

УДК 538.915  
EDN: JXGWKM

PACS: 85.60.-q

**Радиационная стойкость светоизлучающих структур с наноструктурами Ge(Si) на подложках «кремний на изоляторе»**

© Ю. А. Кабальнов\*, М. М. Иванова

ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», Нижегородская обл., г. Саров, 607188 Россия

\* E-mail: Kabalnov@niiis.nnov.ru

Статья поступила в редакцию 22.07.2025; после доработки 18.08.2025; принята к публикации 20.10.2025  
Шифр научной специальности: 2.2.2

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействия  $\gamma$ -нейтронного излучения на параметры светоизлучающих структур с массивом наноструктур Ge(Si), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках «кремний на изоляторе». Данные структуры показали высокий уровень стойкости к воздействию  $\gamma$ -нейтронного излучения, сравнимый с уровнем стойкости структур с наноструктурами Ge(Si) на подложках Si(001). Снижение интенсивности люминесценции данных структур совпадает с теоретической оценкой степени влияния радиационных дефектов. Результаты моделирования, а также экспериментальные данные показывают, что на радиационную стойкость светодиодов в наибольшей степени влияет структура массива наноструктур Ge(Si), обусловленная технологией их изготовления.*

*Ключевые слова:* светоизлучающие структуры; массивы наноструктур Ge(Si); структуры «кремний на изоляторе»; радиационная стойкость;  $\gamma$ -нейтронное излучение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-33-42

**Введение**

Структуры «кремний на изоляторе» (КНИ) наряду со структурами «кремний на сапфире» (КНС) находят широкое применение в качестве исходных материалов при создании радиационно-стойкой элементной базы микроэлектроники. Скрытый диэлектрик служит барьером, снижающим влияние радиационных дефектов подложки на активные области полупроводниковых приборов и микросхем. КНИ структуры вместе с тем обладают особыми свойствами, представляющими интерес при разработке изделий оптоэлектроники [1, 2]. Различие в показателях преломления Si и SiO<sub>2</sub> (3,5 и 1,45 соответственно) упрощает задачу создания волноводной связи между элементами с планарной геометрией, выполненными на КНИ структурах. Поле световой волны, концентрируясь между скрытым диэлектриком и

поверхностью гетероструктуры, создает максимальную напряженность в слое кремния. В гетероструктурах отмечены повышающие напряженность поля эффекты вертикальных резонансов типа Фабри-Перо, обусловленные интерференцией волн, отраженных от границ раздела поверхность-Si и Si-SiO<sub>2</sub> [3]. В перспективе КНИ структуры можно рассматривать как основу наноструктурированной интегральной оптики с приборами генерации, усиления и детектирования оптических сигналов, с волноводами и ответвителями в качестве пассивных элементов при этом сохраняя совместимость со стандартной кремниевой технологией.

Использование гетероэпитаксиальных структур с наноструктурами Ge(Si) (квантовыми точками) позволяет расширить спектральные характеристики оптических элементов на основе кремния в область ближнего и средне-

го инфракрасных диапазонов с перекрытием коммуникационного диапазона длин волн 1,3–1,55 мкм, соответствующего окну прозрачности волоконных световодов. Пространственная локализация носителей заряда по всем трем направлениям снижает чувствительность излучательных свойств структур с наноструктурами к радиационным дефектам по сравнению со структурами с меньшей локализацией, к которым относится объемный кремний и структуры с квантовыми ямами [4]. Хотя структуры с наноструктурами Ge(Si) характеризуются наличием сигналов фото- и электролюминесценции (ФЛ, ЭЛ) вплоть до комнатных температур, низкая эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда сдерживает их промышленное освоение. Одним из наиболее перспективных способов повышения интенсивности излучения структур с наноструктурами Ge(Si), как показывают результаты исследований [5], является встраивание активной излучающей среды в различные типы резонаторов. При этом возможность встраивания структур с наноструктурами Ge(Si) в структуры резонаторов обеспечивается использованием КНИ подложек. Положительный эффект роста интенсивности излучения наблюдается при применении таких резонаторов как микродиски, фотонные кристаллы, плазмонные и диэлектрические микрорезонаторы [3, 5, 6]. Добиться увеличения эффективности излучательной рекомбинации можно также с использованием оптимизированных по параметрам и конструкции волноводных структур, сформированных на подложках КНИ. При этом процесс формирования наноструктур Ge(Si) по механизму Странски-Крастанова интегрируется в маршрут изготовления волноводных структур. Использование данных способов повышения квантового выхода обуславливает реальную возможность создания эффективных источников фотонного излучения на структурах с наноструктурами Ge(Si).

С учетом перспективности использования структур КНИ для приборов интегральной оптики актуальными являются вопросы обеспечения радиационной стойкости светоизлучающих структур, выращенных на КНИ подложках. Проведенные исследования влияния ионизирующего излучения на фото- и электролюминесценцию гетероэпитаксиальных

структур с наноструктурами Ge(Si), выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках объемного кремния – Si(001) [4, 7], показали их потенциально высокую радиационную стойкость. Процессы самоформирования наноструктур Ge(Si) стимулируются накоплением упругих напряжений в эпитаксиальных слоях в условиях значительного рассогласования параметров кристаллических решеток подложки и пленки. При превышении критических значений толщины растущего слоя упругие напряжения релаксируют путем роста наноструктур по механизму Странски-Крастанова. Поле упругих напряжений скрытого слоя диэлектрика КНИ структур при стандартной для микросхем субмикронной толщине эпитаксиальной пленки кремния потенциально может оказывать влияние на процессы самоформирования наноструктур Ge(Si), повышая концентрацию структурных дефектов и снижая радиационную стойкость приборов. В работе представлены результаты исследований воздействия импульсного  $\gamma$ -нейтронного излучения на параметры светоизлучающих структур с массивом наноструктур Ge(Si), выращенных на подложках КНИ. Результаты даются в сравнении с результатами облучения подобных структур на подложках объемного кремния.

### Методика эксперимента

Образцы светодиодов выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке Balzers UMS-500. В качестве подложек использовались КНИ структуры с ориентацией (001), полученные методом сращивания (bonding). Толщина поверхностного слоя кремния составляла 200 нм, скрытого слоя диэлектрика 1 мкм. На поверхность подложки при температуре 600 °С осаждался нижний контактный слой Si  $p^+$ -типа проводимости толщиной 300 нм легированный бором с концентрацией  $\sim 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщина нижнего контактного слоя кремния относительно структур на объемном кремнии была увеличена с целью сохранения низкого сопротивления контактов. Далее выращивался слой нелегированного Si толщиной 50 нм. Массивы наноструктур Ge(Si) формировались при температуре 600 °С на поверхности подложки.

Активная область светодиодов включала до 20 слоев наностроек, разделенных кремниевыми барьерами толщиной от 15 до 20 нм, что обеспечивало их вертикальное упорядочение. Формирование островков происходило при осаждении слоя Ge толщиной 6,5–8,5 монослоев (МС) (1 МС  $\sim 0,136$  нм). Слои Si и Ge осаждались с двух электронно-лучевых испарителей со скоростями роста 0,1 нм/с и 0,02 нм/с соответственно. Поля упругих напряжений нижележащих слоев в процессе роста оказывали влияние на размеры наностроек последующих слоев. Для повышения однородности размеров островков количество Ge при осаждении снижалось для каждого последующего слоя на  $\sim 0,1$  МС. Формирование структур светодиодов завершалось осаждением слоя легированного Si толщиной 50 нм и контактного слоя Si  $n^+$ -типа проводимости толщиной 200 нм, легированного сурьмой с концентрацией  $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$ .

Одной из важных проблем в процессе эпитаксиального роста многослойных структур с наностройками на подложках КНИ является контроль температуры на поверхности пластин. Температура подложки относится к критическому параметру, определяющему структуру и свойства массива наностроек. В методе МЛЭ нагрев пластин осуществляется от источника излучения со стороны подложки. Температура также контролируется со стороны подложки. Различия температуры поверхности КНИ структур и стандартных Si(001) подложек наблюдалось при одинаковой мощности, подаваемой на нагреватель, и одинаковых показаниях термопар. Причиной служит наличие достаточно толстого ( $\sim 1$  мкм) скрытого слоя диэлектрика в исследуемых структурах КНИ. В процессе формирования структур была проведена калибровка режимов эпитаксии с оценкой реальной температуры поверхности КНИ подложек в зависимости от подаваемой на излучатель мощности. Калибровка проводилась на основе экспериментальных данных по температурной зависимости параметров наностроек Ge(Si) на подложках объемного кремния – Si(001) и структурах КНИ.

Морфология выращенных структур изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в атмосферных условиях при помощи микроскопа «Силвер Про» компании НТ-МТД

(Россия). Кристаллическая структура эпитаксиальных слоев исследовалась методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения с использованием микроскопа JEOL JEM 2100F. Толщина пленки при переходе от двумерного к трехмерному режиму формирования наностроек определялась с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Измерения спектров фотолюминесценции выполнялись с помощью Фурье спектрометра DA3-36. Для возбуждения сигнала ФЛ использовалось излучение Nd:YAO лазера с длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Спектры ЭЛ и ФЛ регистрировались с помощью охлаждаемых Ge и InSb фотоприемников. Исследуемые образцы подвергались импульсному  $\gamma$ -нейтронному облучению. В качестве источника нейтронов использовался импульсный реактор с характерной энергией нейтронов  $\sim 1$  МэВ и флюенсом до  $10^{15}$  н/см $^2$ . Экспозиционная доза  $\gamma$ -излучения составляла  $\sim 400$  кР.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Необходимые для обеспечения радиационной стойкости условия локализации носителей заряда определяются формирующейся системой наностроек Ge(Si) светоизлучающих структур. Характеристики островков (размеры, форма, состав, упруго-напряженное состояние) зависят от условий роста [8]. На процессы самоформирования оказывают влияние такие параметры как температура подложки, скорость осаждения, морфология поверхности, скорость поверхностной и объемной диффузии компонент и т. д. В процессе эпитаксиального роста наблюдается трансформация формы наностроек Ge(Si). После перехода от слоевого роста к трехмерному образуется система наностроек Ge(Si) с прямоугольным основанием (hut-островки) и пирамидальных островков (pyramid-островки), которая затем трансформируется в систему однородных куполообразных островков (dome-островки), упорядоченных в плоскости подложки [9]. Данный переход энергетически выгоден, т. к. энергия упругих напряжений для куполообразных островков меньше, чем для островков иной формы. Куполообразные

островки Ge(Si) ограниченные плоскостями (105), (113) не отличаются развитой поверхностью. Отражающие границы наностроек при низкой поверхностной рекомбинации способствует локализации носителей заряда. Для dome-остроек наблюдается наиболее глубокая потенциальная яма для дырок. Пространственно упорядоченные массивы dome-остроек Ge(Si) формируются с большой плотностью, занимают максимальную площадь подложки и при высокой локализации зарядов в потенциальных ямах обеспечивают наибольшую эффективность параметров светоизлучающих структур.

Массивы наностроек Ge(Si) выращивались в оптимальных для получения эффективных параметров светоизлучающих структур режимах. При формировании системы наностроек Ge(Si) одним из наиболее критических параметров в процессе роста являлась температура подложки. Было установлено, что при нагреве в диапазоне температур от 550 °C до 650 °C температура поверхности КНИ структур на 40 °C выше, чем у пластин объ-

емного кремния. При этом оптимальной для формирования характерного массива dome-остроек является температура поверхности пластин 600 °C. На рис. 1а представлено АСМ изображение КНИ структуры с сформированным массивом Ge(Si) наностроек. Морфология Ge(Si) наностроек выращенных на КНИ структурах при оптимальной температуре поверхности подложки ~ 600 °C близка к морфологии наностроек выращенных на объемном Si(001). Полученные типичные значения параметров морфологии отличаются малым разбросом по размерам dome-остроек. Поверхностная плотность  $N \sim 5,0 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ , средняя высота остроек  $h \sim 15 \text{ нм}$ , средние латеральные размеры  $D$  менее 100 нм с разбросом ~ 15 % (определенные по уровню  $0,1 h$  от поверхности смачивающего слоя Ge), а также средние значения доли германия в  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0,54$ ) близки к значениям параметров наностроек, выращенных на Si(001). Близость морфологий наностроек, выращенных на КНИ и Si(001) структурах, облегчает сравнительный анализ радиационных эффектов при воздействии  $\gamma$ -нейтронного излучения.

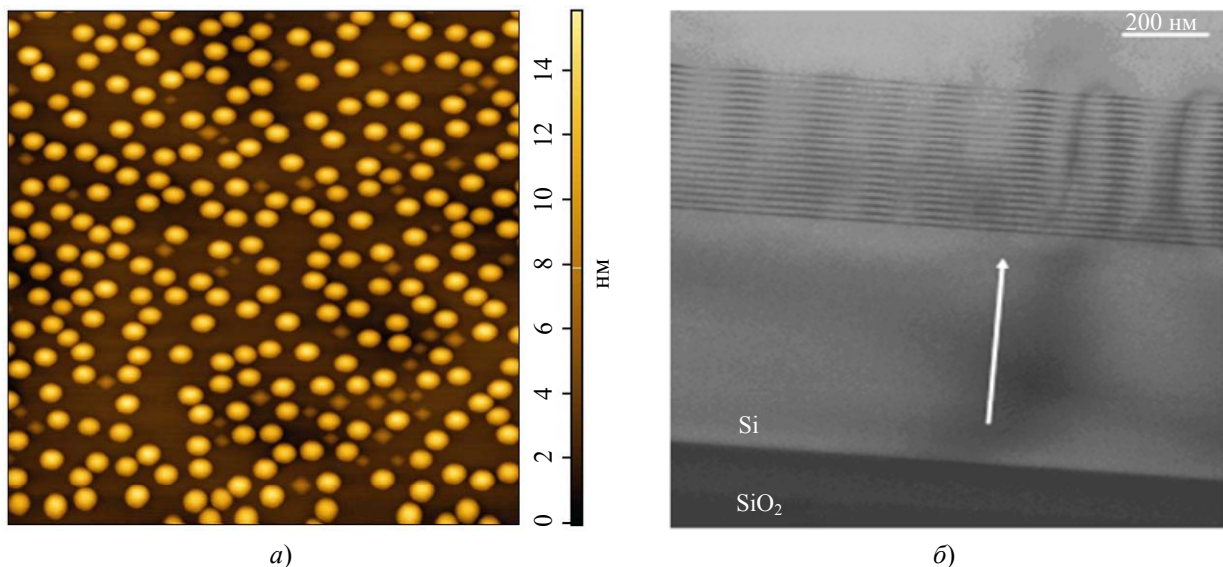


Рис. 1. АСМ изображение поверхности КНИ структуры с самоформирующимся массивом куполообразных Ge(Si) наностроек (а) и полученный методом ПЭМ снимок многослойной структуры с Ge(Si) наностройками выращенными на КНИ подложке (б)

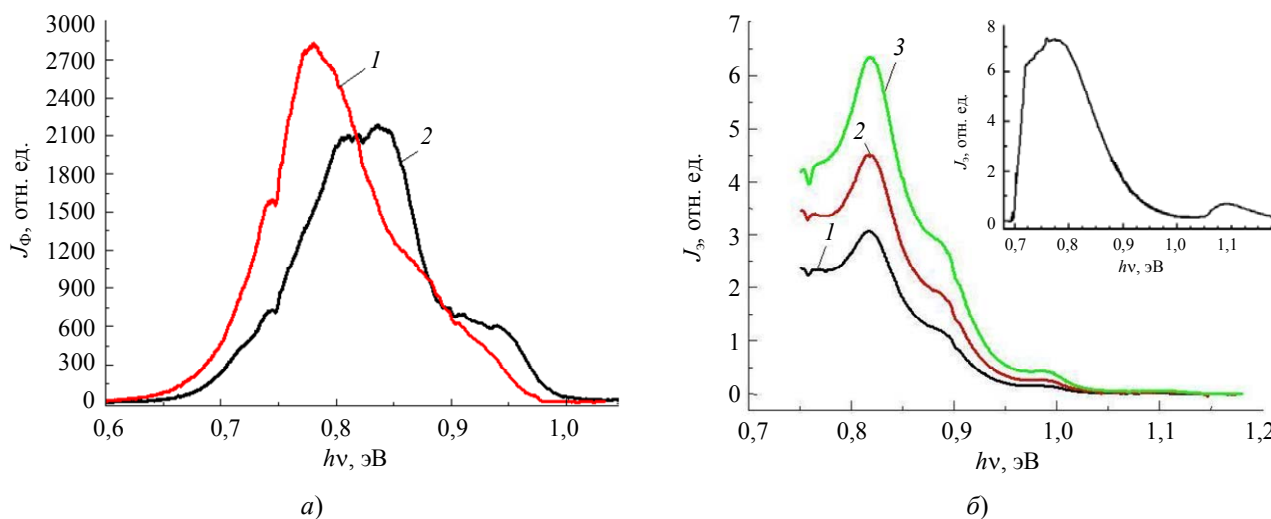
На снимке, полученном методом ПЭМ (рис. 1б), представлена многослойная структура Ge(Si) наностроек в активной области светоизлучающего  $p-i-n$  диода сформирован-

ного на КНИ подложке. Вертикальное упорядочение структуры слоев обусловлено влиянием поля упругих напряжений ниже лежащих Ge(Si) наностроек. Послойная корреляция

островков массива зависит от параметров разделительных (спейсерных) слоев Si. При этом оптимальные значения толщины спейсерных слоев лежат в диапазоне от 15 до 20 нм. Исследования многослойных структур с толщиной разделительного слоя кремния от 15 до 20 нм также показали, что концентрация дефектных областей в них значительно меньше, чем в структурах с толщиной слоя Si больше 25 нм. При толщине спейсерного слоя сравнимой с размерами Ge(Si) наноструктур в направлении роста, деформация кремния носит характер растяжения между соседними островками, что приводит к формированию глубокой (до 100 мэВ) потенциальной ямы для электронов на границе Ge/Si. Формирование потенциальной ямы обуславливает локализацию носителей заряда вблизи наноструктур и обеспечивает рост интенсивности электролюминесценции структур. Отсутствие на снимке

видимой границы между исходным слоем кремния КНИ структуры и выращенным МЛЭ буферным слоем Si подчеркивает эффективность методов подготовки поверхности пластин перед эпитаксией.

Для измерения параметров светоизлучающих  $p-i-n$  диодов с массивом Ge(Si) наноструктур в активной области с помощью плазмохимического травления формировались меза структуры размером  $1 \times 1$  мм и  $1 \times 0,5$  мм. Верхний контакт к слою  $n^+$ -Si был выполнен в виде сетки металлизации с целью увеличения свободной поверхности для вывода излучения. Нижний контакт к  $p^+$ -области кремния окружал меза структуру по периметру. В качестве металлизации использовалось золото с подслоем Ti. На рис. 2а приведены для сравнения спектры фотолуминесценции многослойных структур, выращенных на подложках Si(001) и КНИ со схожими массивами Ge(Si) наноструктур.



**Рис. 2.** Спектры ФЛ структур, сформированных на подложках Si(001) (1) и КНИ (2) с массивами Ge(Si) наноструктур (а) и спектры ЭЛ структур с массивом наноструктур Ge(Si) на подложках КНИ при различных токах накачки (1 – 150 мА, 2 – 200 мА, 3 – 250 мА) (б), на вкладке – спектр ЭЛ структур с массивами Ge(Si) на подложках Si(001). Спектры измерены при температурах 77 К (а) и 300 К (б)

Интенсивность ФЛ  $J_{\text{ф}}$  дана в относительных единицах. Для структур Si(001) и КНИ характерны широкие пики ФЛ (рис. 2а) связанные с излучательной рекомбинацией локализованных в области наноструктур Ge(Si) носителей заряда. Наблюдается небольшое смещение максимумов интенсивности в диапазоне энергии квантов  $h\nu \sim 0,7-1,0$  эВ ( $\lambda \sim 1,3-1,7$  мкм). Интенсивность люминесцентных откликов обеих спектров сравнима по величине, что свидетельствует о схожей морфологии наноструктур Ge(Si). Захоро-

ненный диэлектрик, по-видимому, не оказывает существенного влияния на морфологию наноструктур и как следствие излучательные свойства диодов, а качество кристаллической структуры активных областей пластин КНИ изготовленных методом сращивания не уступает качеству объемного кремния. Вместе с тем по характеру спектры различаются. В спектрах светоизлучающих структур, сформированных на подложках КНИ, присутствуют не менее двух максимумов. Следствием особенностей структур на КНИ подложках

являются вертикальные резонансы типа Фабри-Перо, обусловленные интерференцией волн отраженных от границ раздела Si-поверхность и Si-захороненный SiO<sub>2</sub>.

На рис. 2б приведены спектры электролюминесценции многослойных структур светодиодов выращенных на подложках КНИ при различных токах накачки. Спектры измерялись при комнатной температуре. Интенсивность ЭЛ  $J_3$  представлена в относительных единицах. Сигнал ЭЛ детектировался с поверхности структуры светодиодов. При измерениях поверхность образцов фиксировалась перпендикулярно направлению оптической оси измерительной системы. Как видно из рисунка интенсивность люминесценции изменяется в зависимости от величины тока накачки, но характер спектров при этом не меняется. На кривой по-прежнему наблюдаются максимумы интенсивности. Основным максимум излучения соответствует длине волны  $\sim 1,50$  мкм ( $h\nu \sim 0,83$  эВ). Из рисунка видно, что соотношение величин и положение максимумов интенсивности от тока накачки не зависит, поэтому максимумы интенсивности не связаны с различными процессами излучения в исследуемой структуре, а определяются явлениями интерференции волн.

Проведенные исследования зависимости интенсивности ЭЛ диодов на КНИ подложке от угла наблюдения показали, что характер спектров излучения при смене угла не изменяется. В зависимости от угла относительно нормали к поверхности структуры (размах от 0 до 90°), длина волны пика излучения изменялась в диапазоне  $\lambda \sim 1,45$ – $1,60$  мкм при этом величина интенсивности ЭЛ практически не менялась. Выполненные исследования угловой зависимости сигнала ЭЛ позволяют связать наблюдаемые максимумы в спектре с интерференцией волн в активной области структуры. Максимумы сигнала ЭЛ обычно появляются на тех длинах волн, оптические пути которых содержат целое число длин полуволн. Другим отличием спектров диодов на структурах КНИ является отсутствие сигнала, связанного с межзонной рекомбинацией носителей заряда в Si в области энергии квантов 1,12 эВ (вкладка рис. 2б). Сигнал от кремния для структур, выращенных на Si(001), по большей части является результатом излуча-

тельной рекомбинации дырок и неравновесных электронов в объеме подложки. В структурах светодиодов, выращенных на КНИ, скрытый окисел препятствует диффузии неравновесных носителей в подложку, что приводит к снижению люминесцентного отклика от кремния.

Воздействие потока нейтронов на полупроводниковую структуру сопровождается образованием первичных радиационных дефектов типа пар Френкеля. Считается, что атомы матрицы всегда смещаются, приобретая энергию больше некоторой пороговой энергии смещения атома. Хотя вероятность передачи большого количества энергии смещенному атому подложки невелика, практически в каждом каскаде столкновений при облучении кремния нейтронами есть возможность появления подобного события. Поэтому радиационные дефекты в каскадах столкновений облученной области распределены неравномерно, образуя локальные разупорядоченные области (РО) [10]. РО радиационных дефектов выступают как центры безызлучательной рекомбинации и обуславливают снижение интенсивности люминесценции. При рассмотрении воздействия  $\gamma$ -нейтронного излучения необходимо учитывать сложную многослойную структуру светодиодов с гетерогенными границами различных материалов. С помощью программы «TRIM» был проведен расчет структуры радиационных дефектов в подложках КНИ и КНС при облучении потоком быстрых нейтронов с флюенсом  $5 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> и средней энергией  $\sim 1$  МэВ. Расчет проводился при условии изотропного облучения. В ходе вычислений анализировались границы раздела кремния со скрытым слоем диэлектрика для структур КНИ и КНС, а также металлизации с кремнием. На рис. 3а представлена расчетная зависимость концентрации дефектов (N) в слое кремния для структур «SiO<sub>2</sub>-Si», «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si», «Al-Si», «Au-Si» и «воздух-Si», выраженная в относительных единицах от расстояния до границы раздела X. При расчетах учитывалось, что РО в кремнии могут быть сформированы атомами Al, Au и O, которые при взаимодействии с нейтронами инжектируются из прилегающего к кремнию материала. Так как сечение взаимодействия быстрых нейтронов с атомами Au больше, чем

с атомами Si или Al взаимодействие их с нейтронами идет намного эффективнее. Концентрация дефектов гетерограницы Au-Si в приповерхностном слое Si толщиной ~ 50 нм значительно превышает концентрацию дефектов объемного кремния. Эффективно модифицируется граница с сапфиром: концентрация

РО составляет  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в прилегающем к границе слое кремния толщиной до 150 нм. При этом в структурах КНИ взаимодействие с кислородом не приводит к росту концентрации радиационных дефектов гетерограницы скрытый слой SiO<sub>2</sub>-Si относительно объемного кремния.

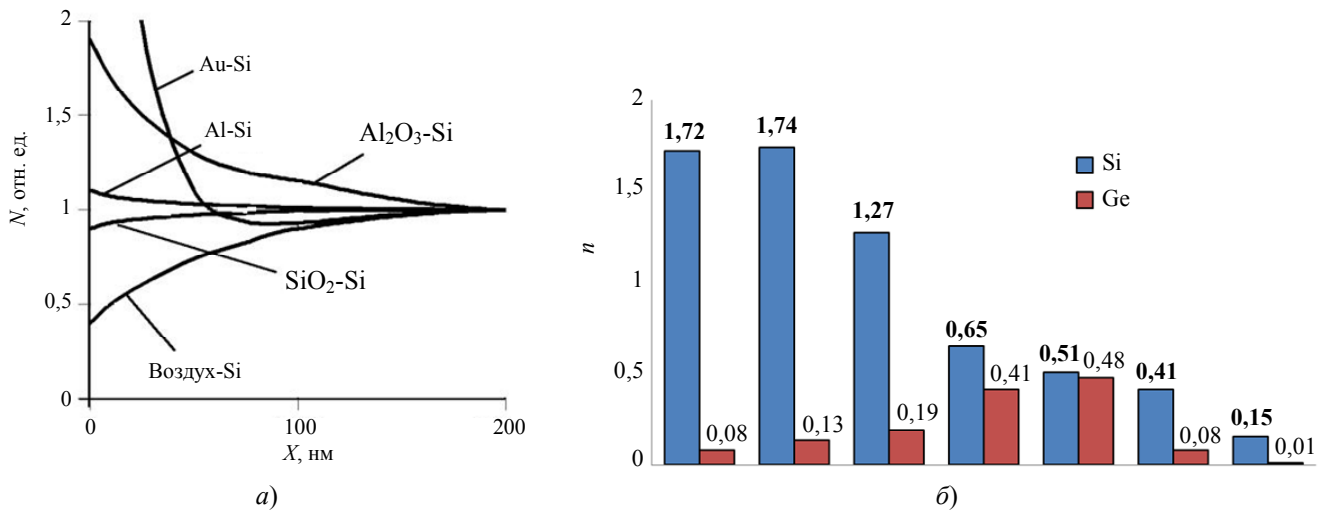


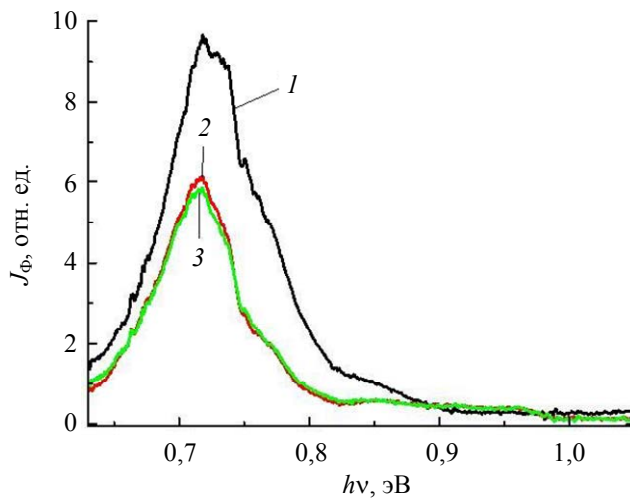
Рис. 3. Зависимость концентрации дефектов в слое кремния  $N$  от расстояния до границы раздела  $X$  в гетероструктурах «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si», «Al-Si», «Au-Si», «SiO<sub>2</sub>-Si» и «воздух-Si» при воздействии потока быстрых нейтронов (концентрация дефектов в объеме кремнии соответствует 1) (а). Среднее количество субкластеров в каскадах атомных смещений  $n$  для атомов Si и Ge в зависимости от размера субкластера  $L$  (б)

Моделирование каскадов атомных смещений, инициированных первично выбитыми атомами Si и Ge при облучении структуры светодиодов потоком быстрых нейтронов с флюенсом  $5 \times 10^{14} \text{ н/см}^2$  и средней энергией ~ 1 МэВ, проводилось методом Монте-Карло по TRIM алгоритму. Формирование РО для светоизлучающих структур с массивом наностроек Ge(Si) рассчитывалось без учета нарушений границы скрытый слой SiO<sub>2</sub>-Si, которые по расчетам носят локальный характер (рис. 3а). Энергия смещения из узлов кристаллической решетки для атомов Si и Ge задавалась равной 20 эВ. Для массива наностроек учитывалось количество Si и Ge в составе твердого раствора Ge<sub>*x*</sub>Si<sub>1-*x*</sub> ( $x = 0,54$ ). Плотность кремния составляла 2,33 г/см<sup>3</sup>, а плотность твердого раствора Ge<sub>*x*</sub>Si<sub>1-*x*</sub> ~ 3,80 г/см<sup>3</sup>. Первично выбитые атомы Si и Ge формируют каскады атомных смещений в виде локальных скоплений дефектов – субкластеров. На рис. 3б представлены результаты моделирования каскадов атомных смещений для атомов Si и Ge. Показано среднее количество субкластеров в каскадах атом-

ных смещений  $n$  в зависимости от размера субкластера  $L$ . Для первично выбитых атомов Si и Ge РО имеют различные геометрические размеры. Для атомов Si характерно формирование в активной области светодиодов большого количества субкластеров малых размеров (менее 10 нм), а для Ge напротив – формирование малого количества субкластеров с большими размерами ~ 40 нм. В области обеднения  $p-i-n$  диодов при наличии спейсерных и буферных слоев Si доля атомов Ge намного уступает доле атомов кремния. По результатам расчетов атомы Ge по сравнению с атомами Si оказывают значительно меньшее влияние на деградацию оптоэлектронных свойств гетероструктур с наностройками Ge(Si).

Теоретическая оценка влияния РО на свойства светоизлучающих структур с Ge(Si) наностройками выращенных на подложках Si(001) при  $\gamma$ -нейтронном облучении была проведена в работе [11]. Электрическое поле области пространственного заряда РО снижает концентрацию локализованных в наностройках Ge(Si) носителей и в совокупности с

процессами безызлучательной рекомбинации на радиационных дефектах обуславливает спад интенсивности люминесценции. Рассчитанная доля наностроек, попавших в зону влияния электрического поля РО для структур светодиодов на подложках Si(001), составляла 40 %. При этом расчет поля РО проводился без учета первично выбитых атомов Ge. При локальном характере нарушений гетерограницы скрытый слой диэлектрика – кремний ( $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ) (рис. 3а) и преимущественном влиянии Si на формирование каскадов атомных смещений (рис. 3б), доля наностроек в зоне влияния поля РО для гетероструктур выращенных на подложках Si(001) должна быть сравнима с долей наностроек для структур на подложках КНИ. Полученный вывод подтверждают экспериментальные данные. На рис. 4 представлены спектры ФЛ структур с массивом наностроек Ge(Si) выращенных на подложках КНИ до и после  $\gamma$ -нейтронного облучения. Интенсивность ФЛ  $J_{\text{Ф}}$  представлена в относительных единицах.



**Рис. 4.** Спектры ФЛ структур с наностройками Ge(Si) выращенными на подложках КНИ до (1) и после однократного (2) и двукратного (3)  $\gamma$ -нейтронного облучения с флюенсами  $2 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>. Спектры измерены при температуре 77 К

Пики ФЛ облученных и необлученных структур лежат в диапазоне длин волн  $\lambda \sim 1,4\text{--}1,8$  мкм (энергия квантов  $h\nu \sim 0,65\text{--}0,85$  эВ). Длина волны максимума интенсивности спектра ФЛ после облучения не изменяется. При двукратном облучении не наблюдается снижения интенсивности люминесценции относительно однократного, что связано, по-

видимому, с формированием устойчивых кластеров, служащих стоком радиационных дефектов. Приведенные на рис. 4 спектры свидетельствуют об уменьшении на 35 % интенсивности сигнала ФЛ после воздействия быстрых нейтронов, что совпадает с теоретической оценкой влияния РО на свойства структур с наностройками Ge(Si) и экспериментальными данными по снижению интенсивности люминесценции для структур, выращенных на подложках Si(001). [11]. Результаты моделирования и экспериментальные данные по воздействию  $\gamma$ -нейтронного излучения показывают, что уровень радиационной стойкости светодиодов в основном определяется структурой массива наностроек Ge(Si). Использование подложек КНИ не снижает радиационную стойкость структур.

## Заключение

Исследовались характеристики светоизлучающих структур с массивом наностроек Ge(Si), выращенных методом МЛЭ на подложках КНИ. Показано, что параметры морфологии наностроек Ge(Si) на структурах КНИ (поверхностная плотность, средняя высота, латеральные размеры) близки к значениям параметров наностроек, выращенных в аналогичных режимах на подложках Si(001). Спектры ФЛ светоизлучающих структур на подложках КНИ и Si(001) сравнимы по интенсивности люминесцентных откликов, но отличаются по характеру. Полученная зависимость интенсивности ЭЛ светоизлучающих структур на подложках КНИ от величины тока накачки не отражается на характере спектров. Так как положение максимумов интенсивности в спектрах не зависит от тока накачки, их появление не связано с различными процессами излучения в исследуемой структуре. Максимумы интенсивности в спектрах структур на подложках КНИ определяются вертикальными резонансами типа Фабри-Перо, обусловленными интерференцией волн, отраженных от границ раздела кремния с поверхностью и скрытым слоем диэлектрика.

Представлены результаты исследований воздействия  $\gamma$ -нейтронного излучения на параметры светоизлучающих структур. При рассмотрении воздействия излучения на обед-

ненные области светодиодов с массивом наностроек Ge(Si), выращенных на подложках КНИ, учитывалась их сложная многослойная структура с гетерогенными границами различных материалов. С использованием программы «TRIM» рассчитана структура радиационных дефектов в подложках КНИ. Показано, что взаимодействие нейтронов с кислородом скрытого слоя диэлектрика не приводит к выходу уровня дефектности гетерограницы Si-SiO<sub>2</sub> за уровень дефектности слоя Si. Методом Монте-Карло по программе «TRIM» в структурах светодиодов моделировались каскады атомных смещений, инициированных первично выбитыми атомами Si и Ge. Показано, что атомы Si оказывают значительно большее влияние на деградацию оптоэлектронных свойств гетероструктур с наностройками Ge(Si) по сравнению с атомами Ge. При локальном характере нарушений гетерограницы скрытый слой SiO<sub>2</sub>-Si доля наностроек в зоне влияния радиационных дефектов для структур, выращенных на подложках КНИ, соответствуют доле наностроек на подложках Si(001). Интенсивность сигнала ФЛ для структур на подложках КНИ после воздействия нейтронов снижается на 35 %, что соответствует снижению интенсивности для структур на подложках Si(001) и совпадает с теоретической оценкой влияния принесенной дефектности. Результаты моделирования и экспериментальные данные показывают, что наибольшее влияние на уровень

радиационной стойкости светодиодов оказывает структура массива наностроек Ge(Si).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boucaud P., Li X., El Kurdi M. et al. / *Optical Materials*. 2005. № 27. P. 792–798.
2. Смагина Ж. В., Зиновьев В. А., Степихова М. В. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2021. Т. 55. Вып. 12. С. 1210–1215.
3. Якимов А. И., Кириенко В. В., Блошкин А. А. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2024. Т. 58. Вып. 7. С. 386–392.
4. Новиков А. В., Яблонский А. Н., Платонов В. В. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. Вып. 3. С. 346–351.
5. Смагина Ж. В., Новиков А. В., Степихова М. В. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2020. Т. 54. Вып. 8. С. 708–715.
6. Зиновьев В. А., Смагина Ж. В., Зиновьева А. Ф. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2024. Т. 58. Вып. 5. С. 238–241.
7. Красильник З. Ф., Кудрявцев К. Е., Качемцев А. Н. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45. Вып. 2. С. 230–234.
8. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34. Вып. 11. С. 1281–1299.
9. Востоков Н. В., Гусев С. А., Долгов И. В. и др. / *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34. Вып. 1. С. 8–12.
10. Кабальнов Ю. А., Качемцев А. Н., Оболенский С. В. / *Вопросы атомной науки и техники*. 2019. № 3. С. 12–18.
11. Иванова М. М., Кабальнов Ю. А., Качемцев А. Н., Скупов А. В. / *Успехи прикладной физики*. 2025. Т. 13. № 3. С. 201–208.

PACS: 85.60.-q

## Radiation resistance of light-emitting structures with Ge/Si nanoislands on SOI substrate

Yu. A. Kabalnov\* and M. M. Ivanova

FSUE “RFNC-VNIIEF”, Nizhny Novgorod Region, Sarov, 607188 Russia

\* E-mail: Kabalnov@niis.nnov.ru

Received 22.07.2025; revised 18.08.2025; accepted 20.10.2025

*Theoretical and experimental research results are presented to demonstrate the impact of  $\gamma$ -neutron radiation on the parameters of light-emitting structures with an array of Ge(Si) nanoislands grown by methods of molecular beam epitaxy on SOI substrates. These structures showed a high level of resistance to the impact of  $\gamma$ -neutron radiation comparable with re-*

*sistance level of structures with Ge(Si) nanoislands on Si(001) substrates. Reduction of luminescence intensity of these structures coincides with theoretical estimate of radiation defects influence level. Simulation results and experimental data show that the Ge(Si) nanoislands array structures affect the radiation resistance of LEDs to the greatest extent.*

*Keywords:* light-emitting structures; Ge(Si) nanoislands arrays; SOI structures; radiation resistance;  $\gamma$ -neutron radiation.

## REFERENCES

1. Boucaud P., Li X., El Kurdi M. et al., *Optical Materials*, № 27, 792–798 (2005).
2. Smagina Zh. V., Zinovyev V. A., Stepikhova M. V. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **55** (12), 1210–1215 (2021).
3. Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **58** (7), 386–392 (2024).
4. Novikov A. V., Yabloskiy A. N., Platonov V. V. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **44** (3), 346–351 (2010).
5. Smagina Zh. V., Novikov A. V., Stepikhova M. V. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **54** (8), 708–715 (2020).
6. Zinovyev V. A., Smagina Zh. V., Zinovyev A. F. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **58** (5), 238–241 (2024).
7. Krasilnikov Z. F., Kudryavtsev K. E., Kachemtsev A. N. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **45** (2), 230–234 (2011).
8. Pchelyakov O. P., Bolkhovityanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **34** (11), 1281–1299 (2000).
9. Vostokov N. V., Gusev S. A., Dolgov I. V. et al., *Physics and Semiconductor Technology* **34** (1), 8–12 (2000).
10. Kabalnov Yu. A., Kachemtsev A. N. and Obolenskiy S. V., *Problems of atomic science and technology*, № 3, 12–18 (2019).
11. Ivanova M. M., Kabalnov Yu. A., Kachemtsev A. N. and Skupov A. V., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **13** (3), 201–208 (2025) [in Russian].

## Об авторах

**Кабальнов Юрий Аркадьевич**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» (607188, Россия, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37). E-mail: Kabalnov@niiis.nnov.ru

**Иванова Мария Михайловна**, ведущий инженер, ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» (607188, Россия, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37). SPIN-код: 8630-2864, AuthorID: 1210282