

# Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур „кремний на изоляторе“

© К.Д. Щербачев<sup>¶</sup>, В.Т. Бублик, В.Н. Мордкович<sup>1</sup>, Д.М. Пажин<sup>1</sup>

Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,  
119049 Москва, Россия

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 13 декабря 2010 г. Принята к печати 22 декабря 2010 г.)

Исследовались особенности образования радиационных дефектов в тонком слое кремния структур „кремний на изоляторе“ (КНИ). Показаны различия в изменениях структурных и электрических свойств тонкого слоя кремния и аналогичных по электрофизическим характеристикам массивных кристаллов кремния, подвергнутых одинаковому радиационному воздействию. Установлено, что встроенный диэлектрик структуры „кремний на изоляторе“ является барьером на пути движения радиационно-индуцированных собственных межузельных атомов кремния, что приводит к увеличению дозы бомбардирующих ионов, вызывающей потерю монокристалличности слоя кремния КНИ-структуры. Показано, что гамма-облучение дозами, не влияющими на электропроводность массивных кристаллов кремния, существенно изменяет таковую в слое кремния КНИ-структур. При этом изменение электропроводности слоя кремния связано с изменением плотности поверхностных состояний на границе раздела слой кремния–встроенный диэлектрик, а не с генерацией „классических“ радиационно-индуцированных дефектов структуры кремния.

## 1. Введение

В последние годы в производстве микро- и нано-электронных приборов все шире используются структуры „кремний на изоляторе“ (КНИ), в которых тонкий слой кремния отделен от кремниевой подложки слоем скрытого диэлектрика. Формирование активных элементов дискретных транзисторов и интегральных схем в слое кремния обеспечивает повышение рабочей частоты, увеличение рабочей температуры, уменьшение энергопотребления приборов [1]. Однако первоначальный интерес к КНИ-приборам был обусловлен, прежде всего, возможностью резко повысить их устойчивость к импульсным радиационным воздействиям. Этот эффект связан с тем, что подавляющее большинство неравновесных носителей тока, которые генерируются радиацией в подложке КНИ-структуры, не в состоянии преодолеть диэлектрический барьер и повлиять на функционирование приборов.

Влияние ионизирующей радиации в интегральных схемах на основе КНИ-полевых МДП-транзисторов с индуцированным каналом к настоящему времени изучены достаточно подробно. Было показано, что основная причина изменений параметров таких приборов под воздействием облучения связана с накоплением заряда в подзатворном диэлектрике и в скрытом диэлектрическом слое КНИ-структуры, а также с ростом плотности поверхностных состояний на границах раздела слоя кремния с обоими диэлектриками [2]. В то же время гораздо меньше внимания было уделено исследованиям особенностей образования радиационных дефектов кристаллической решетки в отделенном слое кремния КНИ-структур по сравнению с массивными кристаллами

кремния. Между тем, из общих соображений очевидно, что кинетика образования радиационных дефектов в массивных кристаллах кремния и в тонком отделенном слое кремния КНИ-структуры должна быть различна.

Действительно, известно, что устойчивые радиационные дефекты в кремнии, влияющие на электрические свойства кристаллов и приборов, образуются в результате квазихимических реакций, в процессе которых вакансии, возникающие непосредственно при передаче энергии излучений атомам мишени, образуют электрически активные комплексы с атомами примесей и друг с другом [3]. Известно также, что кинетика таких реакций весьма чувствительна к наличию в кристалле упругих и электрических полей в процессе облучения [4]. В массивных кристаллах кремния, как правило, источники силовых полей отсутствуют. В то же время в КНИ-структурах заведомо присутствует серьезный источник силовых полей. Им является слой скрытого диэлектрика, в подавляющем большинстве случаев представляющий собой диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Различие коэффициентов термического расширения  $\text{Si}$  и  $\text{SiO}_2$  приводит к деформации слоя кремния. Фиксированный заряд, образующийся в  $\text{SiO}_2$  в процессе его формирования, является источником электрического поля, воздействующего на кремний. Кроме того, толщина слоя кремния в КНИ-структуре гораздо меньше диффузионной длины свободной вакансии [4], а уж тем более межузельного атома. Очевидно, что различные свойства обоих интерфейсов, один из которых представляет собой границу со скрытым диэлектриком, а другой — границу с окружающей средой, должны также влиять на поведение вакансий и собственных межузельных атомов, возникающих при облучении кремния в качестве первичных радиационных дефектов.

<sup>¶</sup> E-mail: kirill.shcherbachev@misis.ru

В связи с изложенным, цель настоящей работы состояла в изучении особенностей образования радиационных дефектов кристаллической решетки слоя кремния КНИ-структуры по сравнению с хорошо изученными массивными кристаллами кремния.

## 2. Эксперимент

Объектами исследования служили КНИ-структуры и изготовленные на их основе тестовые приборные элементы. КНИ-структуры были изготовлены методом имплантации ионов кислорода и последующего высокотемпературного отжига (SIMOX-процесс). Тонкий слой кремния характеризовался  $n$ -типом проводимости, ориентацией  $\langle 100 \rangle$  и удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Плотность дислокационных дефектов в слое кремния была меньше  $10^2 \text{ см}^{-2}$ , что свидетельствовало о его высоком структурном совершенстве. Исследуемые КНИ-структуры имели толщину слоя кремния  $0.2 \text{ мкм}$ , встроенного диэлектрика  $\text{SiO}_2$  —  $0.4 \text{ мкм}$ , кремниевой подложки —  $380 \text{ мкм}$ .

Тестовый приборный элемент изготавливался в слое кремния КНИ-структуры и представлял собой  $n^+ - n - n^+$ -кремниевый транзистор со встроенным каналом и управляющей полевой системой типа металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл (МДПДМ) и двумя дополнительными  $n^+$ -противолежащими контактами, расположенными на боковых поверхностях токопроводящего канала и служащими для измерения величины эдс Холла [5]. В качестве одной из составляющих МДПДМ-системы использовалась подложка кремния КНИ-структуры с нанесенным на ее поверхность металлическим электродом и скрытым слоем  $\text{SiO}_2$ . Другая представляла собой традиционную для МОП-транзисторов термическую пленку  $\text{SiO}_2$  на внешней поверхности слоя кремния с расположенным на пленке металлическим электродом. Толщина пленки термического  $\text{SiO}_2$  составляла величину порядка  $0.02 \text{ мкм}$ . Таким образом, толщина канала МДПДМ-элемента практически совпадала с толщиной слоя кремния. Длина и ширина элемента равнялись  $500 \text{ мкм}$ .

КНИ и контрольные пластины кремния с аналогичными электрофизическими характеристиками облучались ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией  $100 \text{ кэВ}$  дозами от  $2 \cdot 10^{13}$  до  $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Такой выбор энергии облучения позволил разместить максимум проективного пробега имплантируемых ионов вблизи середины слоя кремния КНИ-структуры и минимизировать возможные изменения электрического и упругого силовых полей встроенного диэлектрика в процессе облучения.

Помимо ионной бомбардировки использовались гамма-облучение изотопа  $\text{Co}^{60}$  с энергией квантов  $1.6 \text{ МэВ}$  и дозой до  $1 \text{ Мрад}$ , а также нейтронная бомбардировка с плотностью потока до  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Исследование влияния облучения на структурные свойства и электрические характеристики проводилось

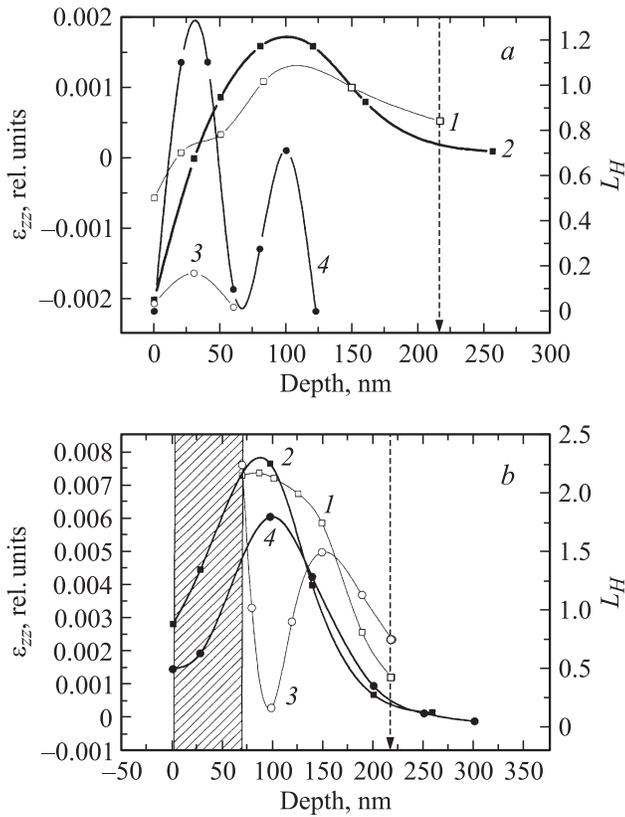
методами рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, резерфордского обратного рассеяния с каналированием, электронографии и измерения удельного электросопротивления четырехзондовым контактным методом. В случае КНИ-тестового элемента исследовалось поведение величины эдс Холла.

Для более полного понимания процессов, протекающих в нарушенном слое, необходим детальный анализ профиля распределения повреждений по глубине. Для этого по форме кривых дифракционного отражения (КДО), используя оригинальную процедуру [6], основанную на генетическом алгоритме оптимизации, было получено распределение повреждений по глубине слоя. Они описываются распределением по глубине  $z$  двух параметров: деформации в направлении нормали к поверхности образца  $\varepsilon_{zz}(z)$  и статического фактора Дебая–Валлера  $L_H(z)$ . Величина  $L_H = 8[\pi(\sin \theta_B)/\lambda]^2 \langle u^2 \rangle$  (где  $\theta_B$  — это угол Брэгга) пропорциональна среднеквадратичному смещению  $\langle u^2 \rangle$  атомов из их узлов в решетке и может рассматриваться как характеристика степени кластеризации точечных дефектов. Фурье-компонента поляризуемости в искаженном кристалле  $\chi_h^*$  может быть записана как  $\chi_h^* = \chi_h \exp(-L_H)$ . Поскольку  $0 \leq \exp(-L_H) \leq 1$ , то учет статического фактора Дебая–Валлера в расчете приводит к снижению отражающей способности искаженного кристалла, что, в свою очередь, уменьшает амплитуду дифрагированной волны, пропорциональной  $|\chi_h^*|$ . Моделирование КДО проводили в рамках динамической теории дифракции рентгеновских лучей, используя формализм, предложенный в [7].

## 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для имплантированных образцов получены профили деформации  $\varepsilon_{zz}(z)$  и статического фактора Дебая–Валлера  $L_H(z)$  по глубине слоя кремния КНИ-структуры и контрольных образцов кремния, показанные на рис. 1. Видно, что профили деформации в обоих случаях имеют вид кривой с максимумом.

Было обнаружено, что в контрольных кристаллах кремния положение максимума профиля деформации приблизительно совпадает со значением среднего проекционного пробега внедряемых ионов и практически не зависит от дозы облучения. В слое кремния КНИ-структуры, напротив, максимум профиля деформации не совпадал с величиной проективного пробега внедряемых ионов. При этом с ростом дозы облучения максимум сдвигается в сторону поверхности, а толщина рассеивающего рентгеновское излучение нарушенного слоя кремния уменьшается. Одновременно в приповерхностной области слоя кремния КНИ-структуры резко возрастает значение статического фактора Дебая–Валлера  $L_H(z)$ . Такой эффект можно объяснить появлением сильно нарушенной области, которая не дает вклада



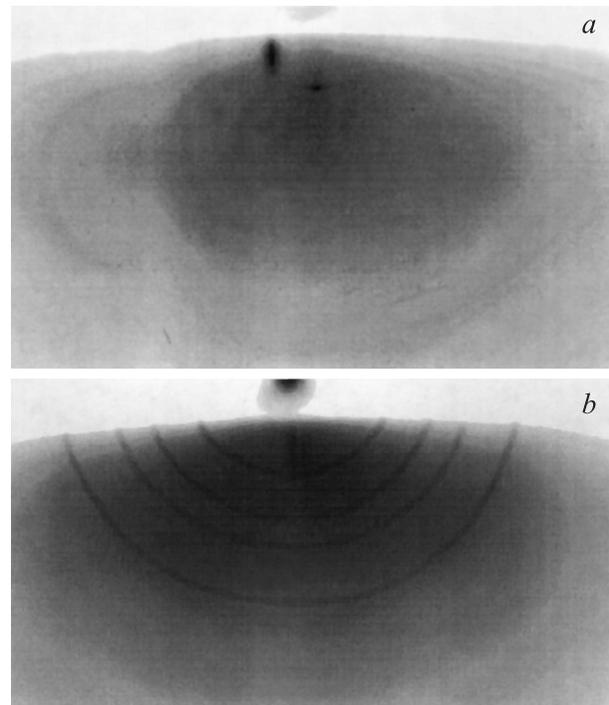
**Рис. 1.** Профили распределения деформации  $\varepsilon_{zz}(z)$  (1, 2) и статического фактора Дебая–Валлера  $L_H(z)$  (3, 4) по глубине  $z$  в тонком слое кремния КНИ-структуры (1, 3) и в контрольном массивном кристалле кремния (2, 4), облученных ионами  $\text{Ag}^+$  с дозами  $2 \cdot 10^{13}$  (a) и  $8 \cdot 10^{13}$  (b). Штриховая линия со стрелкой — местоположение границы раздела „тонкий слой кремния–встроенный диэлектрик КНИ-структуры“. Заштрихованный прямоугольник — немонокристаллическая область.

в когерентное рассеяние. Данные на рис. 1, b приведены с учетом наличия у поверхности слоя кремния КНИ-структуры сильно нарушенной области. Немонокристаллическая область на рисунке заштрихована. Предположение о наличии в приповерхностной области слоя кремния КНИ-структуры немонокристаллической области подтверждается данными эксперимента с применением метода электронографии на отражение для образцов, облученных ионами  $\text{Ag}^+$  дозой  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (рис. 2). Из рис. 2 следует, что поверхностная область облученного массивного кристалла кремния сохранила свою монокристаллическую структуру, о чем говорит присутствие линий Кикучи, тогда как тонкая (1–2 нм) приповерхностная область слоя кремния в КНИ-структуре имеет поликристаллическую структуру, которая дает соответствующий дифракционный эффект на электронограмме (рис. 2, b). Отметим, что в случае кристалла кремния появление у поверхности сильно нарушенной области наблюдается лишь при дозе облучения  $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Следовательно, в КНИ-структуре переход приповерхностного слоя в

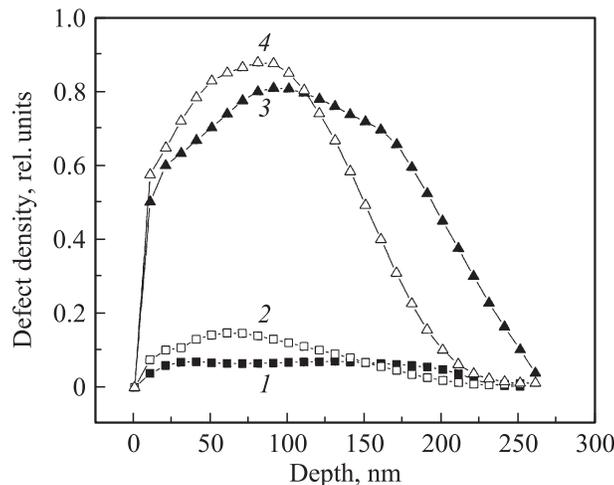
разупорядоченное состояние происходит раньше, чем в контрольном кристалле кремния. Так как из рис. 1 видно, что переход приповерхностного слоя в разупорядоченное состояние связан с дефектами, приводящими к росту отрицательной деформации, можно сделать вывод, что в приповерхностной области КНИ-структуры процесс кластеризации дефектов вакансионного типа идет активнее.

Другим заметным отличием в поведении профилей деформации исследуемых образцов является увеличение величины положительной деформации вблизи межфазной границы раздела слой кремния–встроенный диэлектрик КНИ-структуры по сравнению с областью, расположенной на том же расстоянии от поверхности (пунктирная линия со стрелкой на рис. 1). Очевидно, слой встроенного диэлектрика КНИ-структуры является барьером на пути движения радиационно-индуцированных междоузельных атомов в глубь подложки, что приводит к ускорению процесса накопления дефектов междоузельной природы вблизи границы раздела слой кремния–встроенный диэлектрик. Данный вывод подтвержден результатами эксперимента с применением метода обратного резерфордского рассеяния, результаты которого представлены на рис. 3.

Разумно предположить, что наблюдаемые различия в радиационном поведении структурных характеристик исследуемых образцов связаны с влиянием силовых полей, источником которых является встроенный диэлектрик КНИ-структуры. Известно, что слой кремния у границы раздела со встроенным диэлектриком



**Рис. 2.** Электронограммы массивного кристалла кремния (a) и слоя кремния КНИ-структуры (b), облученных ионами  $\text{Ag}^+$  дозой  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

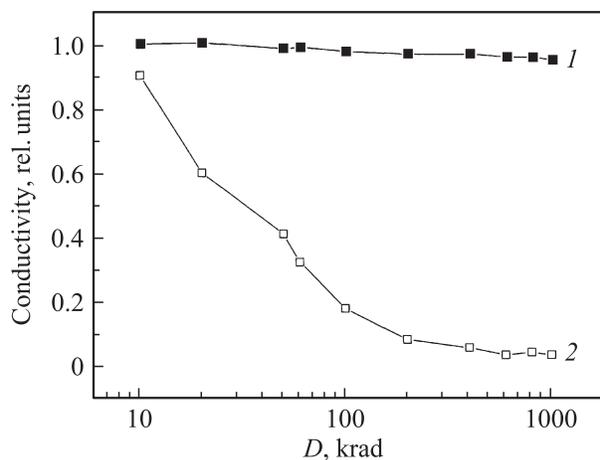


**Рис. 3.** Зависимость относительной концентрации смещенных атомов от глубины в слое кремния КНИ-структуры (кривые 1 и 3) и контрольном массивном кристалле Si (кривые 2 и 4), облученных ионами  $Ag^+$ , дозами  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (кривые 1 и 2) и  $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (кривые 3 и 4).

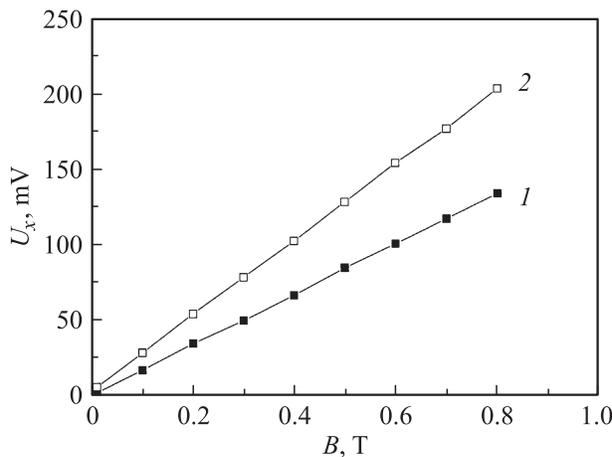
растянут [8]. Релаксация напряжений в этой области возможна путем ее обогащения межузлиями. Очевидно, что радиационно-индуцируемые межузельные атомы под воздействием упругого поля встроенного диэлектрика будут дрейфовать к нему и образовывать вблизи него устойчивые межузельные дефекты. Противоположная ситуация складывается у внешней границы раздела слоя кремния. Его приповерхностная область сжата [8], что определяет преимущественную миграцию радиационно-индуцированных вакансий. В скрытом диэлектрике КНИ-структуры в исходном состоянии (до облучения) имеется фиксированный положительный заряд, величина которого в условиях эксперимента после облучения не должна существенно измениться. Безусловно, электрическое поле повлияет на пространственное распределение заряженных точечных радиационно-индуцированных дефектов, в частности, свободные вакансии, имеющие в кремнии *n*-типа проводимости одно- или двукратно отрицательное зарядовое состояние [9], будут притягиваться к границе раздела слой кремния–встроенный диэлектрик. Положительно заряженные межузельные атомы будут стремиться диффундировать к внешней границе слоя кремния КНИ-структуры. Таким образом, очевидно, что электрическое и упругое поля встроенного диэлектрика на первичные радиационные дефекты в слое кремния КНИ-структуры действуют разнонаправленно. Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что дефектообразование в слое кремния КНИ-структуры определяется, прежде всего, влиянием упругого, а не электрического поля встроенного диэлектрика.

Очевидно, что наблюдаемые выше особенности в поведении структурных характеристик изучаемых объектов должны сказаться на различиях в изменении их

электрических свойств в результате облучения. На рис. 4 представлены дозовые зависимости электропроводности слоя кремния и массивного кристалла кремния, облученных гамма-квантами. В качестве кристалла кремния в эксперименте выступала массивная кремниевая подложка КНИ-структуры. Из рисунка видно, что воздействие гамма-излучения не повлияло на электропроводность кремниевой подложки, в то время как электропроводность слоя кремния заметно уменьшается уже при небольших дозах и стремится к насыщению с увеличением дозы облучения. Однако из представленных данных невозможно понять, что ответственно за эти изменения — уменьшение концентрации носителей или их подвижности. Для ответа на этот вопрос тестовые образцы КНИ-МДПДМ-элементов были подвергнуты облучению реакторными нейтронами. Из литературы известно [10], что облучение кристаллов кремния *n*-типа



**Рис. 4.** Дозовые зависимости относительных изменений проводимости: 1 — кремниевой подложки, 2 — слоя кремния КНИ-структуры, облученных гамма-квантами  $Co^{60}$ .



**Рис. 5.** Зависимость величины эдс Холла КНИ тестового приборного элемента от величины напряженности магнитного поля до (кривая 1) и после (кривая 2) облучения быстрыми нейтронами с плотностью потока  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ (н/см}^2\text{)}$ .

проводимости со значением удельного сопротивления ( $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) нейтронами с использованной нами плотностью потока значительно увеличивает удельное сопротивление, а следовательно — уменьшает величину тока канала и эдс Холла, главным образом за счет генерации радиационно-индуцированных дефектов структуры („классических“ дефектов). В то же время проведенный нами эксперимент показал, что облучение нейтронами вызывает небольшое увеличение величины эдс Холла КНИ-тестового элемента (рис. 5). Наблюдаемые изменения связаны с влиянием сопутствующего нейтронному облучению тормозного ионизирующего гамма-излучения, а не с влиянием нейтронов. Отсутствие уменьшения величины эдс Холла означает, что нейтронная бомбардировка не привела к ощутимой генерации в слое кремния КНИ-структуры „классических“ дефектов структуры и соответственно не вызвала в нем сколько-нибудь заметных изменений концентрации электронов. Таким образом, резонно полагать, что изменение электропроводности слоя кремния КНИ-структур связано преимущественно с уменьшением подвижности электронов из-за увеличения рассеяния носителей на созданных облучением поверхностных состояниях.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования демонстрируют очевидные различия в радиационно-индуцируемых изменениях свойств тонкого слоя кремния структуры „кремний на изоляторе“ и аналогичных по электрофизическим характеристикам массивных кристаллов кремния. Установлено, что скрытый диэлектрик является барьером, препятствующим переходу созданных радиацией собственных межузельных атомов из слоя кремния в подложку КНИ-структуры. Продемонстрировано, что кинетика нарушения монокристалличности слоя кремния КНИ-структуры существенно отличается от кинетики для монокристалла кремния. Показано, что гамма-облучение дозами, не влияющими на электропроводность массивных кристаллов кремния, существенно изменяет таковую в слое кремния КНИ-структур. В отличие от массивных кристаллов кремния изменение электропроводности слоя кремния КНИ-структуры под действием облучения связано с изменением подвижности носителей, а не их концентрации.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы создания и развития НИТУ „МИСиС“. Авторы благодарны Е.В. Раковой (Институт кристаллографии РАН) за проведение электронографических исследований и N.P. Barradas (Instituto Tecnol'ogico e Nuclear (ITN), Sacavem, Portugal) за измерения спектров обратного резерфордского рассеяния.

#### Список литературы

- [1] S. Cristoloveanu. In: *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices*. (Dordrecht–Boston–London: Kluwer Acad. Publ., 1995) ser. 3, 4, p. 109.
- [2] Г.А. Мустафаев, А.Г. Маустафаев. Нано- и микросистемная техника, **12**, 47 (2007).
- [3] *Физические процессы в облученных полупроводниках*. Под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск Наука, 1977).
- [4] N.P. Morosov, D.I. Tetelbaum. Phys. Status Solidi A, **51**, 629 (1979).
- [5] А.Г. Акимов, М.Ю. Барабаненков, В.Н. Мордкович. ПТЭ, **5**, 123 (1988).
- [6] К.Д. Щербачев, А.В. Курипятник, В.Т. Бублик. Заводская лаборатория, **6**, 23 (2003).
- [7] C.R. Wie, T.A. Tombrello, T. Vreeland. J. Appl. Phys., **59**, 3743 (1986).
- [8] J. Lee, M.-H. Nam, J.-H. Oh et al. Appl. Phys. Lett., **72**, 6, 677 (1998),
- [9] G. Watkins, J. Troxell. In: *Rad. Eff. Semicond. Conf. Ser.* (London, Bristol, 1979) N 46, p. 16.
- [10] В.Г. Горячев, Н.К. Коротаева, В.Н. Мордкович. Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, **3**, 49 (1978).

Редактор Л.В. Беляков

#### Features of radiation defects formation in a silicon layer „silicon on insulator“ structures

K.D. Shcherbachev, V.T. Bublik, V.N. Mordkovich<sup>1</sup>, D.M. Pazhin<sup>1</sup>

National University of Science and Technology MISIS, 119049 Moscow, Russia,

<sup>1</sup> Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

**Abstract** There were studies of features of formation of radiation induced defects in a thin silicon layer of a „silicon-on-insulator“ (SOI) structure. Distinctions in changes of structural and electrical properties of the thin silicon layer and the bulk Si crystals subjected to an identical radiation exposure are shown. The buried dielectric layer of a SOI structure is found to be a barrier on a trajectory of a motion of the radiation-induced interstitial atoms. Shown, that a storage of interstitial atoms in a Si layer of SOI results in magnification of a threshold dose of the bombarding ions causing the structural transition, accompanied by a loss monocrystallinity. The gamma irradiation with the doses, which are not influencing on an electrical conductivity of the bulk silicon crystal, is shown to change one essentially in the topmost Si layer of SOI. Thus change of an electrical conductivity of the silicon layer is concerned with a surface-state density change on the „silicon layer–buried dielectric“ interface, instead of a generation of the „classical“ radiation-induced defects.