций несоответствия.

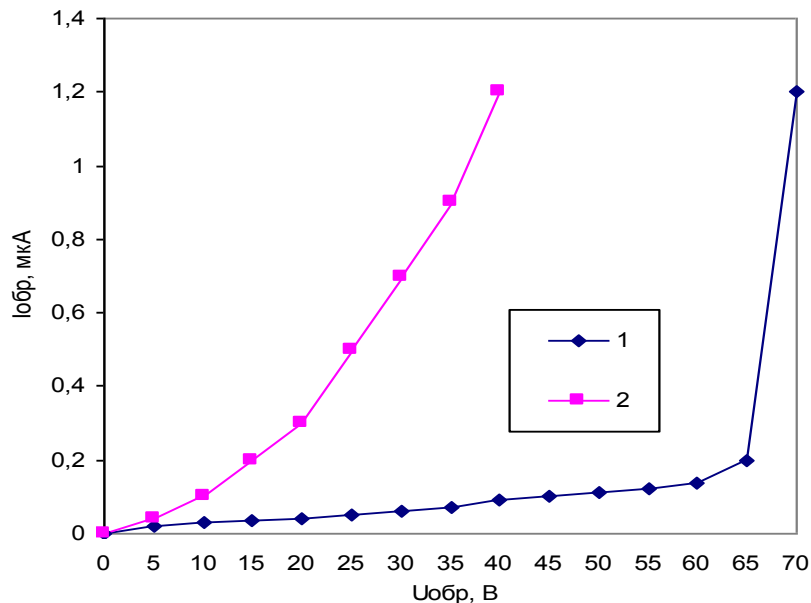


Рис. 3. Вольт - амперные характеристики диодных структур:
1 – диодная структура, изготовленная по предложенной технологии;
2 – диодная структура, изготовленная по базовой технологии

С целью предотвращения образования ОДУ в исследуемых диодных структурах в процессе проведения разгонки бора, являющейся самой высокотемпературной технологической операцией, было опробовано геттерирование с помощью проведения перед разгонкой бора дополнительной загонки бора в нерабочую сторону пластин при температуре 1273К из источника В₂О₃ в течение 60 минут в вакууме [14]. Для защиты рабочей стороны пластины на нее наносился слой пиролитического SiO₂, толщиной 0,25 мкм. После окончания процесса геттерирования было проведено одновременное травление защитного слоя SiO₂ с рабочей стороны пластин и боросиликатного стекла с нерабочей стороны пластин в растворе плавиковой кислоты (HF:H₂O=1:10). Проведенные металлографические исследования показали отсутствие ОДУ в кремниевых диодных структурах. На сформированных диодных структурах была проведена 100% разбраковка диодов по уровню обратных токов. Критерий годности: I_{обр} ≤ 1 мкА при обратном напряжении 40 В. На рис. 3 [14] представлены обратные ветви вольт-амперных характеристик диодных структур: изготовленной по базовой технологи (без использования геттерирования, кривая 2) и по предложенной технологии (с использованием геттерирования, кривая 1). Использование диффузионного геттерирования дало возможность значительно уменьшить уровень обратных токов диодных структур.

С целью геттерирования используют также нарушенные слои, созданные ионной имплантацией [6]. Относительная эффективность геттерирования зависит от имплантируемого иона и уменьшается в ряду Ag, O₂, P, Si, As, В. Существенное повышение процента выхода и электрических характеристик интегральных схем достигнуто с помощью предварительной ионной имплантации в области кремниевых подложек, не предназначенных для формирования элементов интегральных схем [13].

Оценивая методы геттерирования нарушенным слоем можно отметить следующее. Разные варианты создания нарушенного слоя абразивной обработкой высокопродуктивны, сравнительно дешевые, но не обеспечивают достаточной однородности и воспроизводимости параметров области геттера, для них характерна повышенная вероятность механического разрушения пластин [9]. Применение ударно-акустической обработки позволяет повысить воспроизводимость параметров нарушенного слоя, однако ей свойственна опасность разрушения пластин и низкая производительность. Диффузионное легирование обеспечивает воспроизводимость и однородность параметров нарушенного слоя, высокую эффективность за счет сетки дислокаций несоответствия и высоколегированного диффузионного слоя. Данный метод производительный, осуществляется на стандартном, традиционном

для технологии полупроводниковых приборов оборудовании, однако он не всегда совместим с другими технологическими операциями. Более удобная в этом случае ионная имплантация, однако в ряде случаев она малоэффективна, так как глубина нарушенного слоя, как правило не превышает 1 мкм, а сами нарушения легко отжигаются в процессах следующих высокотемпературных технологических операций.

Для геттерирования быстродиффундирующих примесей могут быть использованы расплавы, образующиеся на поверхности пластин кремния при диффузии кобальта, цинка, галлия, никеля [5]. Геттерирование быстродиффундирующих примесей можно осуществить с помощью нанесения на поверхность кремния пленок разных стекол: фосфоро-, боро-, свинцовосиликатных [5, 9], а также халькогенидных [15]. Геттерирование нежелательных примесей обусловлено их повышенной растворимостью в слое стекла, которое связано с кулоновским взаимодействием немостикового кислорода стекла с ионом примеси.

Для геттерирования нежелательных примесей предлагается использовать слой пористого кремния с обратной стороны пластины, который создают с помощью электрохимии [6].

Геттерующим действием обладают также нанесенные на поверхность слои с температурным коэффициентом расширения отличающимся от температурного коэффициента расширения подложки. В качестве такого слоя может быть использован нитрид кремния (Si_3N_4) [6]. Наиболее эффективно применение Si_3N_4 в сочетании с другими методами геттерирования [9]: например, нанесение Si_3N_4 на механически нарушенный слой с обратной стороны пластины для геттерирования дефектов в процессе эпитаксии кремния при пониженном давлении. Слой Si_3N_4 в этом случае выполняет две функции: создает дополнительные напряжения в механически нарушенном слое и защищает слой от быстрого травления при предэпитаксиальном хлорном травлении.

Геттерирование с помощью наносимых слоев, например, металлических или слоев примесно-силикатных стекол используется в основном для очистки пластин от быстродиффундирующих примесей [5] и неэффективно для геттерирования ОДУ. Геттерирование слоем менее эффективно для подавления зародышей ОДУ, чем, например, геттерирование диффузионными слоями [7]. Поэтому применять данный метод геттерирования рекомендуется для относительно чистых пластин кремния или вместе с другими методами геттерирования. Применение для геттерирования слоев поликристаллического кремния позволяет осуществлять глубокую очистку объема пластины от примесей металлов и значительно уменьшить плотность ОДУ. Однако использование этого метода связано с трудностями управления степенью пористости слоя. Кроме того, при окислении возможно коробление пластины.

Известно [6], что отжиг кремниевых пластин перед окислением влияет на генерацию ОДУ. Так отжиг при температуре 1073-1473К в среде аргона перед первым окислением заметно уменьшал плотность ОДУ во всех пластинах, что связано с рассасыванием ростовых дефектов в пластинах. При послеокислительном высокотемпературном отжиге происходит сокращения ОДУ, находящихся вблизи поверхности, и образование приповерхностной области, свободной от ОДУ [6].

Среди методов геттерирования, использующих отжиг пластин в газовой среде, важное место занимают низкотемпературные методы. В работе [16] было опробовано геттерирование посредством проведения отжига диодных структур, изготовленных по эпитаксиально-планарной технологии, в среде аргона после разгонки бора. На рис. 4 [16] приведены обратные ветви ВАХ диодной структуры, измеренной до проведения отжига (кривая 2) и после отжига в аргоне при $T=1023\text{K}$ в течение 30 мин. (кривая 1). На рис. 5 [16] приведены гистограммы распределения диодных структур по уровням обратных токов [16] при обратном напряжении $U_{обр}=35\text{ В}$, прикладываемом к структурам.

Полученные результаты применения дополнительного отжига диодных структур в среде аргона [16] указывают на существенное снижение уровня обратных токов диодов. Авторы работы объясняют это уменьшением плотности поверхностных состояний на границе раздела защитный слой окисла SiO_2 – кремний за счет очистки объема окисла и границы раздела от примесей типа К, Na в процессе отжига.

Одним из распространенных способов геттерирования в производстве полупроводниковых приборов является отжиг пластин в хлорсодержащей газовой среде [9]. Изучение механизма геттерирования при отжиге в хлорсодержащей среде показало, что улучшение параметров кремния и изготавливаемых из него приборов, связано с нейтрализацией нежелательного влияния примесей металлов, которые или удаляются с поверхности кремниевых пластин в виде летучих соединений, или превращаются в нейтральные комплексы. Окисление с добавками хлористого углерода способно геттерировать не только металлические примеси, но и ОДУ.

Для очистки приповерхностной области кремниевых пластин от нежелательных примесей часто используют метод внутреннего геттерирования [9]. Этот метод основан на использовании кислорода, обычно присутствующего в кремнии. Критическим параметром при внутреннем геттерировании является локальная концентрация атомов кислорода. При концентрациях кислорода выше критической начинается его выделение на внутренней части пластины в виде преципитатов состава SiO_x , вокруг которых существуют механические напряжения, что приводит к образованию дислокаций и других дефектов,

которые являются центрами геттерирования. Для создания таких преципитатов обычно используют высокотемпературные отжиги кремниевых пластин с концентрацией кислорода выше критической.

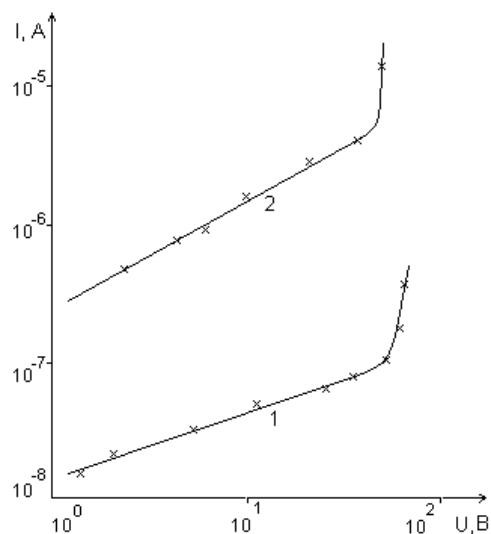


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ диодной структуры

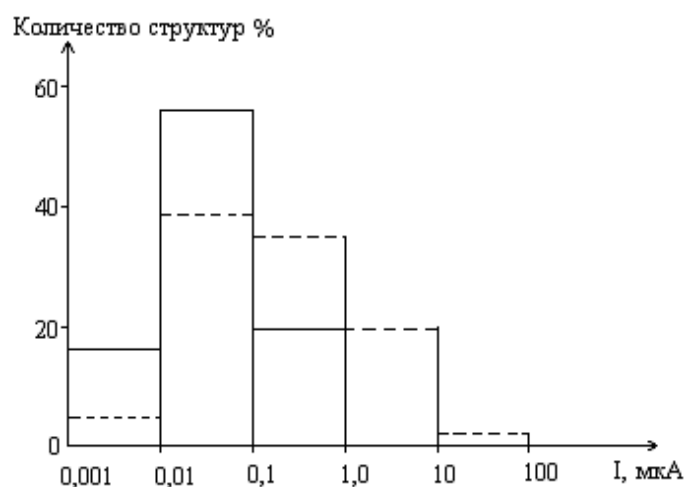


Рис. 5. Гистограмма распределения диодных структур по обратному току:

---- до отжига;

— после отжига в среде аргона

Давая оценку методам данной группы, следует отметить следующее. Преимуществом методов является их простота, отсутствие необходимости в специальном оборудовании. К недостаткам "хлорного" геттерирования можно отнести его токсичность и коррозию оборудования при использовании данного метода. "Внутреннее" геттерирование позволяет получить высокую емкость геттера, работающего в течение всего процесса изготовления прибора. Основным ограничением этого метода является значительная длительность процесса. Одной из проблем внутреннего геттерирования остается получение необходимого уровня и минимального разброса концентрации кислорода как по площади пластины, так и в массе обрабатываемых пластин. Другой проблемой является воспроизводимое и управляемое получение свободной от дефектов поверхностной зоны.

Эффективными являются методы геттерирования, в которых геттерирующие области расположены на рабочей (планарной) стороне пластины. Такие области могут находиться как в нерабочих участках планарной стороны пластин, например, в скрайберных дорожках, так и в непосредственной близости от активных областей структур приборов [6]. Применение этих методов позволяет уменьшить механические напряжения в структурах и сократить время геттерирования по сравнению с методами, в которых область геттера расположена на обратной (непланарной) стороне пластины. Геттерирование посредством проведения дополнительной загонки бора ($T = 1298\text{K}$, время загонки 20 минут) в рабочую сторону пластины перед химическим осаждением никеля было применено для повышения выхода годных диодов в производстве варикапа с омическим контактом на основе никеля [8].

На рис. 6 [8] представлены обратные ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодных структур, изготовленных на частях одной пластины. Видно, что после термообработки пластин, проводимой после химического осаждения никеля, обратная ветвь ВАХ диодной структуры, изготовленной с использованием дополнительной загонки бора, практически не изменилась, а у структуры, изготовленной без дополнительной загонки бора, произошло резкое "смягчение" ВАХ.

С целью корректного обоснования механизма воздействия дополнительной загонки бора на обратные токи диодных структур обе половинки пластины подвергались селективному травлению в реактиве Сиртла. На рис.7 [8] приведены микрофотографии поверхности исследуемых структур после травления, которые показывают, что в процессе проведения дополнительной загонки бора происходит геттерирование ОДУ, обеспечивающее значительное снижение плотности ОДУ в активных областях диодов и, как следствие, снижение уровня их обратных токов.

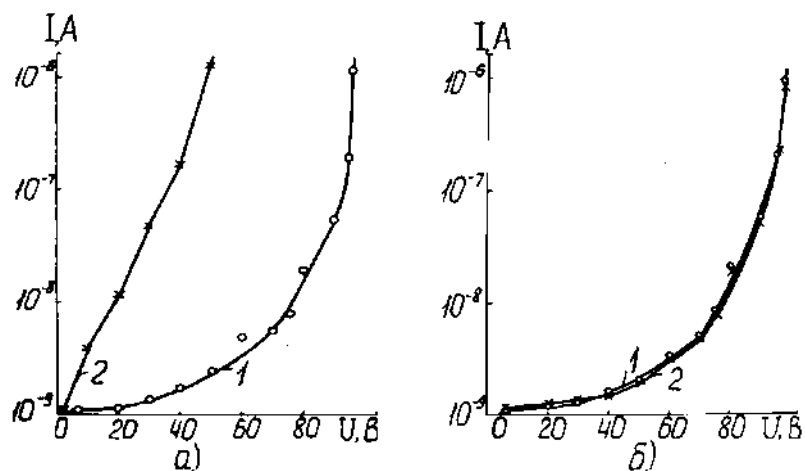
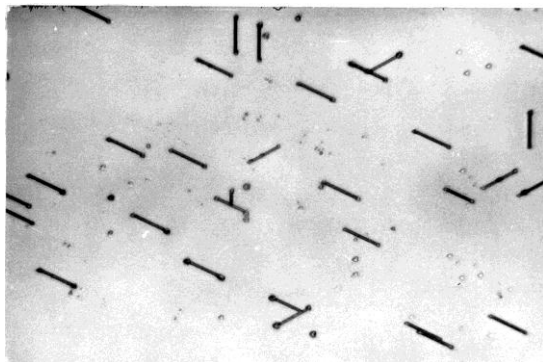
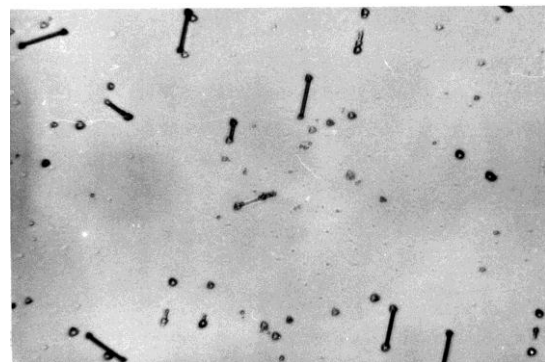


Рис. 6. Обратные ветви ВАХ диодных структур после химического осаждения никеля (1) и последующей термообработки (2): а) без использования геттерирования; б) с использованием геттерирования



а)



б)

Рис. 7. Микрофотографии структур диодов после селективного травления (увеличение $535\times$):
а - структура диода, изготовленного без дополнительной загонки бора;
б - структура диода, изготовленного с дополнительной загонкой бора при $T=1298\text{K}$.

Выводы

Таким образом, проведенный обзор и анализ влияния структурных дефектов и примесей в кремнии на электрические характеристики р-п структур и применяемых методов ликвидации дефектов свидетельствует о необходимости использования методов геттерирования в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. Применение принципов геттерирования структурных дефектов в кремнии в серийном производстве дает возможность существенно улучшить функциональные характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем и повысить их надежность.

Список использованной литературы

1. Шульпина И. Л. Исследование дефектов в многослойных эпитаксиальных силовых приборах на основе кремния методами рентгеновской топографии / И. Л. Шульпина, В. А. Козлов // Материалы электронной техники. - 2013. - № 1. - С. 28-34.
2. Мозжерин А.В. Оценка критического радиуса дислокационных петель в кремнии и германии с учетом энергии дефекта упаковки / А.В. Мозжерин // Фундаментальные исследования. - 2012. - № 11 (часть 3). - С. 700-704.
3. Соболев Н.А. Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией / Н.А. Соболев // Физика и техника полупроводников. - 2010. - Том 44. - Вып. 1.- С. 3-25.

4. Смутьский А.С. Бездислокационный кремний и создание современных полупроводниковых приборов / А.С. Смутьский // *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.* - 1983. - Вып. 12(668). – С. 12-43.
5. Верховский Е.И. Методы геттерирования примесей в кремнии. ч. I / Е.И. Верховский // *Обзоры по электронной технике.* – М: ЦНИИ «Электроника», 1981. – 48 с. (Сер. 2. Полупроводниковые приборы: Вып. 8).
6. Немцев Г.З. Геттерирование точечных дефектов в производстве полупроводниковых приборов / Г.З. Немцев, А.И. Пекарев, Ю.Д. Чистяков, А.Н. Бурмистров // *Зарубежная электронная техника.* – 1981. – Вып. 311(245). – С. 3-63.
7. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви; пер. с англ. В.В. Высоцкой, П.П. Поздеева, Т.М. Ткачевой, О.П. Федоровой. - М.: Мир, 1984.- 472 с.
8. Литвиненко В.Н. Исследование влияния окислительных дефектов упаковки на параметры кремниевых р-п структур с никелевым контактом / В.Н.Литвиненко, Н.В. Богач, А.В. Калашников, И.Е.Черненко // *Вестник ХГТУ.* - № 2(4), г. Херсон, 1998. – С.167-169.
9. Лабунов В.А. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники / В.А. Лабунов, И.Л. Баранов, В.П. Бондаренко, А.М. Дорофеев // *Зарубежная электронная техника*, № 11(270), 1983. – М.: ЦНИИ “Электроника”. - С. 3-66.
10. Ивершенко В.А. Оптимизация технологии изготовления высоковольтного бескорпусного варикапа / В.А. Ивершенко, В.Н. Литвиненко, Г.Г. Дощенко // *Электронный научный журнал «Биомедицинская инженерия и электроника».* - 2014. - №2. - С. 95-103.
11. Пилипенко В.А. Влияние лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных слоев кремния / В.А. Пилипенко, Д.В. Вечер, В.В. Понарядов, В.А. Горушко, В.С. Сякерский, Т.В. Петлицкая // *Вестник БГУ. Сер.1.* – 2007. - №2. - С.39-42.
12. Choi C.Y. Evaluation of mechanical damage by high resolution x-ray diffraction and minority carrier recombination lifetime in silicon wafers / C.Y. Choi, J.H. Lee, S.H. Cho, D.K. Lee, C.S. Kim // *J. Appl.Phys.* –1998. - Vol. 84.- №1. - P. 168-173.
13. Богач Н.В. Геттерирование дефектов и примесей тяжелых металлов в кремнии / Н.В. Богач, В.А. Гусев, П.Г. Литовченко // *Полупроводниковая техника и микроэлектроника.* – К., 1981. – Вып. 34. – С. 3-20.
14. Литвиненко В.Н. Улучшение обратных характеристик кремниевых диодов при использовании геттерирования дефектов / В.Н. Литвиненко, Г.Г. Дощенко, Н.А. Самойлов // *Электронный научный журнал «Биомедицинская инженерия и электроника».* - №1(8), 2015. - С. 37- 42.
15. Литвиненко В.Н. Исследование геттерирующих свойств пленок халькогенидных стекол. / В.Н. Литвиненко, Г.Г. Дощенко, Н.А. Самойлов // *Электронный научный журнал «Биомедицинская инженерия и электроника».* №3(14), 2016. – С. 22-26.
16. Литвиненко В.Н. Исследование влияния отжига в аргоне на характеристики кремниевых р-п структур / В.Н. Литвиненко, А.В. Никитин, С.В. Литвиненко, Т.В. Питомец // *Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины (ХНТУ).* - Вып. №2(9), 2004.- С.201-203.