



Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

Статьи 1 номера

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 539.25, 539.26

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12624>

Анализ кристаллического качества объемных слоев $In_{0.83}Ga(Al)_{0.17}As$, сформированных на метаморфных буферных слоях InAlAs/InP с линейным и нелинейным градиентом состава

Е. И. Василькова^{1,2✉}, Е. В. Пирогов¹, В. Н. Неведомский³, О. В. Баранцев¹, К. О. Воропаев⁴, А. А. Васильев⁴, Л. Я. Каракинский^{1,5}, И. И. Новиков^{1,5}, М. С. Соболев^{1,2,5}

¹ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук», ул. Хлопина, 8к3, лит. А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», ул. профессора Попова, 5, Санкт-Петербург 197022, Российская Федерация

³ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

⁴АО «ОКБ «Планета», Большая Московская ул., д. 13а, пом. 1н, Великий Новгород 173004, Российская Федерация

⁵ООО «Коннектор Оптикс», ул. Домостроительная, д. 16, литер Б, Санкт-Петербург 194292, Российская Федерация

Аннотация

В данной работе исследуется эффективность использования InAlAs метаморфных буферных слоев с линейной и корневой зависимостью мольной доли In в составе для роста объемных слоев $In_{0.83}Ga(Al)_{0.17}As$ на подложках InP. Анализ карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве показал, что слои $In_{0.83}Ga(Al)_{0.17}As$ являются частично релаксированными в обоих случаях. Одним из механизмов релаксации напряжений при росте буферного слоя, имеющем линейную зависимость изменения состава, является разворот кристаллической решетки, а при росте буферного слоя, имеющем корневую зависимость, — наклон кристаллической решетки на 0.82° без разворота. Плотность прорастающих дислокаций в верхних фотодиодных слоях InGaAs, выращенных на буферном слое с линейным законом изменения состава, составляет $\sim 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, как следует из изображений, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: метаморфные буферные слои, карты рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве, просвечивающая электронная микроскопия, молекулярно-пучковая эпитаксия

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта №22-79-00146.

Для цитирования: Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Неведомский В. Н., Баранцев О. В., Воропаев К. О., Васильев А. А., Каракинский Л. Я., Новиков И. И.: Соболев М. С. Анализ кристаллического качества объемных слоев $In_{0.83}Ga(Al)_{0.17}As$, сформированных на метаморфных буферных слоях InAlAs/InP с линейным и нелинейным градиентом состава. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(1): 86–95. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12624>

✉ Василькова Елена Игоревна, e-mail: elenvasilkov@gmail.com

© Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Неведомский В. Н., Баранцев О. В., Воропаев К. О., Васильев А. А., Каракинский Л. Я., Новиков И. И., Соболев М. С., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Vasilkova E. I., Pirogov E. V., Nevedomsky V. N., Barantsev O. V., Voropaev K. O., Vasiliev A. A., Karachinsky L. Ya., Novikov I. I., Sobolev M. S. Analysis of the crystalline quality of bulk $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ layers formed on metamorphic InAlAs/InP buffer layers with linear and nonlinear composition gradients. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(1): 86–95. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12624>

1. Введение

Важным фактором, способствующим стремительному развитию эпитаксиальных технологий, стала возможность роста полупроводниковых слоев, несогласованных с выбранной подложкой по параметру кристаллической решетки. Это достижение позволило наблюдать в гетероструктурах новые электрофизические и оптические эффекты и сильно расширило элементную базу гетероструктурной нано- и оптоэлектроники. Один из установившихся при помощи эпитаксии подходов к получению полупроводниковых слоев на подложках с критически большим рассогласованием параметров кристаллической решетки — это режим метаморфного роста. Метаморфные буферные слои (МБС) создают переход от постоянной решетки подложки к постоянной решетки, требуемой для роста функциональных слоев гетероструктуры. Одним из способов реализации такого перехода является изменение состава буферного слоя, что равнозначно изменению потоков материалов во время эпитаксиального роста МБС. Изменение состава может быть как плавным, например, по линейному закону, так и ступенчатым. Обычно толщина МБС составляет несколько микрометров. По окончанию формирования МБС должна быть создана планарная эпитаксиальная поверхность для последующего ненапряженного роста активных слоев. Технология МБС в настоящее время широко применяется для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов, лазеров, солнечных элементов, фотодиодов и др. [1–6]. Изучаются и применяются различные варианты конструкции, толщины, материалов буферных слоев в зависимости от активных слоев гетероструктуры и ее приборного применения.

Данная работа посвящена исследованию возможных конструкций метаморфного буферного слоя для роста тройных твердых растворов $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ на подложках InP. Указанная пара материалов применяется для изготовления фотодетекторов ближнего инфракрасного спектрального диапазона, где от содержания индия в фотопоглощающем слое InGaAs зависит пиковая длина волны фотоотклика. Наиболее часто встречающимся вариантом является поглощающий слой из твердого раствора $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, решеточно-согласованного с InP. Высокое качество

подложек InP, а также отличные характеристики фотодиодов и матричных устройств на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ позволили InGaAs стать лидирующим материалом для изготовления фотоприемников излучения с длиной волны 1–1.7 мкм. С увеличением содержания индия до мольной доли $x = 0.83$ диапазон детектирования смещается в более длинноволновую область 2.2–2.6 мкм. Таким образом, варьируя состав поглощающего слоя, в рамках одной системы материалов можно освоить большую часть ближней инфракрасной области спектра. Однако, из-за большого относительного рассогласования параметров решетки $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ и InP подложки в ~ 2 %, критическая толщина для псевдоморфного роста активного слоя оказывается на 1–2 порядка меньше, чем толщина, требуемая для эффективного поглощения излучения [7]. Поэтому для роста слоя $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ на поверхности InP во избежание появления в активной области большого количества дислокаций несоответствия необходимо выращивание переходных метаморфных буферных слоёв. В данном случае МБС способствуют псевдоморфному росту поглощающих слоев InGaAs и, следовательно, снижению плотности образующихся дислокаций несоответствия, а также останавливают распространение прорастающих дислокаций в активных слоях фотодетекторов. Для фотодетекторов существование дислокаций крайне нежелательно, т. к. они вносят вклад в некоторые механизмы образования темновых токов, что приводит к снижению обнаружительной способности приборов [8].

2. Экспериментальная часть

В ходе исследования методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber MBE49 были выращены экспериментальные образцы, содержащие МБС различной конструкции (рис. 1). Образцы представляли собой гетероструктуры InAlAs/InGaAs на легированных подложках n^+ -InP (100) качества “epi-ready”. Конструкция гетероструктур включала в себя решеточно-согласованный с подложкой слой $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной ~ 0.1 мкм, МБС InAlAs ~ 2 мкм различных конфигураций, активную область $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ толщиной ~ 1.5 мкм и завершалась верхними контактными слоями $\text{In}_{0.83}\text{Al}(\text{Ga})_{0.17}\text{As}$ толщиной ~ 650 нм (рис. 1). Рост

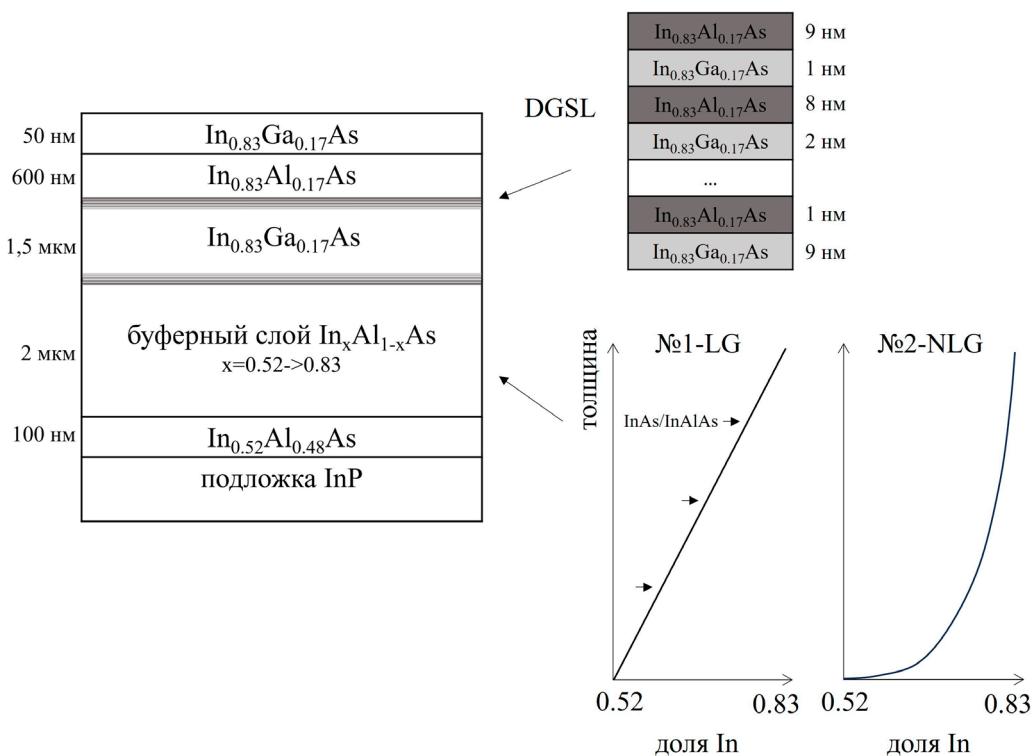


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции метаморфных гетероструктур № 1-LG и № 2-NLG

МБС осуществлялся при постоянной температуре подложки, меньшей на 70 °C температуры роста активной области (490 °C), и завершался процедурой термоциклирования: пикового подъема температуры до 530 °C с последующим охлаждением до 100 °C. Буферные слои легировались кремнием до уровня $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (n^+), а контактные – бериллием, с концентрацией примеси $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (p^+). Активная область InGaAs также была легирована кремнием в малой концентрации $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Тип и концентрация легирующей примеси в каждом слое подбирались с целью получения диодной гетероструктуры для последующего изготовления кристаллов p-i-n-фотодиодов с поглощающим слоем In_{0.83}Ga_{0.17}As.

Образец № 1-LG содержал МБС In_xAl_{1-x}As с линейным градиентом состава по индию от $x = 0.52$ до $x = 0.83$ и с промежуточными вставками, состоящими из трех периодов InAs(4 Å)/InAlAs(10 Å), через каждые 500 нм. Буферные слои похожей конструкции показали преимущество по сравнению со ступенчатым профилем изменения состава и линейным профилем без вставок [9]. Продемонстрированный выигрыш от использования МБС такого типа заключался в меньшей плотности прорастающих дислокаций в функциональных слоях, а также в существовании бездислокационной области d_{free} в буферном слое.

Буферный слой образца № 2-NLG представлял собой слой In_xAl_{1-x}As с составом, изменявшимся по нелинейному закону, близкому к корневой зависимости. Доля содержания InAs в составе менялась также от 0.52 до 0.83. Основное отличие между образцами № 1-LG и № 2-NLG заключается в том, что при корневом законе изменения состава параметр кристаллической решетки МБС растет быстрее в его нижней области, приграничной к подложке, и, напротив, более плавно при приближении к активным слоям. Этот факт дает возможность предполагать, что образование дислокаций будет более активным в нижней части МБС, наиболее удаленной от функциональных слоев гетероструктуры. В литературе уже была продемонстрирована перспективность такого дизайна по сравнению с линейным профилем для более эффективной релаксации упругих напряжений на примере метаморфных слоев InAlAs на подложках GaAs [10]. Также в рамках системы материалов InAlAs/GaAs было подтверждено экспериментально, что корневая зависимость состава по индию в МБС приводит к меньшей плотности дислокаций и образованию более толстой области d_{free} [11].

Для сглаживания разрывов зоны проводимости между InGaAs и InAlAs и дополнительного сокращения плотности дислокаций в кон-

струкцию гетероструктур сверху и снизу от поглощающего слоя были введены так называемые цифровые градиентные переходы по составу (DGSL), состоящие из 9-периодных сверхрешеток $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ суммарной толщины порядка 90 нм [12]. Соотношение яма-барьер в периоде DGSL варьировалось от 1:9 до 9:1 в случае нижней сверхрешетки (гетерионтерфейс МБС-активная область) и зеркально противоположно в случае верхней (гетерионтерфейс активная область-контактный слой). Данные сверхрешетки создают ступенчатый барьер для носителей заряда в точке разрыва зоны проводимости материалов. Кроме того, предполагается, что дополнительные гетерионтерфейсы, которые создаются DGSL, помогут осуществить более плавный переход от постоянной решетки InGaAs к InAlAs в том случае, если в InGaAs будет присутствовать остаточная деформация. Поэтому в обоих образцах перед ростом поглощающего слоя $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ и после его полного формирования были реализованы вставки областей DGSL.

Перед основными экспериментами по изучению кристаллических свойств образцов метаморфных гетероструктур, были проведены их электрохимические вольт-фарадные (ECV) измерения. Сравнение профилей распределения концентрации носителей заряда образцов № 1-LG и № 2-NLG по глубине структуры приведено на рис. 2. Профиль образца № 1-LG более гладкий и в большей степени сопоставим с конструкцией гетероструктуры по толщинам слоев, а также не имеет точек-выбросов и резких скачков концентрации, в отличие от образца № 2-NLG.

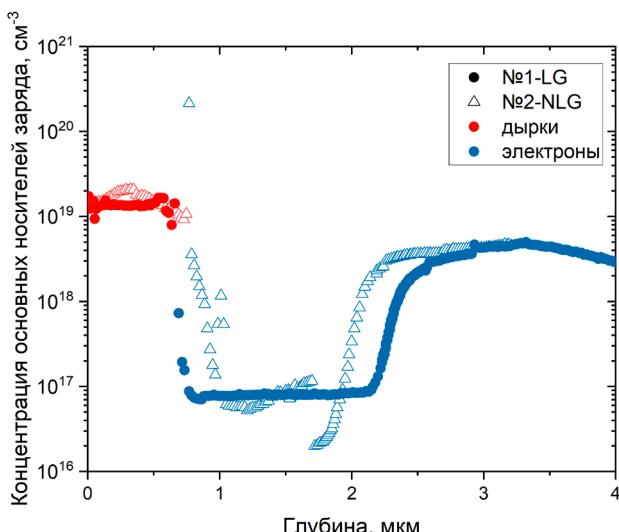


Рис. 2. Профили распределения концентрации носителей заряда, полученные методом электрохимического вольт-фарадного профилирования

Это может быть свидетельством более высокой дефектности образца с корневым профилем состава в буферном слое № 2-NLG. Исходя из полученных результатов ECV измерений, образец № 1-LG с линейным МБС был выбран как опорный для исследования разрушающим методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Кроме того, были проведены измерения спектров рентгеновского отражения для обоих образцов, построены и проанализированы карты рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Просвечивающая электронная микроскопия

Образец № 1-LG был исследован методом ПЭМ в геометрии поперечного скола (110) на электронном микроскопе JEM2100F (Jeol) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образец подготавливался по общепринятой методике, включающей утонение с помощью прецизионной шлифовки и распыление ионами аргона на конечном этапе до перфорации.

Полученное на рис. 3 ПЭМ изображение позволяет идентифицировать области МБС, поглощающего слоя InGaAs и контактных слоев InAl(Ga)As. Подложка InP на изображении находится снизу и отделена от метаморфной гетероструктуры яркой белой полосой. В МБС наблюдается большое количество дислокаций несоответствия, которые проявляются в виде горизон-

Поверхность

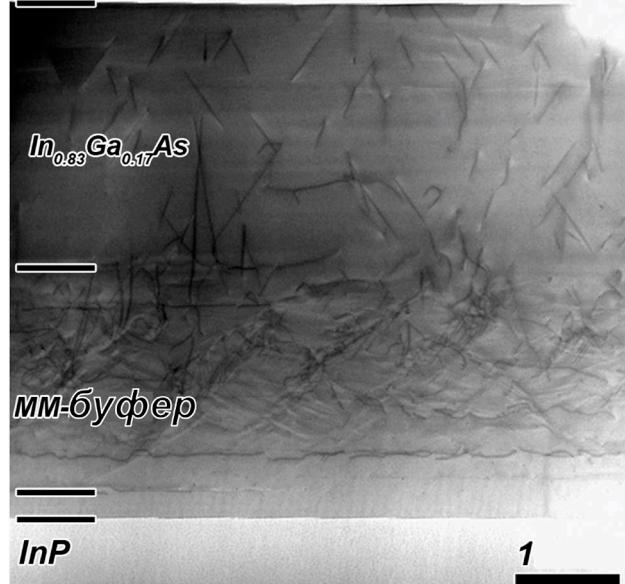


Рис. 3. ПЭМ изображение образца №1-LG

тальных темных полос, и прорастающих дислокаций — наклонных темных линий. Дислокации распределены равномерно по толщине МБС, и грубая оценка плотности протяженных дефектов в буферном слое составляет $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Из рис. 3 видно, что часть дислокаций залегает непосредственно под гетероинтерфейсами вставок InAs/InAlAs, особенно на начальных стадиях роста МБС. Также наблюдается изгиб прорастающих дислокаций на различных гетероинтерфейсах в структуре, в том числе в области сверхрешеток DGSL, однако полное их загибание и аннигиляция происходят реже.

Ранее, при исследовании тестовых гетероструктур МБС с линейным градиентом состава наблюдалось существование бездислокационной области d_{free} [9]. По текущим изображениям нельзя говорить о существовании d_{free} , и плотность дефектов в данном образце намного превышает плотность дефектов в тестовой структуре МБС. Так, плотность прорастающих дислокаций, обнаруженных в функциональных слоях гетероструктуры $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ и $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$, по ПЭМ изображениям в геометрии поперечного сечения составляет $\sim 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, тогда как в тестовой структуре плотность дислокаций в слое $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ толщиной 500 нм оказалась меньше предела обнаружения метода, т. е. $< 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ [9]. Возможно, это связано с отсутствием инверсной ступени в градиенте состава InAlAs, которая была введена в конструкцию МБС тестовой структуры. Отсутствие инверсной ступени также могло повлиять на плотность прорастающих дислокаций в поглощающем слое InGaAs.

3.2. Рентгеновская дифрактометрия и карты рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве

Представление о наличии упругих напряжений, дислокациях несоответствия, разориентации кристаллической решетки можно получить из карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве [13]. Карта рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве представляет собой проекцию трехмерной интенсивности отражения рентгеновских лучей от образца на ортогональные оси обратного пространства $qX <110>$ и $qZ [001]$, параллельные поверхности гетероструктуры и нормали к поверхности гетероструктуры соответственно. Карта обратного пространства представляет собой набор контуров равной интенсивности, наибольший вклад в которую вносят

дифракционные отражения от выбранного семейства кристаллических плоскостей. Регистрация рассеянного рентгеновского излучения (РИ) происходит в угловых координатах $\omega-2\theta$, которые затем пересчитываются в приведенные координаты обратного пространства qX и qZ . Для получения дифракционных спектров рентгеновского отражения использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-8 (Буревестник, Россия) с установленным монохроматором Бартельса и острофокусной рентгеновской трубкой с типом излучения $\text{CuK}\alpha_1 = 1.5406 \text{ \AA}$. Преобразование и обработка карт была выполнена в сопутствующем программном обеспечении Reciprocal Space Mapping от компании Буревестник.

Для образцов были построены и проанализированы карты рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве для отражений (224) (рис. 4). Карты рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве в случае асимметричного отражения, например, от набора плоскостей (224), позволяют судить об остаточных напряжениях в эпитаксиальных слоях. На рис. 4а и 4б широкие максимумы высокой интенсивности характеризуют дифракцию на функциональных слоях $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ образцов № 1-LG и № 2-NLG соответственно. На изображениях, приведенных на рис. 4, проведены условные линии, характеризующие полностью релаксированное (сплошная линия) и полностью псевдоморфное (штриховая линия) по отношению к подложке состояние кристалла [14]. Линия полной релаксации для отражения (224) всегда проходит через пик подложки, поэтому, изучив положение максимума InGaAlAs относительно данной линии, можно сделать вывод о степени релаксации этого слоя. В обоих из рассматриваемых образцов линии релаксации проходят рядом с рефлексом от слоев InGaAlAs, однако не пересекают его максимум. Таким образом, активные слои как в образце № 1-LG, так и в образце № 2-NLG являются частично релаксированными.

О несовершенстве кристаллической решетки выращенных слоев можно судить по измерениям симметричных (004) отражений образцов, поскольку уширение контуров интенсивности вдоль направления qX указывает на существование дислокаций или мозаичной структуры, а уширение вдоль направления qZ отражает флюктуацию перпендикулярной составляющей параметра решетки [15]. Примем направление [110] падения рентгеновского пучка вдоль базового среза подложки за азимутальный угол 0° , а на-

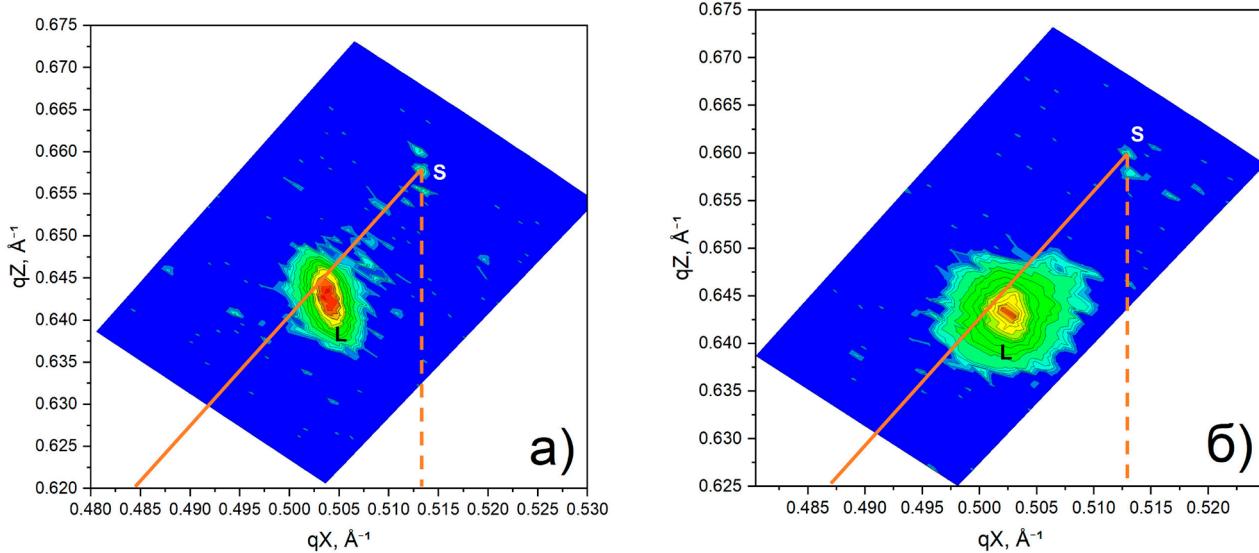


Рис. 4. Карты обратного пространства для асимметричного (224) отражения: а) образец №1-LG, б) образец №2-NLG. Обозначения S и L соответствуют максимумам отражения от подложки InP и активных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$. Оранжевые линии соответствуют полностью релаксированному (сплошная) и псевдоморфному (штриховая) состояниям

правление [110], перпендикулярное базовому срезу, за азимут 90° . Картинки рентгеновского рассеяния от набора отражающих плоскостей (004) образцов №1-LG и №2-NLG в обратном пространстве изображены на рис. 5. Более узкий и интенсивный максимум в верхней части всех изображений соответствует подложке InP и сопоставим с угловой координатой $2\theta = 63.34^\circ$.

Рассмотрим рис. 5а для симметричного отражения образца №1-LG с азимутальным углом 0° , соответствующим направлению qX [110]. Непрерывная зелёная область средней интенсивности, вытянутая вдоль оси qZ , характерна для МБС с плавным градиентом состава. Экспериментальный максимум от функциональных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ (отдельные максимумы от каждого слоя сложно различимы из-за слишком близких значений постоянной решетки), расположенный ниже по оси qZ , смешен по оси qX относительно максимума подложки, и по сравнению с ним имеет более выраженную эллиптичность. Координата пика $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ по оси qZ соответствует углу $2\theta = 61.79^\circ$. Данный пик по сравнению с пиком подложки намного более растянут по обеим осям, а его ширина в направлении qX превышает в несколько раз разброс по qZ . Таким образом, можем предполагать, что в активных слоях данного образца в большей мере присутствуют локальные релаксированные области, нежели области с упругодеформированной решеткой [15].

На картине рассеяния образца №2-NLG с аналогичными условиями, изображенной на рис. 5в, максимумы интенсивности дифракции на подложке и на активном слое наблюдаются в тех же положениях по оси qZ . Однако в случае образца №2-NLG на картах обратного пространства практически отсутствует непрерывно растянутый по оси qZ рефлекс от градиентного буферного слоя. Кроме того, в отличие от образца №1-LG, максимум слоя InGaAs лежит на прямой $qX = 0$ и вытянут в основном вдоль оси qZ , при этом диффузионное рассеяние вдоль оси qX для него выражено намного меньше, нежели на рис. 5а. Как отмечалось выше, уширение пика вдоль qZ может быть связано с флуктуацией постоянной решетки в направлении, перпендикулярном плоскостям сканирования. Таким образом, существенное размытие максимума вдоль вертикальной оси может означать существование локальных деформированных областей кристаллической решетки и неоднородного распределения напряжений по кристаллу.

Полуширина пиков интенсивности отраженного рентгеновского излучения по оси ω в угловых координатах прямого пространства $\omega-2\theta$ характеризует дефектность структуры, вклад в которую в метаморфной гетероструктуре преимущественно осуществляют дислокации несответствия с винтовой компонентой. По оценке зависимости полуширины пиков интенсивности относительно оси ω от нормального параметра

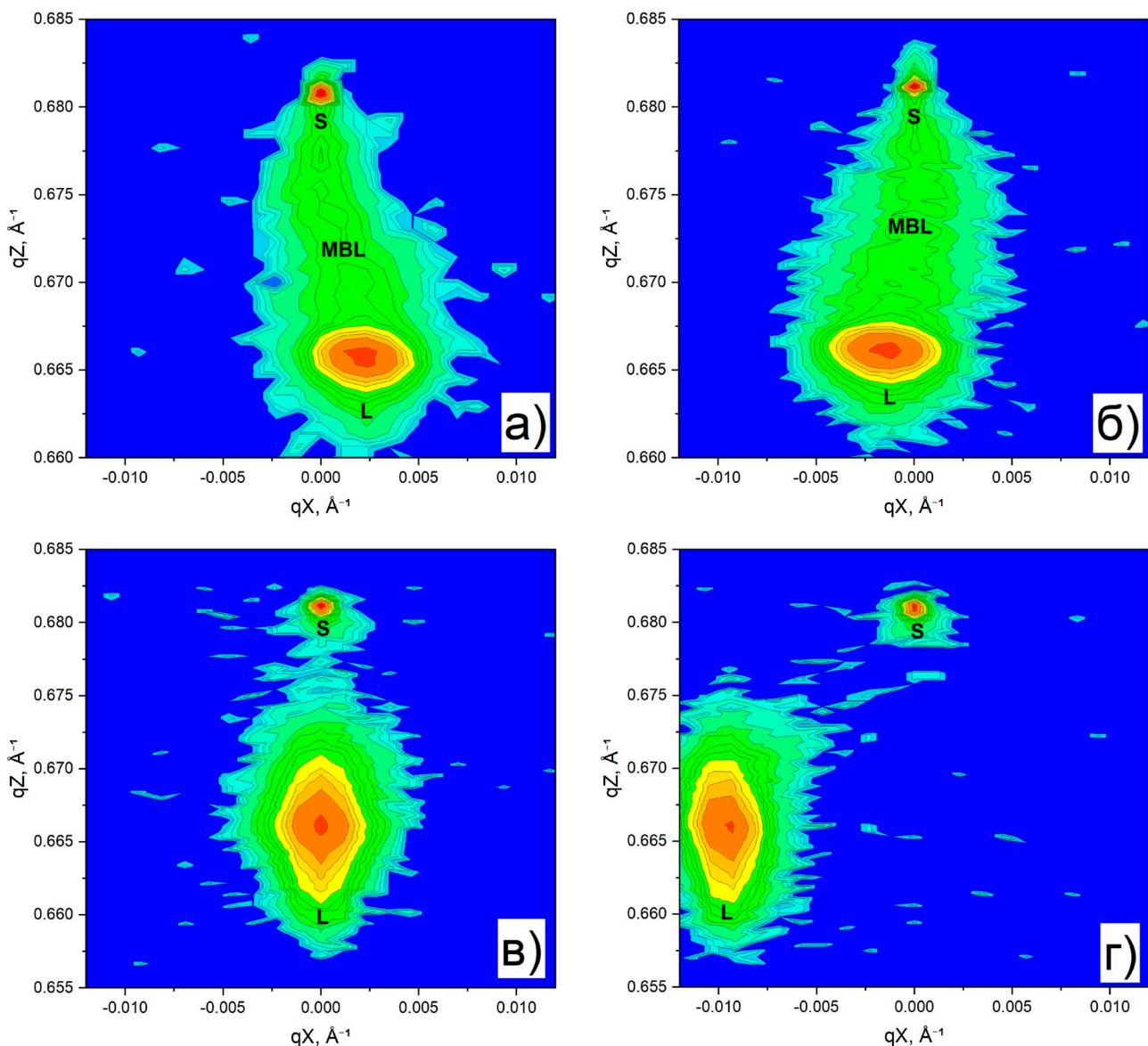


Рис. 5. Карты обратного пространства для симметричного (004) отражения образца №1-LG (сверху) для азимутальных углов 0° (а) и 90° (б) и образца №2-NLG (снизу) для 0° (в) и 90° (г). Обозначения S, L и MBL соответствуют максимумам отражения от подложки InP, активных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ и метаморфического буферного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$

тра решетки $c = 2\lambda/\sin(\theta)$ [16], а также на основе снимков ПЭМ, можем охарактеризовать распределение дефектов в образце №1-LG. Результаты показывают, что дефектность линейного МБС с толщиной сначала возрастает, является максимальной в средней и верхней части буферного слоя, а затем немного уменьшается непосредственно перед формированием DGSL и поглощающего слоя.

Заметим, что при повороте образца №1-LG на азимутальный угол 90° (рис. 5б) латеральная координата максимума $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ изменяет знак относительно оси $qX = 0$, при этом положе-

ние пика по оси qZ не изменяется. Однако, как и в случае, изображенном на рис. 5а, пятно интенсивности от линейного МБС сдвигается равномерно в сторону соответственно положительных или отрицательных qX . Исходя из изображения рис. 5г для сканирования образца №2-NLG с азимутальным углом 90° , при повороте образца с корневым МБС на 90° также наблюдается расхождение между координатами максимума поглощающего слоя, однако здесь изменение координаты относительно $qX = 0$ происходит скачкообразно.

Несовпадение координат максимумов активных слоев и подложки в направлении qX для рас-

сматриваемого случая симметричного отражения свидетельствует о разориентации кристаллической решетки активных слоев относительно плоскости (001) [15]. Угол разориентации эпитаксиального слоя по отношению к подложке имеет компоненту наклона и разворота, или кручения. В решеточно-рассогласованных гетероструктурах на подложках с ориентацией (001) разориентация может возникать вследствие неравномерного распределения дислокаций по поверхности относительно направлений [110] и [110] [17]. Это приводит к анизотропии остаточных напряжений вдоль этих направлений и может влиять на угол разориентации.

По картам обратного пространства в геометрии симметричных отражений возможно количественно оценить углы наклона и разворота кристаллической решетки активного слоя относительно плоскости подложки (001). Для расчетов воспользуемся соотношениями, приведенными в [18, 19]:

$$\operatorname{tg}(\alpha_{0^\circ, 90^\circ}) = \frac{|\Delta qX^{004}|_{0^\circ, 90^\circ}}{4/a_{\text{sub}} - |\Delta qZ^{004}|_{0^\circ, 90^\circ}},$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \alpha_{0^\circ} / \alpha_{90^\circ},$$

где $a_{\text{sub}} = 5.8687 \text{ \AA}$ — постоянная решетки подложки, qX^{004} — разность координат qX максимумов слоя и подложки при симметричном сканировании (004), qZ^{004} — разность координат qZ максимумов слоя и подложки при симметричном сканировании (004), α_{0° и α_{90° — углы наклона кристаллической решетки при азимутальных углах 0° и 90° , φ — азимут нулевого наклона слоя.

Из рис. 5а и 5б, согласно приведенным формулам, получаем углы наклона $\alpha_{0^\circ} = 0.19^\circ$ и $\alpha_{90^\circ} = 0.12^\circ$, а $\varphi = 57.7^\circ$. Проведя аналогичные расчеты, используя данные, представленные на рис. 5в и 5г для образца №2-NLG, получаем $\alpha_{0^\circ} = 0^\circ$, $\alpha_{90^\circ} = 0.82^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Таким образом, в случае корневого МБС основной вклад в разориентацию кристаллической решетки слоя InGaAs вносит наклон слоя относительно плоскости (001), а кручение решетки отсутствует, что также может быть косвенно подтверждено из сканирования по координатам ω - φ . Авторы [17] предполагают, что большие значения углов коррелируют с малой эффективностью релаксации упругих напряжений в структуре посредством образования дислокаций. Таким образом, разориентация кристаллической решетки является вторичным механизмом снятия остаточных напряжений. В случае образца № 2-NLG это может означать, что

на ранних стадиях роста буферного слоя преобладал механизм релаксации через образование дислокаций, а затем для снятия избыточных напряжений возник наклон решетки.

4. Заключение

В рамках данной работы для роста активных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ на подложках InP были предложены две альтернативные конструкции метаморфного буферного слоя: с линейным законом изменения состава и с нелинейным — в рассматриваемом случае имеющем корневую зависимость. Для определения эффективности используемых метаморфных буферных слоев было исследовано кристаллическое качество объемных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$, выращенных на буферных слоях, методом просвечивающей электронной микроскопии и путем анализа карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве. По картам обратного пространства для асимметричных отражений от набора плоскостей (224) показано, что активные слои являются частично релаксированными в гетероструктурах как с линейным, так и с нелинейным буферным слоем, образуя дислокации несоответствия. По картам обратного пространства в геометрии симметричных отражений (004) установлено, что в обоих образцах наблюдается релаксация упругих напряжений через разориентацию кристаллической решетки относительно плоскости подложки. Рассчитанная по изображениям просвечивающей электронной микроскопии плотность прорастающих дислокаций в активных слоях $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$ в гетероструктуре с линейным метаморфным буферным слоем составила $\sim 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Предположительно, для ее снижения и получения в гетероструктуре бездислокационной области, рост линейного метаморфного буферного слоя необходимо завершать инверсной ступенью с поднятием мольной доли индия в составе буферного слоя относительно состава активных слоев.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Galiev G. B., Vasil'evskii I. S., Pushkarev S. S., ... Dwir E. I. Suvorova metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs/GaAs HEMT heterostructures containing strained superlattices and inverse steps in the metamorphic buffer. *Journal of Crystal Growth*. 2013;366: 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2012.12.017>
2. Kettler T., Karachinsky L. Ya., Fiol G., ... Ledentsov N. N. Degradation-robust single mode continuous wave operation of 1.46 μm metamorphic quantum dot lasers on GaAs substrate. *Applied Physics Letters*. 2006;89(4): 041113. <https://doi.org/10.1063/1.2236291>
3. Егоров А. Ю., Каракинский Л. Я., Новиков И. И., Бабичев А. В., Неведомский В. Н., Бугров В. Е. Оптические свойства метаморфных гетероструктур GaAs/InAlGaAs/InGaAs с квантовыми ямами InAs/InGaAs, излучающих в спектральном диапазоне 1250–1400 нм. *Физика и техника полупроводников*. 2016;50(5): 624–627. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27368884>
4. Егоров А. Ю., Каракинский Л. Я., Новиков И. И., Бабичев А. В., Березовская Т. Н., Неведомский В. Н. Метаморфные брэгговские отражатели спектрального диапазона 1440–1600 нм: эпитаксия, формирование и зарашивание мезаструктур. *Физика и техника полупроводников*. 2015;49(10): 1434–1438. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24195315>
5. Garcia I., France R. M., Geisz J. F., McMahon W. E., Steiner M. A., Johnston S., Friedman D. J. Metamorphic III–V solar cells: recent progress and potential. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015;6(1): 366–373. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2501722>
6. Liu Y., Ma Y., Li X., ... Gong H. High temperature behaviors of 1–2.5 μm extended wavelength $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ photodetectors on InP substrate. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2021;57(4): 1–7. <https://doi.org/10.1109/JQE.2021.3087324>
7. Gendry M., Drouot V., Santinelli C., Hollinger G. Critical thicknesses of highly strained InGaAs layers grown on InP by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 1992;60(18): 2249–2251. <https://doi.org/10.1063/1.107045>
8. Ji X., Liu B., Tang H., ... Yan F. 2.6 μm MBE grown InGaAs detectors with dark current of SRH and TAT. *AIP Advances*, 2014;4(8): 087135. <https://doi.org/10.1063/1.4894142>
9. Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Соболев М. С., Убыивовк Е. В., Мизеров А. М., Середин П. В. Молекулярно-пучковая эпитаксия метаморфного буфера для InGaAs/InP фотодетекторов с высокой фоточувствительностью в диапазоне 2.2–2.6 мкм. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(1): 20–26. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25.10972>
10. Побат Д. В., Соловьев В. А., Чернов М. Ю., Иванов С. В. Распределение дислокаций несоответствия и упругих механических напряжений в метаморфных буферных слоях InAlAs разной конструкции. *Физика твердого тела*. 2021;63(1): 85–90. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.01.50403.201>
11. Соловьев В. А., Чернов М. Ю., Ситникова А. А., Брунков П. Н., Мельцер Б. Я., Иванов С. В. Оптимизация структурных свойств и морфологии поверхности метаморфного буферного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с корневым профилем изменения состава ($x = 0.05–0.83$), выращиваемого методом молекулярно-пучковой эпитаксии на GaAs (001). *Физика и техника полупроводников*. 2018;52(1): 127–132. <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.01.45331.8626>
12. Chen X., Gu Y., Zhang Y. Epitaxy and device properties of InGaAs photodetectors with relatively high lattice mismatch. *Epitaxy*. 2018; 203. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70259>
13. Fewster P. F. Reciprocal space mapping. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. 1997;22(2): 69–110. <https://doi.org/10.1080/10408439708241259>
14. Bellani V., Bocchi C., Ciabattoni T., ... Trevisi G. Residual strain measurements in InGaAs metamorphic buffer layers on GaAs. *The European Physical Journal B*. 2007;56: 217–222. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2007-00105-8>
15. Fewster P. F. X-ray diffraction from low-dimensional structures. *Semiconductor Science and Technology*. 1993;8(11): 1915. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/11/001>
16. Васильевский И. С., Пушкирев С. С., Грехов М. М., Виниченко А. Н., Лаврухин Д. В., Коленцова О. С. Особенности диагностики метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в режиме ω -сканирования. *Физика и техника полупроводников*. 2016;50(4): 567–573. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25668297>
17. Lee D., Park M. S., Tang Z., Luo H., Beresford R., Wie C. R. Characterization of metamorphic $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ buffer layers using reciprocal space mapping. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(6):063523, <https://doi.org/10.1063/1.2711815>
18. Алешин А. Н., Бугаев А. С., Ермакова М. А., Рубан О. А. Исследование МНЕМТ гетероструктуры с каналом In0.4Ga0.6As, выращенной методом МЛЭ на подложке GaAs, с помощью построения карт обратного пространства. *Физика и техника полупроводников*. 2015;49(8): 1065. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42087>
19. Chauveau J.-M., Androussi Y., Lefebvre A., Persio J. Di, Cordier Y. Indium content measurements in metamorphic high electron mobility transistor structures by combination of X-ray reciprocal space mapping and transmission electron microscopy. *Journal of Applied Physics*. 2003;93(7): 4219–4225. <https://doi.org/10.1063/1.1544074>

Информация об авторах

Василькова Елена Игоревна, аспирант, инженер, СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>
elenavasilkov@gmail.com

Пирогов Евгений Викторович, н. с., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>
zzzavr@gmail.com

Е. И. Василькова и др.

Анализ кристаллического качества объемных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}(\text{Al})_{0.17}\text{As}$...

Неведомский Владимир Николаевич, с. н. с., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7661-9155>

vladimir.nevedomskiy@connector-optics.com

Баранцев Олег Вячеславович, студент, лаборант, СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0001-6873-8488>

ovbarantsev@gmail.com

Воропаев Кирилл Олегович, начальник группы, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>

kirill.voropaev@novsu.ru

Васильев Андрей Андреевич, инженер-технолог, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0009-2615-6795>

Wasiliew.andre@yandex.ru

Карачинский Леонид Яковлевич, д. т. н., гл. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова и вед. н. с. Университета ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

karach@switch.ioffe.ru

Новиков Иннокентий Игоревич, к. ф.-м. н., с. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова и с. н. с. Университета ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

novikov@switch.ioffe.ru

Соболев Максим Сергеевич, к. ф.-м. н., заведующей лабораторией, СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

sobolevsms@gmail.com

Поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 30.04.2024; принята к публикации 06.05.2024; опубликована онлайн 25.03.2025.