

УДК 539.2/6:539.216.1

Д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО¹, В. А. ГОРУШКО¹, к. ф.-м. н. А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ¹,
к. ф.-м. н. В. В. ПОНАРЯДОВ², д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ³, С. В. ШВЕДОВ¹

Беларусь, г. Минск, ¹Филиал «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»; ²БГУ; ³ОАО «Интеграл»
E-mail: office@bms.by

МЕТОДЫ И МЕХАНИЗМЫ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Увеличение степени интеграции элементной базы предъявляет все более жесткие требования к уменьшению концентрации загрязняющих примесей и окислительных дефектов упаковки в исходных кремниевых пластинах с ее сохранением в технологическом цикле изготовления ИМС. Это обуславливает высокую актуальность применения геттерирования в современной технологии микроэлектроники. В статье рассмотрены существующие методы геттерирования кремниевых пластин и механизмы их протекания.

Ключевые слова: кремний, геттер, лазер, быстродиффундирующая примесь, центр геттерирования, дислокация, дефект упаковки.

Увеличение плотности размещения элементов интегральных микросхем (**ИМС**) приводит к ужесточению требований к чистоте полупроводниковых материалов, поскольку наличие дефектов кристаллической структуры и металлических загрязнений в них влияет на работоспособность элементов. Прежде всего, это относится к кремнию, который является основным материалом для изготовления ИМС. Большую роль при этом играют точечные дефекты и загрязняющие примеси, такие как медь, железо, никель, хром, натрий и др., приводящие к снижению выхода годных ИМС из-за неконтролируемого процесса дефектообразования в активных областях. Требования к чистоте пластин кремния в объеме и по поверхности постоянно ужесточаются параллельно с уменьшением критического размера элементов, достигая предела обнаружения при определении поверхностной концентрации металлов и объемной концентрации железа (см. **табл. 1**) [1]. Параметр плотности окислительных дефектов упаковки (**ОДУ**) также является критерием чистоты поверхности, и требования к его значению

достаточно жесткие. Уменьшение размеров элементов требует использования новых материалов и технологических процессов их изготовления, что приводит к расширению номенклатуры металлов и снижению критического значения их поверхностной концентрации. Так, при размере элементов 0,8 мкм критическое значение концентрации для каждого из металлов, образующих силициды (Cr, Fe, Ni, Cu), составляет $1 \cdot 10^{11}$ атом/см². При переходе к размерам менее 0,8 мкм в этот ряд добавляется Co, щелочные металлы K, Na, ионы которых являются мобильными, а также щелочноземельный элемент Ca и тяжелые металлы Pt, Ir, Ba. Критическое значение концентрации для каждого из этих элементов составляет не более $1 \cdot 10^{10}$ атом/см² [1].

Основными источниками загрязняющих примесей являются оснастка и оборудование, используемые в различных технологических процессах изготовления ИМС [2]. В принципе, загрязнение материала начинается уже в процессе выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского. Источниками примесей здесь яв-

Таблица 1
Требования к чистоте пластин кремния разного диаметра, предназначенных для изготовления динамического операционного запоминающего устройства

Характеристика	Диаметр пластины, мм					
	150	200	200	200	300	300
Минимальный размер элемента, мкм	0,8	0,35	0,18	0,13	0,09	0,09
Объемная концентрация железа, атом/см ³	$5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$
Поверхностная концентрация металлов, атом/см ²	$1 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$	$\leq 1 \cdot 10^{10}$
Плотность ОДУ, см ⁻²	$\leq 6 \cdot 10^1$	$\leq 2 \cdot 10^1$	$\leq 4,4 \cdot 10^0$	$\leq 2,8 \cdot 10^0$	$\leq 1,6 \cdot 10^0$	$\leq 1,6 \cdot 10^0$

ляются исходный поликристаллический кремний, кварцевый тигель и сама печь [3]. Однако при этом выращенные слитки считаются достаточно чистыми, поскольку концентрация примесей невелика: Fe, Cu и другие металлы содержатся в количествах менее 10^{14} см^{-3} [4].

Основными загрязняющими операциями при изготовлении подложек являются механическая резка и полировка. На это указывает распределение в пластинах металлических примесей — большая их часть локализуется в приповерхностном слое толщиной порядка нескольких микрометров [2].

Загрязнение неконтролируемыми примесями происходит также при многократных термообработках в диффузионных печах, которым пластина кремния подвергается в процессе создания ИМС [2]. При высокой температуре кварцевые реакторы «пропускают» атомы металлов, испаряющиеся с внутренней поверхности металлических частей печи (обычно Fe, Ni, Cr, Cu), которые затем диффундируют в объем пластины [4]. В установках эпитаксиального наращивания пластин потенциальным источником примесей является графитовый нагреватель, который в процессе нагревания испускает переходные металлы, например Fe, Ti.

Вероятность загрязнения кремниевых пластин металлическими примесями имеется также при очистке, отмывке, транспортировке пластин [5], ионной имплантации [6] и плазмохимической обработке [7]. В результате, концентрация металлических примесей в объеме кремниевой пластины в процессе термообработки может достигать 10^{18} см^{-3} , а в приповерхностной области она на один-два порядка выше [2, 7]. Поскольку при снижении температуры растворимость многих металлов в кремнии уменьшается, их концентрация при охлаждении пластины становится выше предела растворимости, и это вызывает их диффузию к поверхности пластины, преципитацию и образование комплексов металлов с легирующими примесями [8]. Образование преципитатов металлов отрицательно влияет на параметры как биполярных, так и МОП-приборов. Небольшие металлические преципитаты (от 5 до 20 нм) являются источниками тока утечки в биполярных транзисторах [9] и источником локализованного пробоя в тонких оксидных пленках [10]. В качестве центров гетерогенной нуклеации, необходимых для преципитации, могут выступать дефекты кристаллической структуры, такие как дислокации, дефекты упаковки (преимущественно на частичных дислокациях) и преципитаты кислорода. Дефекты упаковки, декорированные металлическими примесями, также вызывают повышение токов утечки и пробой тонкого оксида [10].

Влияние переходных металлов, таких как Fe, Ni, Cu, Cr, на выход годных и надежность ИМС при уровне технологии 0,5 мкм становится за-

метным при концентрации, например, ионов Fe порядка 10^{11} см^{-3} . К тому же, предполагается, что при приближении емкости оперативных запоминающих устройств к 1 Гб при толщине подзатворного оксида 7,5 нм граница допустимой концентрации железа снизится до уровня 10^{10} см^{-3} [4].

Значительно уменьшить количество неконтролируемых примесей в кремниевых пластинах, вносимых в процессе всего цикла изготовления ИМС, можно, принимая соответствующие меры. Это может быть уменьшение температуры в процессе периодических высокотемпературных очисток кварцевых труб в среде HCl, использование печей улучшенных конструкций, например двойных труб, экранов [11]. Химическая обработка пластин перед термообработкой в смесях H_2O_2 и HCl, HF и этанола позволяет уменьшать количество металлических загрязнений на их поверхности [12]. Кроме того, замена деталей установок ионной имплантации, плазмохимического травления, сделанных из нержавеющей стали, на изготовленные из алюминия, кремния или углерода значительно снижает общий уровень загрязнений [2].

Все это, однако, не позволяет избежать загрязнения кремниевых пластин неконтролируемыми примесями и генерации в них точечных дефектов в процессе изготовления полупроводниковых приборов. В связи с этим, в настоящее время большое значение для этих целей приобретают технологические методы — методы геттерирования [2, 13]. Они позволяют создать в пластине кремния чистую от структурных дефектов и загрязняющих металлических примесей приповерхностную область, в которой формируются активные и пассивные элементы областей ИМС. Согласно [1], геттерирование — это процесс растворения нежелательных примесей с их последующей диффузией и преципитацией в специально созданных зонах пластины — геттерах, где они не оказывают вредного влияния на работу прибора. Геттер обладает способностью захватывать и удерживать быстродиффундирующие примеси и точечные дефекты, а также создает условия, обеспечивающие их высокую подвижность [14].

При производстве современных микроэлектронных устройств проблема чистоты превращается в одну из наиболее глобальных, причем речь идет о чистоте на всех стадиях общего цикла их изготовления. Поэтому достаточно актуальным является поиск рекомендаций для правильного выбора метода геттерирования в различных случаях. Для этого в настоящей статье классифицированы существующие методы геттерирования и проведен анализ механизмов их протекания.

Существуют различные методы геттерирования, которые отличаются [15]:

- местом расположением геттера;
- геттерирующей фазой;
- способом создания геттера.

В зависимости от расположения геттера различают внутреннее геттерирование (геттер находится в объеме пластины) и внешнее (геттер может быть размещен вне пластины, на нерабочей стороне пластины или на рабочей стороне между элементами).

Для получения твердой геттерирующей фазы используют следующие методы:

- механическое введение нарушений поверхности

- абразивной обработкой;
- пескоструйной обработкой;
- ударной обработкой;

- формирование на поверхности пластины пленки

- пористого кремния;
- примесно-силикатного стекла;
- поликремния;
- термической и пиролитической пленки

SiO_2 ;

- облущение поверхности
 - ионное легирование;
 - лазерное облущение;
 - ионная имплантация инертных газов;
- диффузионное легирование;
- отжиг по заданной программе.

С помощью перечисленных методов можно создать внешний геттер. Для получения эффекта внутреннего геттерирования используется формирование кислородных преципитатов за счет кислорода, имеющегося в слитках кремния.

Геттерирование газообразной фазой используется при отжиге пластин в различных средах:

- в вакууме;
- в инертной среде;
- в хлорсодержащей среде.

Геттерирование жидкообразной фазой используется при применении

- аморфизированной жидкоподобной фазы;
- легкоплавкой эвтектики.

Среди методов с расположением геттера вне пластины широкое распространение получили способы, основанные на экстракции точечных дефектов в газовую фазу и в вакуум. В [16] установлено, что отжиг кремниевых пластин и слитков перед окислением влияет на генерацию дефектов упаковки. Проведение предварительного отжига пластин при температуре 800—1200°C в атмосфере аргона заметно снижает плотность дефектов упаковки в них, причем размер дефектов не зависит от времени отжига. В процессе такой обработки рассасываются ростовые дефекты, составляющие их атомы мигрируют к поверхности, являющейся для них стоком, и далее диффундируют в газовую среду. Таким образом, предокислительный высокотемпературный отжиг позволяет создавать в приповерхностной области слой, практически свободный от дефектов упаковки. Толщина этого слоя зависит от времени отжига (t), а инкубационный период ($t_{\text{и}}$) — от первоначальной длины поверхност-

ных дефектов упаковки и температуры отжига. При $t > t_{\text{и}}$ толщина области, свободной от данных дефектов (d), изменяется по закону $d \sim t^n$, где $n = 0,63 \pm 0,06$.

Эффективным методом геттерирования является введение в обратную сторону пластины механических повреждений, которые производятся преимущественно шлифовкой [17], пескоструйной обработкой [18], алмазной полировкой [19]. В этом случае геттерирование обуславливается повреждениями кристаллической решетки, которые способны устранять зародыши дефектов и адсорбировать примеси во время высокотемпературной обработки. Например, шлифовка обратной стороны подложки перед окислением уменьшает плотность дефектов упаковки на три порядка. Однако, с другой стороны, создание нарушенного слоя приводит к возникновению дислокаций в эпитаксиально наращиваемых слоях и геттерированию ими быстродиффундирующих примесей. Кроме того, геттерирующий слой вызывает значительный изгиб полупроводниковых пластин, а шероховатая обратная сторона захватывает примеси при химической обработке и тем самым загрязняет пластину. Следует также отметить, что механическая обработка обычно производится перед процессом изготовления полупроводниковых приборов, следовательно, во время высокотемпературных обработок происходит частичная рекристаллизация нарушенного слоя, приводящая к высвобождению захваченной им примеси [20].

Для исключения данных явлений в [21, с. 8] предложен следующий метод геттерирования. В обратную сторону пластины путем шлифовки вводятся нарушения кристаллической решетки на глубину 8—25 мкм. Затем пластины подвергают отжигу в инертной среде при температуре и длительности процесса, достаточных для геттерирования быстродиффундирующих примесей и снятия механических напряжений. После термообработки проводится быстрое охлаждение, и далее обе стороны пластины полируют до зеркальной поверхности. В результате, на стороне пластины, в которую были введены повреждения, под зеркальной поверхностью остается нарушенный слой, геттерирующий точечные дефекты при последующих технологических процессах.

Одним из современных методов геттерирования с использованием механически нарушенного слоя является гидроабразивное геттерирование [1]. Этот метод привлекателен тем, что легко встраивается в технологию химико-механической полировки пластин кремния, поскольку геттер создается на обратной стороне шлифовано-травленной пластины, а образование геттерирующих центров и собственно процесс геттерирования происходят одновременно с первым термическим окислением. Основными переменными параметрами процесса являются давление гидроабразивной струи на выходе из сопла, которое может варьироваться в пределах 200—500 кПа, а так-

же расстояние от сопла до поверхности пластины. Другие параметры процесса — угловая скорость перемещения стола с пластинами, частота осцилляций сопла, состав используемого абразива — являются постоянными. Данный метод достаточно эффективен — он позволяет на два порядка уменьшить плотность микродефектов (мелких ямок травления) и в два-три раза — дефектность подзатворного диэлектрика.

Еще один способ — предокислительное геттерирование [16, 22] — заключается в создании напряженного слоя путем нанесения оксида алюминия или нитрида кремния с последующим отжигом, способствующим диффузии к нему точечных дефектов. Эффективность геттерирования зависит от толщины напряженного слоя, времени и температуры отжига, и усиливается, если перед осаждением пленки в обратную сторону пластины с помощью диффузии фосфора ввести дислокации несоответствия. Для достижения максимальной эффективности толщина наносимого слоя нитрида кремния должна составлять 200–400 нм, а отжиг пластины должен проводиться в инертной среде в течение 1–4 ч при температуре 1000–1200°C. Дислокации несоответствия создаются путем диффузии фосфора при 1050–1150°C в течение 1–7 ч. Напряженный слой и дислокации несоответствия, сформированные в исходной пластине, геттерировать и уже имеющиеся в ней точечные дефекты, и вводимые при последующих обработках. Следует отметить, что для геттерирования примесных дефектов с помощью диффузии фосфора его концентрация не обязательно должна обеспечивать формирование дислокаций несоответствия, т. к. диффузионный слой без дислокаций несоответствия также обладает геттерирующим свойством [23], правда, меньшим, чем с дислокациями.

Геттерирование быстродиффундирующих примесей можно проводить тонким слоем пористого кремния, сформированным на обратной стороне пластины путем анодной обработки в плавиковой кислоте [24]. Данные пленки обладают эффектом геттерирования благодаря своей высокой удельной поверхности и высоким механическим напряжениям на границе с кремнием [25, 26]. Такими же свойствами обладают пленки поликристаллического кремния [27] и германия [28].

Известен метод геттерирования с использованием легированного фосфором диффузионного слоя [29], который создается на обратной стороне пластины перед процессом окисления. Было установлено, что эффект геттерирования в этом случае существует и без дислокаций несоответствия и зависит от концентрации фосфора [30]. Эффективность процесса становится значительной, если концентрация фосфора превышает 10^{20} см⁻³. При концентрации фосфора 10^{21} см⁻³, концентрация золота в объеме пластины уменьшается до 1000 раз за счет образования ионных

пар между золотом и фосфором [23]. Следует отметить, что возможно также геттерирование диффузионными слоями, легированными бором, однако эффективность при этом меньше, чем в случае легирования фосфором [27].

Геттерирующими свойствами обладают также слои кремния, нарушенные ионным легированием [31]. Эффективность таких слоев определяется типом имплантируемого иона и уменьшается в ряду O, P, Si, As, B [32]. Тип повреждений определяется видом ионов, дозой, энергией, существованием или отсутствием оксидной защитной пленки, температурой пластины во время ионной имплантации, ориентацией пластины и режимом отжига [33]. Во время отжига нарушенного слоя образуются дислокационные петли, дефекты упаковки, которые действуют как центры геттерирования. Так, нарушения кристаллической решетки, созданные ионным легированием, используют для геттерирования загрязняющих примесей из мишеней кремниевых. Для удовлетворительной работы мишени ток утечки одного диода не должен превышать $5 \cdot 10^{-14}$ А при напряжении 30 В (диоды с повышенными токами утечки дают темные пятна на видеоизображении). Основной причиной, приводящей к возникновению токов утечки, являлось образование некогерентных преципитатов загрязняющих примесей. Для геттерирования в обратную сторону пластины вводились ионы фосфора, мышьяка, аргона с энергией 50 кэВ и различными дозами с последующим отжигом в сухом азоте с добавкой O₂ в течение 30 мин. Сравнительный анализ эффекта геттерирования показал, что видеодфекты исчезают при дозах легирования фосфора — 10^{16} см⁻², мышьяка — 10^{15} см⁻² и аргона — $3 \cdot 10^{15}$ см⁻². Важной особенностью такого вида геттерирования является то, что он протекает с большой скоростью при сравнительно низких температурах. Так, пленка золота толщиной 0,15 мкм, нанесенная на обратную сторону пластины, за 16 ч отжига при температуре 500°C полностью растворяется, диффундирует через пластину толщиной 250 мкм и кристаллизуется в виде отдельных зерен на имплантированной аргоном (10^{16} см⁻², 250 кэВ) стороне пластины.

Ионное легирование также применяется для создания внутреннего геттерирующего слоя, располагающегося несколько глубже будущей приборной области (около 0,8 мкм для проектируемых в настоящее время ИМС). В таком случае стоками для быстродиффундирующих примесей являются структурные дефекты кремния, созданные в объеме подложки [34]. На эффективность внутреннего геттерирования влияют следующие факторы [35]:

- плотность малых дефектов в объеме подложки, играющих роль стоков для вредных примесей;

- наличие приповерхностного слоя, свободного от кристаллических дефектов, ухудшающих качество электронных приборов;

- сохранение геттерирующих центров в объеме пластины во всем процессе создания ИМС.

Одним из наиболее приемлемых способов создания такого геттерирующего слоя, обладающего высокой эффективностью (как стоковой области для примесных атомов), является имплантация в рабочую поверхность кремниевой пластины водорода либо гелия при комнатной температуре с последующим отжигом при температуре 800–900°C в течение от нескольких десятков минут до одного часа [36]. Такая процедура приводит к формированию слоя, содержащего газовые пузыри на глубине, отвечающей проективному пробегу. Это объясняется низкой растворимостью имплантированных атомов в кремнии, что способствует их сегрегации в небольшие газовакансионные комплексы уже на стадии имплантации. Последующий отжиг приводит к разрастанию таких комплексов и формированию пузырей. Имплантированные в кремний водород или гелий могут при отжиге покинуть область пузырей, пройти через поверхностный слой кремния и испариться с поверхности уже при температуре, намного меньшей точки плавления [37]. А это значит, что в зависимости от концентрации газа и условий отжига, можно получить слой, имеющий пустоты, фактически не содержащие газовой фазы. Подобные дефекты являются очень эффективными стоками (ловушками) для нежелательных примесей. Оборванные химические связи на внутренних стенках пустот захватывают примесные атомы, что приводит к возникновению градиента в распределении их концентрации возле слоя, содержащего пустоты. Этот градиент играет роль движущей силы, стимулирующей диффузию примесей из приборной области на большую глубину, к области пустот. Для некоторых типов примесей их концентрация может быть снижена на несколько порядков [37].

Другим подходом к созданию внутреннего геттера, хорошо совместимым с технологией изготовления ИМС, является создание преципитатов кислорода с кремнием в объеме пластины кремния, являющихся эффективными стоками для посторонних примесей, и создание бездефектной приповерхностной зоны (чистой зоны) для формирования активных структур ИМС. Чистая зона и слой объемных дефектов — это два важнейших параметра, управляющих эффективностью внутреннего геттерирования, которое было продемонстрировано еще в 1970–80-х годах [38, 39]. Общеизвестной схемой формирования такого геттера является определенная последовательность проведения термообработок пластин кремния [40]. Первая термообработка, высокотемпературная (1100–1200°C), предназначена для формирования в приповерх-

ностной области пластины зоны, обедненной кислородом (за счет его испарения). Вторая термообработка, низкотемпературная (600–800°C), предназначена для зарождения центров преципитации кислорода. На третьей стадии, высокотемпературной (более 900°C), на центрах преципитации кислорода происходит распад твердого раствора кислорода и рост оксидных преципитатов, служащих стоками для нежелательных примесей из рабочих областей пластины.

В последнее время нашел развитие метод создания преципитатов кислорода в кремнии, так называемой магической обедненной зоны, основанный на ускоренной преципитации кислорода в областях, обогащенных вакансиями (определенный вакансионный профиль создается с помощью быстрого термического отжига [1]). Отличия механизма формирования обедненной микродефектами приповерхностной области в этом случае от традиционного метода заключаются в следующем. В традиционном методе внутреннего геттерирования концентрация вакансий в объеме пластины мала и постоянна по толщине пластины, в то время как концентрация междоузельного кислорода велика в объеме пластины и убывает к поверхности. В методе формирования магической обедненной зоны ситуация другая: концентрация междоузельного кислорода постоянна по сечению пластины, а концентрация «закаленных» вакансий велика и постоянна в объеме пластины и убывает к поверхности. В традиционном способе внутреннего геттерирования могут быть использованы только те слитки кремния (или его части), в которых концентрация междоузельного кислорода находится в пределах $(7,5 - 9,0) \cdot 10^{17}$ атом/см³, когда устойчиво идет процесс преципитации, и объемная плотность преципитатов достигает 10^{11} см⁻³. При использовании второго способа концентрация кислорода, термическая предистория получения слитка и местоположение вырезаемой из него пластины не имеют значения. Кроме того, эффективность второго способа практически не зависит от термического цикла получения приборных структур. При создании внутреннего геттера этим способом формируется более глубокая, с резкой границей, обедненная приповерхностная область (50–60 мкм), пригодная, в отличие от традиционного метода, для создания структур со щелевой изоляцией.

Интересный метод геттерирования был предложен в [41]. В отличие от методов, когда нежелательные примеси хотя и удаляются из рабочих областей полупроводниковой пластины, но все же присутствуют в их окрестности, здесь используется способ, применяемый для зонной очистки слитков кремния от примесных веществ в твердом состоянии: под воздействием градиента температуры примесь выводится на торцевую поверхность слитка и затем стравливается. Косвенным подтверждением пригодности этой идеи

для геттерирования примеси в полупроводниковых пластинах является движение атомов кислорода под воздействием градиента температуры при формировании скрытых слоев SiO_2 с помощью неизотермического отжига ионнолегированных кислородом областей кремния. Моделирование такого процесса показало, что независимо от начального распределения примеси в приповерхностной области, под влиянием градиента температуры она концентрируется на поверхности пластины и может быть удалена при последующем стравливании поверхностного слоя.

Оригинальный подход для очистки объема кремниевых пластин от нежелательных примесей описан в [42]. Он основан на использовании ультразвуковой обработки пластин при комнатной температуре при частоте 0,4–1 МГц и длительности до 6,5 часов. Поскольку наиболее сильное влияние ультразвук оказывает на приповерхностную область пластины (глубиной около 100 мкм), в результате такой обработки происходит стимулированная ультразвуком миграция атомов щелочных металлов К, Na из объема к поверхности. Это позволяет после удаления поверхностного слоя значительно уменьшить концентрацию щелочных металлов в кремниевой пластине.

Следует отметить, однако, что методы, которые связаны с очисткой объема кремниевых пластин от нежелательных примесей путем их перевода в поверхностный слой с последующим его удалением, не могут быть применены на любом из этапов процесса изготовления ИМС. По этой причине они остались маловостребованными при создании ИМС, но находят широкое применение для изучения процессов управления дефектообразованием в полупроводниковом материале.

Но и методы внутреннего геттерирования имеют существенные ограничения и не всегда могут быть применены или же не всегда оказываются эффективными. Это имеет место, например, в случаях когда:

- используются монокристаллы с содержанием кислорода менее $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ или высоколегированные пластины кремния n -типа (легированные мышьяком или сурьмой), когда не происходит процесс преципитации;

- применяются низкотемпературные процессы или быстрая термическая обработка, когда слабодиффундирующие атомы междоузельного кислорода не могут преодолеть большие расстояния за время обработки;

- для создания приборов используется вся толщина пластины (силовые приборы).

В таких случаях необходимо применять внешнее геттерирование или использовать комбинацию внешнего и внутреннего геттерирования.

Среди используемых в настоящее время методов внешнего геттерирования наиболее интересным является хорошо контролируемый способ введения нарушений в обратную сторону пластины высокоэнергетическим лазерным излучением [43–46]. При этом происходит испаре-

ние кремния с образованием мелких углублений, расположенных близко друг к другу, что приводит к генерации нарушений кристаллической решетки и возникновению механических напряжений. После облучения пластины подвергают отжигу, достаточному для образования дислокаций вокруг нарушенных областей и диффузии к ним подвижных точечных дефектов и металлических примесей из объема пластины. Важной особенностью этого метода является возможность формирования геттера на различных этапах создания ИМС. Кроме того, при формировании геттера на исходных кремниевых пластинах его работоспособность может сохраняться на протяжении всего технологического цикла изготовления ИМС [47, 48].

Глубина нарушений, вызванных лазерной обработкой, при повышении плотности энергии до 7 и после 8 Дж/см² растет линейно, в интервале же 7–8 Дж/см² происходит резкий скачок, что связано с переходом от расплава кремния к его испарению. При лазерном облучении с энергией ниже этого диапазона происходит плавление поверхности и последующая ее эпитаксиальная рекристаллизация, не вызывающая генерации кристаллических дефектов. Лазерная обработка с энергией выше указанной приводит к испарению кремния, и дальнейшая рекристаллизация происходит уже с образованием поликристаллического кремния. Возникающие при этом дефекты состоят из дислокаций двух типов [45]. На периферии лазерного пятна наблюдается высокая концентрация скользящих дислокаций, которые хорошо аннигилируют при отжиге. Они аналогичны дислокациям, возникающим при механических способах нарушения кристаллической структуры пластины. Однако под областью, подвергнутой лазерному воздействию, с помощью электронной микроскопии были обнаружены микротрещины, которые отжигаются в процессе тепловой обработки, и связанные с ними ряды закрепленных дислокаций,

Таблица 2

Эффективность обработки пластин при лазерном облучении различной мощности [46]

E , Дж/см ²	Значения τ для части пластины, мкс	
	облученной	без облучения
9,9	280,3	—
	190,0	100,8
8,2	277,4	103,3
	606,7	3,2
6,5	35,0	8,6
	11,7	40,7
	94,5	211,7
5,3	7,4	9,4
	42,3	70,9
	79,6	9,4

являющихся термостабильными [46]. Порог энергии, при которой происходит образование микротрещин на кремнии ориентации [111], составляет приблизительно 15 Дж/см^2 при длительности импульса 100 нс. Термически стабильные дефекты решетки во время последующих термообработок действуют как стоки для точечных дефектов.

Концентрация дефектов в кремнии характеризуется временем жизни неосновных носителей заряда τ . В табл. 2 приведены значения τ , полученные после окисления десяти пластин, одна половина которых была обработана лазером. Из этих данных следует, что для получения эффекта геттерирования минимальная плотность энергии должна быть не менее 8 Дж/см^2 , чему

Таблица 3
Рентгеновские топограммы Si-пластин после их лазерной обработки

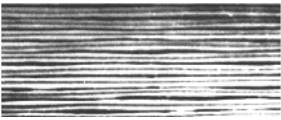
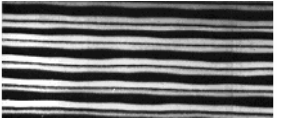
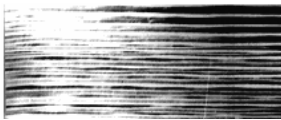
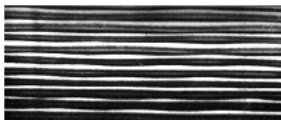
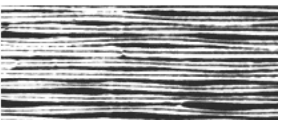
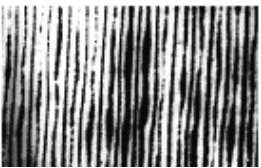
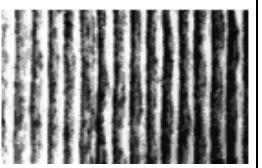
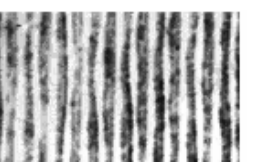
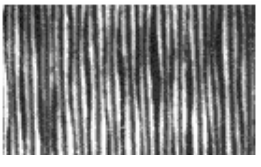
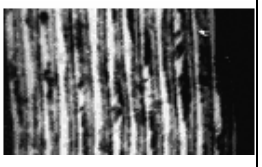
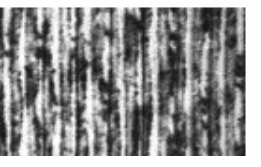
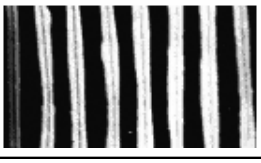
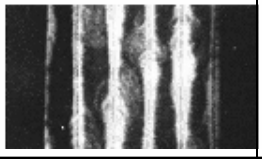
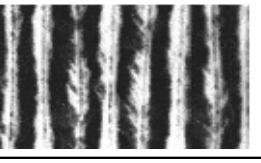
Режимы лазерной обработки	Топограммы Si-пластин, обработанных при разных режимах	
$E_{m0} = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$, $V = 60 \text{ см/с}$,	$H = 200 \text{ мкм}$ 	$H = 400 \text{ мкм}$ 
	$V = 40 \text{ см/с}$ 	$V = 60 \text{ см/с}$ 
$V = 60 \text{ см/с}$, $H = 200 \text{ мкм}$	$E_{m0} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ 	$E_{m0} = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ 

Таблица 4
Рентгеновские топограммы Si-пластин, прошедших термообработку при разной температуре после лазерного облучения с различной скоростью и шагом сканирования при плотности мощности $5,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$

Режимы лазерной обработки	Температура термообработки		
	900°C	1150°C	1220°C
$V=40 \text{ мм/с}$, $H = 200 \text{ мкм}$			
$V=60 \text{ см/с}$, $H = 200 \text{ мкм}$			
$V=60 \text{ см/с}$, $H = 400 \text{ мкм}$			

соответствует глубина нарушений $h=5$ мкм. При увеличении глубины нарушений эффективность геттерирования повышается, однако при $h=20$ мкм ($E=33,3$ Дж/см²) время жизни τ после термообработки уменьшается. Это связано со скольжением дислокаций через всю толщину пластины к ее рабочей стороне. Поэтому оптимальной для геттерирования следует считать глубину нарушений 5–10 мкм, которая достигается при $E=9–15$ Дж/см².

При этом следует отметить, что лазерное облучение наносекундной длительности приводит к выбросу кремния из области воздействия излучения, что вызывает загрязнение рабочей поверхности пластины кремниевой пылью. Поэтому для создания геттерирующей области представляет интерес лазерная обработка в режиме теплового потока (непрерывным лазерным излучением), обеспечивающая плавление кремния без его испарения.

Такой подход был реализован для создания геттерирующего слоя с нерабочей стороны кремниевой пластины при использовании АИГ:Nd⁺ лазера, работающего в непрерывном режиме. В этом случае в кремниевой пластине после такой обработки возникают напряжения растяжения, величина которых уменьшается с увеличением скорости сканирования V и уменьшением плотности мощности E_{m0} лазерного излучения (табл. 3) [49, 50].

Вне геттера Над геттером

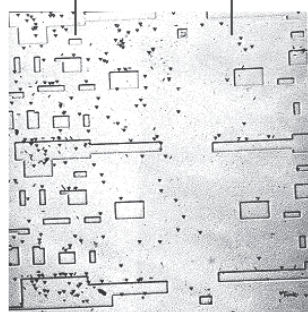


Рис. 1. Вид декорированной поверхности эпитаксиальной пленки кремния после геттерирования

В [51] на основании проведенного расчета температурных полей и экспериментальных результатов был определен требуемый, с точки зрения производительности и перекрытия напряженных областей от двух соседних линий сканирования, режим лазерной обработки для формирования геттерирующего слоя: $H = 200–240$ мкм, $V \approx 60$ см/с и $E_{m0} \approx 5,5 \cdot 10^5$ Вт/см². Последующая длительная термообработка при температуре 1100–1200°C в среде кислорода приводит к эффективному образованию в области лазерного воздействия дислокационной сетки и кислородных преципитатов, являющихся центрами геттерирования (табл. 4).

Создание такого геттерирующего слоя перед термическим окислением при температуре, превышающей температуру последующих длительных высокотемпературных процессов, позволяет в 220–440 раз снизить плотность дефектов упаковки и дислокаций (рис. 1), в 2,9 раза уменьшить коэффициент заполнения линиями скольжения в эпитаксиальных пленках, в 12 раз увеличить время жизни неосновных носителей заряда и рекомбинационное время жизни в кремнии (рис. 2), а также в 1,8 раза снизить плотность поверхностных состояний на границе раздела «кремний – термический диоксид кремния» [52, 53]. Термически выращенные на таких пластинах пленки диоксида кремния имеют улучшенную структуру, более высокую стабильность заряда и высококачественную границу раздела.

Применение геттерирования с использованием непрерывного лазерного излучения в технологии создания биполярных ИМС позволяет за счет уменьшения распространения линий скольжения, снижения плотности дислокаций в эпитаксиальной пленке и исключения возникновения проводящих шунтов в области активных и пассивных элементов устранить деградацию пробивных напряжений «коллектор – эмиттер» и токов потребления. Это обеспечивает увеличение выхода годных приборов на пластине в два раза и на 11,6% выхода годных приборов после

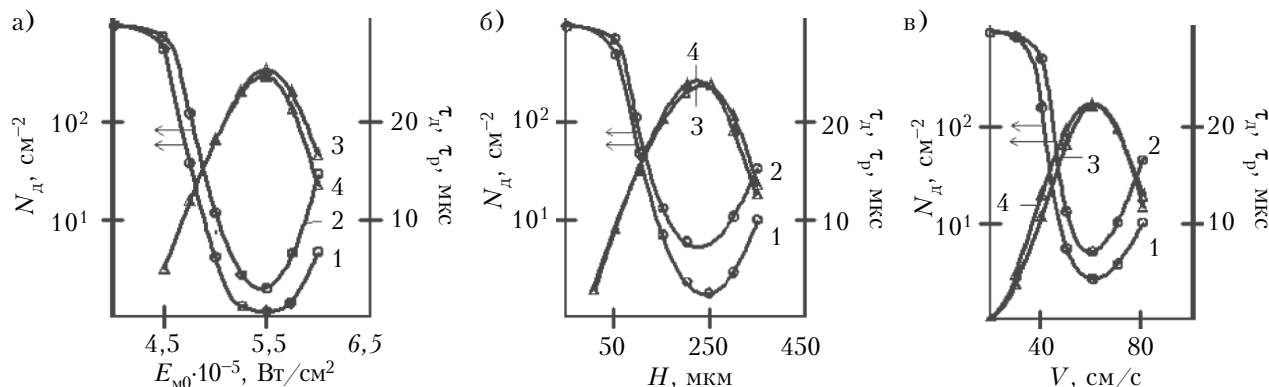


Рис. 2. Зависимости электрофизических параметров Si-пластин после геттерирования от плотности мощности непрерывного лазерного излучения (а), шага (б) и скорости (в) сканирования:

1 – плотность дефектов упаковки N_d ; 2 – плотность дислокаций; 3 – время жизни неосновных носителей заряда τ_n ; 4 – рекомбинационное время жизни τ_p

их сборки и измерения электрических параметров [54]. При создании МОП ИМС такой метод геттерирования позволяет за счет уменьшения порогового напряжения, обусловленного снижением заряда на границе раздела «Si — SiO₂», исключить его деградацию и, следовательно, увеличить (в 1,5 раза) выход годных приборов.

Для очистки рабочей стороны пластин кремния от примесных загрязнений представляет интерес режим обработки лазерным излучением наносекундной длительности (20–30 нс), когда происходит плавление поверхностного слоя и последующая его рекристаллизация без внесения каких-либо нарушений в кристаллическую решетку этого слоя [55–57]. Анализ поверхности таких пластин после термического окисления показывает, что после снятия оксидной пленки и травления поверхности в селективном травителе структурные дефекты, характерные для термического окисления необработанных пластин, отсутствуют. Это связано с тем, что при плавлении тонкого поверхностного слоя происходит его очистка от ионов металлов и углерода за счет их диффузии по жидкому расплаву к поверхности и последующего испарения, а также устранение нарушенного химико-механической полировкой

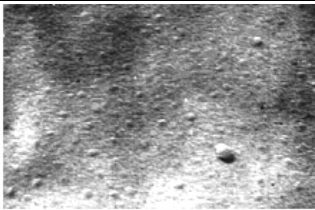
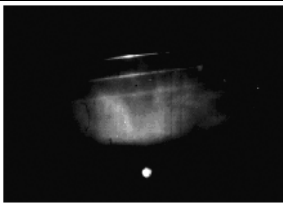
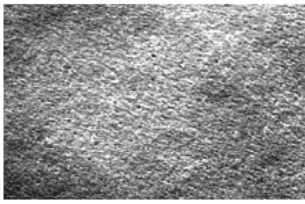
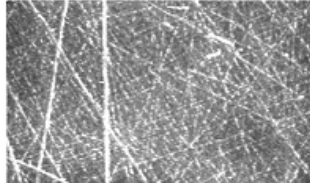
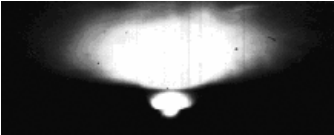
поверхностного слоя (табл. 5) [56, 57]. Это подтверждается результатами сравнительного анализа структуры диэлектрических пленок, сформированных путем термического окисления в среде сухого кислорода пластин кремния *n*-типа проводимости, до и после лазерной обработки поверхности.

Структура поверхности кремниевых пластин после обработки лазерными импульсами является более однородной, поскольку на поверхности пластины отсутствуют нарушенный слой и ионные примеси, которые приводят к повышенному порообразованию и нарушению сплошности формируемого слоя, а также создают кристаллические фазы. Об очистке поверхностного слоя от ионных загрязнений после лазерной обработки указывает снижение более чем в два раза фиксированного заряда на границе раздела «кремний — термический диоксид кремния», а также спектры быстрых поверхностных состояний, плотность которых в середине запрещенной зоны на участке с лазерной обработкой в два раза меньше, чем на необработанном [53].

Однако применяется такая очистка ограничено, поскольку она не может использоваться на различных этапах создания ИМС — ее мож-

Таблица 5

Структура поверхности кремниевых пластин, подвергнутых химико-механической (ХМП) и механической (МП) полировке, до и после лазерной обработки наносекундными импульсами

Проведенные обработки		Микрорельефы поверхностей	Картинки дифракции
ХМП	до лазерной обработки		
	после лазерной обработки		
МП	до лазерной обработки		
	после лазерной обработки		

но проводить только на исходных кремниевых пластинах, до того как на поверхности будут сформированы какие-либо функциональные слои.

Таким образом, применение лазерного излучения наносекундной длительности позволяет проводить очистку рабочей поверхности исходной пластины от ионных примесей. Для эффективной же очистки поверхностных слоев с рабочей стороны пластины от неконтролируемых примесей геттерированием наиболее перспективным является применение непрерывного лазерного излучения для управляемого формирования геттерирующих центров с нерабочей стороны пластины. Важным преимуществом такого метода является возможность его использования на различных этапах создания ИМС, а отсутствие каких-либо требований по специальной подготовке пластин указывает на его перспективность применения в технологии СБИС.

Большинство методов геттерирования было найдено эмпирическим путем и использовалось в технологии изготовления ИМС без установления механизма их протекания. Для рассмотренных выше методов геттерирования определим возможные механизмы взаимодействия примесных дефектов с точечными, являющихся для них стоками в процессе геттерирования.

Поскольку примесные дефекты вводят в окружающую их матрицу упругие напряжения, их взаимодействие с внешними напряжениями вызывает движение и скопление примесных дефектов в областях точечных дефектов.

Внешние напряжения могут иметь макро- и микронеоднородный характер. Первые, так называемые макронеоднородные внешние силы, действуют на весь слиток или пластину. В случае кремниевой пластины они возникают при нанесении на ее обратную сторону пленок Si_3N_4 и Al_2O_3 . Так, например, в пленке Si_3N_4 внутренние напряжения достигают 10^9 Н/м^2 и уравновешиваются упругими напряжениями в кремниевой пластине, которые в свою очередь вызывают направленное движение примесных дефектов.

Напряжения микронеоднородного характера в кремнии вызываются линейными, плоскими и объемными дефектами. Взаимодействие этих дефектов с примесными можно подразделить на четыре вида: вызванные разницей в размерах примесных дефектов и атомов матрицы; вызванные разницей в модулях упругости; химические; электрические. Все они приводят к неравномерному распределению и концентрированию примесных дефектов около дислокаций, границ зерен и т. д. Выделение избыточных примесных дефектов начинается на краевых, а при большом их пресыщении — на всех дислокациях, а это означает, что при малых пресыщениях зародыши на краевых дислокациях определяют всю кинетику выделения.

Высокая плотность дислокаций достигается с помощью высокотемпературной диффузии фосфора [58], ионной имплантации [59, 60], механической обработки [61 — 63], лазерного облучения [47, 48]. При этом энергия и доза ионной имплантации, а также плотность энергии лазерного излучения должны быть достаточными для их формирования.

Исследование геттерирования меди ионно-легированным слоем [61] показало, что дислокации с вектором Бюргерса $b=a/2<110>$ обладают большей способностью к геттерированию меди, чем частичные дислокации Франка с $b=a/3<111>$, что объясняется их большей энергией упругого поля. В [61] было установлено, что при дозе ионной имплантации до $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ появляются дефекты упаковки, окруженные частичной дислокацией Франка, а дефекты упаковки с дислокационными петлями превращаются в полные дислокации с $b=a/2<110>$, которые при более высокой дозе имплантации образуют дислокационную сетку. Значительное увеличение эффективности геттерирования происходит при дозе $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, когда имеет место большая плотность дислокаций. Эффективность такого геттерирования в [61] оценивалась по току утечки релаксации неравновесной МОП-емкости. Повышение токов утечки при дозах $3 \cdot 10^{15}$ и $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ по сравнению с дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ объясняется преципитацией имплантируемой примеси на дислокациях. То есть необходимым компонентом микроструктуры геттерирующего ионно-легированного слоя является наличие дислокаций с $b=a/2<110>$. Плотность этих дислокаций с высокой свободной энергией, обеспечивающая эффективное геттерирование, оценивается как $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Если примесные дефекты создают заряженные центры, т. е. являются донорами или акцепторами, то на их распределение влияет концентрация электронов или дырок. Следовательно, создавая неравномерное распределение по пластине донорной или акцепторной примеси в достаточно больших концентрациях, можно ожидать неравномерного распределения по пластине и других заряженных примесных дефектов, например быстродиффундирующих металлов. Таким образом можно геттерировать нежелательные примесные дефекты из активных областей ИМС в специально легированные неактивные области. По данному механизму происходит геттерирование золота фосфором. Золото занимает в основном замещающее положение, и вакансии взаимодействуют с атомами фосфора с образованием E -центров [64]. Растворение золота в кремнии собственной проводимости происходит при взаимодействии атомов золота со свободными вакансиями, что было экспериментально подтверждено при контроле тока утечки диодов после последовательных операций термообработки пластин [58]. Рассмотренный механизм геттери-

рования справедлив не только для золота, но и для других тяжелых металлов тоже [65]. Низкотемпературное (800°C) геттерирование фосфором эффективно в том случае, если кремний не содержит преципитатов тяжелых металлов. Если такие преципитаты имеются, то для их растворения необходим отжиг при высокой температуре (1000°C). Таким образом, диффузионная область геттерирует быстродиффундирующие примеси как путем ионного взаимодействия, так и за счет механических напряжений вблизи дислокаций.

Другим механизмом геттерирования является поглощение примесных дефектов жидкой или жидкоподобной фазой. Известно, что равновесный коэффициент распределения k_0 в кремнии для большинства примесей меньше единицы [66]. Например, для меди коэффициент распределения в кремнии составляет $4 \cdot 10^{-4}$, для золота — 10^{-15} , для железа — 10^{-15} . Если в какой-либо части пластины создать жидкую фазу, то остальную ее часть можно очистить от примесей с $k_0 < 1$. Введение в кремний большого количества нарушений кристаллической решетки искусственно имитирует жидкоподобную фазу [67], и при термической обработке эта фаза геттерирует примеси с $k_0 < 1$ из остальной, ненарушенной части кремния. Такая нарушенная жидкоподобная фаза создается на обратной стороне пластины при введении в нее нарушений кристаллической решетки механическим способом (например, шлифовкой), ионной имплантацией аргона, высокотемпературной диффузией фосфора, лазерным облучением и т. д.

Геттерирование может также иметь место за счет выделения примесных дефектов в вакуум или газовую фазу. При высокотемпературном отжиге Si-пластин в нейтральной атмосфере или в вакууме происходит испарение атомов кремния и примеси с поверхности. Повышение концентрации вакансий (понижение концентрации междоузельных атомов) на поверхности по отношению к равновесной в объеме приводит к диффузии междоузельных атомов к поверхности, сокращению дефектов упаковки и образованию в поверхностном слое бездефектной области. При испарении система «кремний — примесь» теряет летучий компонент, освобождая кремний от легкоиспаряющейся примеси. Добавление HCl и трихлорэтилена в парогазовую смесь при окислении приводит к аналогичному эффекту. При высокой температуре атомы кремния вытягиваются молекулами HCl, достигающими поверхности раздела «Si — SiO₂», в слой оксида и там окисляются [68]. При этом концентрация вакансий на поверхности повышается по сравнению с равновесной. Число выведенных атомов кремния с поверхности кремния в оксид и, соответственно, поверхностная концентрация вакансий возрастают с повышением концентрации HCl и температуры окисления [69].

Механизмом геттерирования может также являться адсорбция примесных дефектов на развинутой поверхности. В этом случае поверхность твердого тела адсорбирует их, уменьшая свою свободную энергию. Увеличивая площадь поверхности в неактивных областях пластины, можно экстрагировать туда примесные дефекты. По такому механизму происходит геттерирование примесей пористым кремнием, сформированным на обратной стороне пластины [24].

Важным механизмом геттерирования, который всегда присутствует при лазерной или быстрой термической обработке, является выход примеси, распределенной в приповерхностной области полупроводниковой пластины, на ее поверхность при наличии большого градиента температуры, перпендикулярного пластине. На основании рассмотрения одномерного потока атомов примеси, связанного с градиентом температуры, в [41] показано, что при заданном градиенте значение теплоты переноса определяет величину и направление потока примеси в неоднородном температурном поле. Это означает, что на все атомы примеси действует сила, обусловленная градиентом температуры и направленная к поверхности пластины. Так как поверхность является отражающей, вблизи нее происходит накопление примеси, которая при определенных условиях может испаряться с поверхности, тем самым очищая поверхность от примесных дефектов.

Механизмом, способствующим переносу примесных дефектов к поверхности и их последующему испарению, является жидкофазная рекристаллизация рабочей поверхности кремния, под воздействием лазерного излучения наносекундной длительности. При такой обработке в течение первых 10–20 нс лазерного импульса происходит плавление кремния, и температура в расплаве достигает значений, сильно превышающих температуру плавления облучаемого материала. В таком состоянии поверхностный слой продолжает оставаться в течение приблизительно 250 нс, что значительно превышает длительность лазерного импульса. Фронт плавления быстро распространяется в кристалл на глубину порядка 1 мкм за время, лишь ненамного превышающее длительность импульса. Затем фронт расплава движется в обратном направлении к поверхности, рекристаллизуясь по мере своего движения. При этом происходит захват расплавленным слоем примесных дефектов, обусловленных такими примесями как, например, Fe, Ni, Cr, Cu, Na, K, C, а также точечных дефектов. В результате их диффузии по жидкому расплаву и оттеснения фронтом рекристаллизации они выходят на поверхность пластины и испаряются, тем самым формируя тонкий (около 1 мкм) поверхностный слой, свободный от примесных дефектов.

Важную роль при геттерировании играет такой механизм, как захват примесных дефектов кислородными преципитатами, которые могут формироваться как с использованием специальных термообработок [39, 40], так и с применением лазерного излучения [70].

Механизм образования кислородных преципитатов требует для своей реализации наличия в кремниевых пластинах концентрации кислорода выше критической и проведения их термической обработки в три стадии. Во время первой стадии при высокой температуре ($T_1=1100-1200^\circ\text{C}$) доминирует обеднение приповерхностной зоны кислородом, процесс которого описывается уравнением диффузии примеси из ограниченного источника со связывающими границами. В результате за счет испарения кислорода из пластины формируется обедненная кислородом приповерхностная область. Во время второго отжига при низкой температуре ($T_2=600-800^\circ\text{C}$) происходит гомогенная нуклеация (зарождение центров преципитации) кислорода. Во время третьей стадии при температуре $T_3>900^\circ\text{C}$ одновременно происходит испарение кислорода с поверхности пластины и рост оксидных преципитатов. Чистая зона образуется из-за того, что те зародыши, которые выросли при температуре T_2 и имели радиус меньше критического при температуре T_3 , растворяются во время третьего отжига, а зародыши, имевшие радиус больше критического, наоборот, вырастают в преципитаты кислорода, которые и выполняют роль геттерирующих центров. При этом профиль распределения кислородных преципитатов по толщине кремниевой пластины имеет такой характер, что приповерхностная зона кремниевой пластины оказывается чистой от них, а следовательно, чистой и от примесных дефектов, которые захватываются кислородными преципитатами, лежащими ниже чистой зоны [71, 72]. В описанной модели формирования внутреннего геттера характер преципитации кислорода почти полностью определяется исходной концентрацией кислорода, инкубационным временем зарождения центров преципитации, последовательно и режимами термических обработок.

При использовании непрерывного лазерного излучения процесс геттерирования протекает за счет действия двух факторов — прогиба кремниевых пластин и возникающих при этом напряжений растяжения, которые способствуют образованию преципитатов в геттерирующем слое, обеспечивающих высокую эффективность процесса очистки рабочей стороны пластины от примесных загрязнений и точечных дефектов. Основной причиной отсутствия диффузионного потока примесей из геттерирующего слоя в объем пластины при последующих высокотемпературных обработках является их захват кислородными преципитатами, возникновению которых способствует образование жидкой фазы крем-

ния при лазерной обработке и последующая длительная высокотемпературная обработка в среде кислорода [70].

На основании рассмотренных процессов, протекающих в кремниевых пластинах при их очистке от примесных дефектов различными методами, можно выделить следующие механизмы взаимодействия точечных дефектов и загрязняющих примесей, за счет которых происходит геттерирование:

- взаимодействие примесных дефектов с полем упругих напряжений;
- электрическое взаимодействие примесных дефектов между собой;
- поглощение примесных дефектов жидкой или жидкоподобной фазой;
- выделение примесных дефектов в вакуум или газовую фазу;
- адсорбция примесных дефектов на развитой поверхности твердого тела;
- диффузия примесных дефектов к поверхности под действием температурного градиента по толщине пластины;
- перенос примесных дефектов фронтом жидкофазной рекристаллизации к облучаемой поверхности;
- поглощение примесных дефектов кислородными преципитатами.

Отдельным методам геттерирования могут соответствовать как один, так и несколько механизмов, причем, чем их больше для данного метода, тем более эффективно будет протекать процесс очистки кремния от точечных дефектов и загрязняющих примесей.

Таким образом, можно заключить, что при выборе метода геттерирования кремниевых пластин необходимо учитывать следующее:

- наличие максимально возможного количества механизмов взаимодействия точечных дефектов и загрязняющих примесей, за счет которых идет процесс геттерирования;
- возможность использования метода как на различных этапах создания, так и на протяжении всего технологического цикла изготовления ИМС;
- гибкость и простоту формирования геттерирующих центров в кремнии;
- совместимость процесса геттерирования с технологическим процессом создания ИМС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дьячков А. М., Литвинов Ю. М., Петров С. В. и др. Процессы геттерирования в технологии производства пластин кремния // Электронная промышленность. — 2003. — Вып. 3. — С. 33-40. [D'yachkov A. M., Litvinov Yu. M., Petrov S. V. et al. // Elektronnaya promyshlennost'. 2003. Iss. 3. P. 33]
2. Pearce C. H. Defect and contamination control in VLSI fabrication process // Microelectronic Materials and Processes. —

Italy, Castelvechio Pascoli. — 1986. — Kluwer Academic Publisher, 1989. — P. 293–303.

3. Meda L., Cerofolini G. F., Queirolo G. Impurities and defects in silicon single crystal // *Progress Crystal Growth and Characterization*. — 1987. — Vol. 15, N 2. — P. 97–134.

4. Скиданов В. А. Оценка концентрации железа в пластинах монокристаллического кремния *p*-типа // *Электронная промышленность*. — 2003. — Вып. 3. — С. 135–138. [Skidanov V. A. // *Elektronnaya promyshlennost'*. 2003. Iss. 3. P. 135]

5. Mouche L., Tardif F., Derrien J. Mechanism of metallic impurity deposition on silicon substrates dipped in cleaning solution // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1995. — Vol. 142, N 7. — P. 2395–2401.

6. Lowell J. Surface generation lifetime of MeV implanted Si // *Journal of the Vacuum Science and Technology*. B. — 1996. — Vol. 14, N 1. — P. 248–254.

7. Hasenack C. M., Mansano R. D. Metal contamination of silicon wafers induced by reactive ion etching plasmas and its behavior upon subsequent cleaning procedures // *Journal of the Vacuum Science and Technology*. B. — 1996. — Vol. 14, N 1. — P. 538–542.

8. Aragwal A. M., Dunham S. T. Consistent quantitative model for the spatial extent of point defect interactions in silicon // *Journal of Applied Physics*. — 1995. — Vol. 78, N 9. — P. 5313–5319.

9. Lunnon M. E., Allison D. F., Stacy W. T. Some sources of emitter-collector shorts in bipolar transistor // *Defects Silicon Proceedings Symposium*. — San Francisco. — 1983. — USA, New Jersey: Pennington, 1983. — P. 463–471.

10. Declerck G. J. Silicon oxidation // *Microelectronic Materials and Process Proceedings*. — Italy, Castelvechio Pascoli. — 1989. — NATO Advantage Study Institute. — Dordrecht, 1989. — P. 79–132.

11. Schmidt P. F. Contamination free high temperature treatment of silicon and other materials // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1983. — Vol. 130, N 1. — P. 196–199.

12. Prom J. L., Castagne J., Sarabayrouse G., Munoz-Yague A. Influence of the preoxidation cleaning on the electrical properties of the SiO₂ layers // *IEEE Proceedings*. — 1988. — N 1. — P. 20–22.

13. Domenici K., Ferrero D. C., Pedrotti K. New aspects on silicon material for VLSI // *Semiconductor Europe*. — 1984. — N 1. — P. 49–85.

14. Лабунов В. А., Баранов И. Л., Бондаренко В. П., Дорофеев А. М. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники // *Зарубежная электронная техника*. — 1983. — № 11. — С. 3–66. [Labunov V. A., Baranov I. L., Bondarenko V. P., Dorofeev A. M. // *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika*. 1983. N 11. P. 3]

15. Немцев Г. З., Пекарев А. И., Чистяков Ю. Д., Бурмистров А. Н. Геттерирование точечных дефектов в производстве полупроводниковых приборов // *Обзоры зарубежной электронной техники*. — 1981. — № 11. — С. 3–63. [Nemtsev G. Z., Pekarev A. I., Chistyakov Yu. D., Burmistrov A. N. // *Obzory zarubezhnoi elektronnoi tekhniki*. 1981. N 11. P. 3]

16. Rorgonyi G. A., Petroff P. M., Read M. H. Elimination of oxidation — induced stacking faults by preoxidation gettering of silicon wafers // *Electroch. Soc.* — 1975. — Vol. 122, N 12. — P. 1725–1732.

17. Бритвин А. А., Литвинов М. Ю., Литвинов Ю. М. и др. Прогнозирование глубины приповерхностных повреждений в материалах электронной техники при их обработке свободным абразивом // *Электронная промышленность*. — 2003. — Вып. 3. — С. 97–101. [Britvin A. A., Litvinov M. Yu., Litvinov Yu. M. i dr. // *Elektronnaya promyshlennost'*. 2003. Iss. 3. P. 97]

18. Medernach J. W., Wells W. A., Witherspoon L. An evaluation of extrinsic gettering techniques // *Semiconductor*

Silicon 1986.: Proc. of the V Intern. Symp. on Silicon Mater. Sci. and Tech. / Ed. H.R.Huff, T.Abe, B.Kolbesen. — Pennington: The Electrochemical Society, 1986. — Vol. 86, N 4. — P. 915–926.

19. Pat. 5759087 USA. Method for inducing damage for gettering to single crystal silicon wafer / H. Masumura, M. Nakano, H. Kudo (Japan). — 02.06.1998.

20. Renshi S. Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 1984. — Vol. 23, N 8, Pt.1. — P. 959–964.

21. Анищик В. М., Горушко В. А., Пилипенко В. А. Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС. — Минск: БГУ, 2001. [Anishchik V. M., Gorushko V. A., Pilipenko V. A. *Fizicheskie osnovy bystroj termoobrabotki. Getterirowanie, otzhig ionnolegirovannykh sloev, BTO v tekhnologii SBIS*. Minsk: BGU, 2001.]

22. Rorgonyi G. A., Petroff P. M., Shing T. T. Elimination of process-induced stacking faults by preoxidation gettering of silicon wafers // *J. Electroch. Soc.* — 1976. — Vol. 123, N 4. — P. 565–571.

23. Lecrosnier D., Paugam J., Richou F. et al. Influence of phosphorus-induced point defects on a gold-gettering mechanism in silicon // *J. Appl. Phys.* — 1980. — Vol. 51, N 2. — P. 1036–1040.

24. Larrabee G. B., Keenan J. A. Neutron activation analyses of epitaxial silicon // *J. Electroch. Soc.* — 1971. — Vol. 118, N 8. — P. 1353–1358.

25. Roorda S., Morin B., Soudee E., Gujrathi S. C. Backside gettering of Cu by porous Si // *Canadian Journal of Physics*, 1995, 73(1-2). — P. 45–47.

26. Орлов А. М., Соловьев А. А., Явтушенко И. О., Скворцов А. А. О перераспределении дислокаций в монокристаллах кремния вблизи концентраторов напряжений // *Физика твердого тела*. — 2007. — Т. 49, вып. 6. — С. 1039–1043.

27. Jaworska D., Shyszko W., Tarnowska E. The efficiency of gettering Au in *n*-type and *p*-type silicon // *Semiconductor Science and Technology*. — 1988. — N 3. — P. 813–815.

28. Baginski T. A., Honkowski J. R. Germanium backside gettering of gold in silicon // *Jornal of the Electrochemical Society*. — 1986. — Vol. 133, N 1. — P. 142–147.

29. Geipel H. J., Tice W. K. Critical microstructure for ion implantation gettering effects in silicon // *Applied Physics Letters*. — 1977. — Vol. 30, N 7. — P. 325–327.

30. Meek R. L., Seidel T. E., Cullis J. BPSG gettering effects in silicon wafers // *Jornal of the Electrochemical Society*. — 1975. — Vol. 122. — P. 786–788.

31. Hsieh C.-M., Mathews J. R., Seidel H. D. Ion-implantation-damage gettering effect in silicon photodiode array camera target // *Appl. Phys. Let.* — 1973. — Vol. 22, N 5. — P. 238–240.

32. Buck T. M., Pickar K. A., Poate J. M., Hsieh C.-M. Gettering rates of various fast-diffusing metal impurities at ion-damaged layers on silicon // *Appl. Phys. Let.* — 1972. — Vol. 21, N 10. — P. 485–487.

33. Prussin S. Ion implantation gettering; a fundamental approach // *Solid State Technology*. — 1981. — N 7. — P. 52–54.

34. Ueda O., Nauka K., Lagowski J. On the mechanism of intrinsic gettering by butterflytype defects in silicon // *Hat. Issues Silicon Integr. Circ. Pross. Symp.* — 1986. — Vol. 71. — P. 21–26.

35. Peibst H., Raidt H. Nucleation of oxygen precipitations and efficiency of internal gettering centres in Czochralski silicon // *Physica Status Solidi (a)*. — 1981. — Vol. 68. — P. 253–257.

36. Kamarou A. A., Kamarou A. F., Zukowski P. Gettering of metal impurities to cavities formed by hydrogen and helium

- implantation in silicon // Ion implantation and other application of ions and electrons: III Internat. Symp. — Poland, Kazimierz Dolny. — 2000. — P. 42.
37. Fichtner P. F. P., Behar M., Kaschny J. R. et al. Copper gettering at half the projected ion range induced by low-energy channeling He implantation into silicon // Appl. Phys. Lett. — 2000. — Vol. 77, N 7. — P. 972–975.
38. Tan T. Y., Gardner E. E., Tice H. K. Intrinsic gettering by oxide precipitate induced dislocations in Czochralski Si // Appl. Phys. Lett. — 1977. — Vol. 30, N 4. — P. 175–176.
39. Антонова И. В., Мисюк А., Попов В. П., Шаймеев С. С. Исследование процесса формирования кислородных преципитатов в кремнии // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31, №. 8. — С. 998–1002. [Antonova I. V., Misjuk A., Popov V. P., Shaimeev S. S. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, N 8. P. 998]
40. Takeno H., Otagawa T., Kitagawara Y. Practical computer simulation technique to predict oxygen precipitation behavior in Czochralski silicon wafers for various thermal processes // Journal of the Electrochemical Society. — 1997. — Vol. 144, N 12. — P. 4340–4245.
41. Рудаков В. И., Башмаков А. В., Овчаров В. В. Моделирование процесса удаления примесей из полупроводниковых пластин в неоднородном температурном поле // Письма в журнал технической физики. — 2004. — Т. 30, вып. 5. — С. 54–59. [Rudakov V. I., Bashmakov A. V., Ovcharov V. V. // Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2004. Vol. 30, iss. 5. P. 54]
42. Островский И. В., Надточий А. Б., Подолян А. А. Стимулированное ультразвуком низкотемпературное перераспределение примесей в кремнии // Физика и техника полупроводников. — 2002. — Т. 36, вып. 4. — С. 389–391. [Ostrovskii I. V., Nadtochii A. B., Podolyan A. A. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2002. Vol. 36, iss. 4. P. 389]
43. Пляцко С. В. Генерация объемных дефектов в некоторых полупроводниках лазерным излучением в области прозрачности кристалла // Физика и техника полупроводников. — 2000. — Т. 34, вып. 9. — С. 1046–1052. [Plyatsko S. V. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2000. Vol. 34, iss. 9. P. 1046]
44. Винценц С. В., Зотеев А. В., Плотников Г. С. О порогах возникновения неупругих деформаций в поверхностных слоях Si и GaAs при многократном импульсном лазерном облучении // Физика и техника полупроводников. — 2002. — Т. 36, вып. 8. — С. 902–906. [Vintsents S. V., Zoteev A. V., Plotnikov G. S. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2002. Vol. 36, iss. 8. P. 902]
45. Коэн М. Г., Каплан Р. А., Артурс Ю. Г. Микрообработка материалов // ТИИЭР. — 1982. — Т. 70, № 6. — С. 27–35. [Koen M. G., Kaplan R. A., Arturs Yu. G. // TIIEP. 1982. Vol. 70, N 6. P. 27]
46. Hayafuji Y., Yanada T., Aoki Y. Laser damage gettering and its application to life time improvement in silicon // J. Electroch. Soc. — 1981. — Vol. 128, N 9. — P. 1975–1982.
47. Пилипенко В. А., Горушко В. А., Стержанов Н. И. и др. Лазерное геттерирование дефектов в производстве полупроводниковых приборов и ИС // Электронная техника. Сер. 3. — 1984. — Вып. 1. — С. 107–108. [Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Sterzhanov N. I. i dr. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. 1984. Iss. 1. P. 107]
48. Пилипенко В. А., Горушко В. А., Стержанов Н. И., Сухопаров А. И. Улучшение структуры полупроводниковых слоев геттерированием с использованием лазерного излучения // Электронная техника. Серия 8. — 1983. — Вып. 5. — С. 7–11. [Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Sterzhanov N. I., Sukhoparov A. I. // Elektronnaya tekhnika. Seriya 8. 1983. Iss. 5. P. 7]
49. Пилипенко В. А., Попов Ю. П. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении интегральных микросхем // Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 5. — С. 3–11. [Pilipenko V. A., Popov Yu. P. // Elektronnaya promyshlennost'. 1988. Iss. 5. P. 3]
50. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Горушко В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки // Инженерно-физический журнал. — 2003. — Т. 76, № 4. — С. 95–98. [Pilipenko V. A., Ponomar' V. N., Gorushko V. A. // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2003. Vol. 76, N 4. P. 95]
51. Вечер Д. В., Горушко В. А., Емельянов В. А. и др. Формирование геттерирующих слоев в кремнии с применением непрерывного лазерного излучения // Доклады БГУИР. — 2006. — № 5. — С. 5–12. [Vecher D. V., Gorushko V. A., Emel'yanov V. A. i dr. // Doklady BGUIR. 2006. N 5. P. 5]
52. Пилипенко В. А., Вечер Д. В., Понарядов В. В. и др. Влияние лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных пленок кремния // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2007. — № 2. — С. 39–42. [Pilipenko V. A., Vecher D. V., Ponaryadov V. V. i dr. // Vestnik BGU. Ser. 1. 2007. N 2. P. 39]
53. Пилипенко В. А., Вечер Д. В., Понарядов В. В. и др. Влияние лазерного геттерирования кремниевых пластин на свойства границы раздела Si-SiO₂ // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2008. — № 1. — С. 23–25. [Pilipenko V. A., Vecher D. V., Ponaryadov V. V. i dr. // Vestnik BGU. Ser. 1. 2008. N 1. P. 23]
54. Пилипенко В. А., Вечер Д. В., Горушко В. А. и др. Влияние лазерного геттерирования на электрические параметры биполярных ИМС // Доклады БГУИР. — 2009. — № 8. — С. 63–66. [Pilipenko V. A., Vecher D. V., Gorushko V. A. i dr. // Doklady BGUIR. 2009. N 8. P. 63]
55. Черепнин Н. В. Физические концепции механизма лазерного отжига имплантированных полупроводниковых структур // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. — 1981. — Вып. 8. — С. 3–25. [Cherepnin N. V. // Obzory po elektronnoi tekhnike. Ser. 7. 1981. Iss. 8. P. 3]
56. Пилипенко В. А., Горушко В. А., Стержанов Н. И. и др. Лазерная обработка поверхности кремниевых пластин // Поверхность. Физика, химия, механика. — 1984. — Т. 7. — С. 113–108. [Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Sterzhanov N. I. i dr. // Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika. 1984. Vol. 7. P. 113]
57. Пилипенко В. А., Вечер Д. В., Горушко В. А. и др. Свойства поверхности кремния после лазерной обработки импульсами наносекундной длительности // ИФЖ. — 2008. — Т. 81, № 3. — С. 592–595. [Pilipenko V. A., Vecher D. V., Gorushko V. A. i dr. // IFZh. 2008. Vol. 81, N 3. P. 592.]
58. Lambert I. L., Reese M. The gettering of gold and copper from silicon // Solid State Electron. — 1968. — Vol. 11, N 11. — P. 1055–1060.
59. Shibayama H., Masaki H., Ishikawa H., Hashimoto H. Shrinkage effect of stacking-faults during HCl oxidation in steam // Appl. Phys. Lett. — 1976. — Vol. 29, N 3. — P. 136–138.
60. Hattori J. HCl oxidation conditions for stacking-fault nuclei gettering and for silicon etching // J. Appl. Phys. — 1977. — Vol. 49, N 5. — P. 2994–2999.
61. Seidel T. E., Haszko S. E., Maker D. M. Electron-beam-induced current and TEM studies of stacking faults formed by the oxidation of boron-implanted silicon // J. Appl. Phys. — 1977. — Vol. 48, N 12. — P. 5038–5043.
62. Pickar K. A., Poate J. M., Buck T. M. Gettering rates of various fast-diffusing metal impurities at ion-damaged layers on silicon // J. Appl. Phys. — 1975. — Vol. 46, N 2. — P. 600–604.

63. Yang K. H., Schwittke G. H. Minority carrier lifetime improvement in silicon through laser damage gettering // *Phys. Stat. Sol. (a)*. — 1980. — Vol. 58, N 1. — P. 127–132.

64. Sigmon T. W., Cbepregi L., Mayer L. M. Ion-implantation gettering of gold in silicon // *J. Electroch. Soc.* — 1976. — Vol. 123, N 7. — P. 1116–1121.

65. Meek R. L., Seidel T. E., Cullis A. G. Diffusion gettering of Au and Cu in silicon // *J. Electroch. Soc.* — 1975. — Vol. 122, N 6. — P. 786–792.

66. Shinura F., Tsuya H., Kawanura T. Thermally induced defect behavior and effective intrinsic gettering sink in silicon wafers // *J. Electroch. Soc.* — 1981. — Vol. 128, N 7. — P. 1579–1586.

67. Ing S. W., Morris R. E., Alt L. L. Gettering of metallic impurities from planar silicon diodes // *J. Electroch. Soc.* — 1963. — Vol. 110, N 6. — P. 533–538.

68. Antonella P., Maufred R., Eurichetta S. Denuded sone stability in a SPAD diode as a function of outdiffusion parameters // *IEEE Transaction Electron Devices*. — 1987. — Vol. 34, N 7. — P. 1486–1500.

69. А. с. СССР 1753894. Способ очистки кремниевых пластин и слитков / В.А. Харченко, А.А. Стук, Б.В. Смирнов, и др. — 1992. — Бюл. № 46. [A. s. 1753894 SSSR / Kharchenko V. A., Stuk A. A., Smirnov B. V. et al. 1992. Bull. 46.]

70. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Горушко В. А. Модель лазерного геттерирования быстродиффундирующих примесей // *Инженерно-физический журнал*. — 2005. — Т. 78, № 3. — С. 107–109. [Pilipenko V. A., Ponomar' V. N., Gorushko V. A. // *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2005. Vol. 78, N 3. P. 107]

71. Inoue N., Watanabe K., Wada K., Osaka J. Time-lag in nucleation of oxide precipitates in silicon due to high temperature preannealing // *Journal of Crystal Growth*. — 1987. — Vol. 84, N 1. — P. 21–35.

72. Воронков В. В., Мильвидский М. Г., Гринштейн П. М., и др. Гомогенное зарождение преципитатов в кремнии // *Кристаллография*. — 1989. — Т. 34, вып.1. — С. 199–207. [Voronkov V. V., Mil'vidskii M. G., Grinshtein P. M., i dr. / *Kristallografiya*. 1989. Vol. 34, iss.1. P. 199]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 08.02 2013 г.*

Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N., Ponaryadov V. V., Turtsevich A. S., Shvedov S. V. **Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits.**

Keywords: silicon, getter, laser, rapidly diffusing impurity, gettering center, dislocation, stacking fault.

Increasing the degree of integration of hardware components imposes more stringent requirements for the reduction of the concentration of contaminants and oxidation stacking faults in the original silicon wafers with its preservation in the IC manufacturing process cycle. This causes high relevance of the application of gettering in modern microelectronic technology. The existing methods of silicon wafers gettering and the mechanisms of their occurrence are considered.

Branch "Transistor" of JSC "Integral".

Пилипенко В. А., Горушко В. А., Петлицкий А. Н., Понарядов В. В., Турцевич А. С., Шведов С. В. **Методи та механізми гетерування кремнієвих структур у виробництві інтегральних мікросхем.**

Ключові слова: кремній, гетер, лазер, швидкодифундуюча домішка, центр гетерування, дислокація, дефект упаковки.

Збільшення ступеня інтеграції елементної бази перед'являє все більш жорсткі вимоги до зменшення концентрації забруднюючих домішок та окислювальних дефектів упаковки у вихідних кремнієвих пластинах за її збереження у технологічному циклі виготовлення ІМС. Це обумовлює високу актуальність застосування гетерування в сучасній технології мікроелектроніки. Розглянуто існуючі методи гетерування кремнієвих пластин та розглянуто механізми їх перебігу.

Філія «Транзистор» ВАТ «Інтеграл».

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств.— Москва: Техносфера, 2012.

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств.

Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, учёных, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных применений, использующих современные микроэлектронные устройства.

