

Конденсированные среды и межфазные границы

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

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.911

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния;

1.3.11. Физика полупроводников

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13019>

Исследование кинетики фотолюминесценции объемных слоев GaPN и GaPNAs на подложках кремния, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Е. В. Никитина^{1,2}, А. К. Кавеев¹, В. В. Федоров², Е. В. Пирогов², А. М. Надточий³,
Е. И. Василькова^{2✉}, Н. В. Крыжановская³, М. С. Соболев²

¹ФГБУН «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук»,
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

²ФГБУОН «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж. И. Алферова Российской академии наук»,
ул. Хлопина, 8к3, лит. А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Союза Печатников, д. 16, Санкт-Петербург 190008, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Целью работы является исследование объемных слоев GaPN и GaPNAs, эпитаксиально изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках кремния. Оптические свойства гетероструктур исследовались методом фотолюминесценции. Для оценки времени жизни носителей в объемных слоях GaPN и GaPNAs исследовалась фотолюминесценция с временным разрешением (кинетика фотолюминесценции).

Экспериментальная часть: Проведено исследование влияния буферного слоя на характеристики гетероструктур. Интенсивность фотолюминесценции в объемном слое GaPN для структур с буферным слоем, выращенным с использованием метода «эпитаксии с повышенным темпом миграции» (МЕЕ-GaP буфер), и буферным слоем GaP, выращенным с постепенным поднятием ростовой температуры от 450 до 600 °C, практически совпадает.

Выводы: Показано, что время жизни неосновных носителей заряда в объемном слое GaPN, выращенном на кремниевой подложке, связано в большей мере с дефектами, созданными во время внедрения азота в решетку GaP, а не с дефектами, вызванными ростом на кремниевой подложке.

Ключевые слова: разбавленные нитриды, GaPN(As), фотолюминесценция, кремниевая подложка

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-00032 (<https://rscf.ru/project/23-79-00032/>). Оптические исследования фотолюминесценции с временным разрешением проводились на уникальной научной установке «Комплексный оптоэлектронный стенд» НИУ ВШЭ- Санкт-Петербург.

Для цитирования: Никитина Е. В., Кавеев А. К., Федоров В. В., Пирогов Е. В., Надточий А. М., Василькова Е. И., Крыжановская Н. В., Соболев М. С. Исследование кинетики фотолюминесценции объемных слоев GaPN и GaPNAs на подложках кремния, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(3): 433–440. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13019>

For citation: Nikitina E. V., Kaveev A. K., Fedorov V. V., Pirogov E. V., Nadtochiy A. M., Vasilkova E. I., Kryzhanovskaya N. V., Sobolev M. S. Study of photoluminescence kinetics in bulk GaPN and GaPNAs layers on silicon substrates grown by molecular beam epitaxy. Condensed Matter and Interphases. 2025;27(3): 433–440. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13019>

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

© Никитина Е. В., Кавеев А. К., Федоров В. В., Пирогов Е. В., Надточий А. М., Василькова Е. И., Крыжановская Н. В., Соболев М. С., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Твердые растворы тройных и четверных соединений $A^{III}B^{IV}N$ с мольной долей азота на уровне нескольких процентов формируют новое семейство перспективных материалов для оптоэлектронных устройств – так называемые «разбавленные нитриды». Эти твердые растворы перспективны для создания оптоэлектронных приборов на основе кремния, например, светодиодов, фотодетекторов, лазеров, а также высокoeffективных многопереходных солнечных элементов [1]. Добавление менее одного процента атомной доли азота в решетку фосфида галлия (GaP) приводит к возникновению прямозонного материала GaPN. Увеличение мольной доли азота в тройных и четверных соединениях $A^{III}B^{IV}N$ приводит к резкому уменьшению ширины запрещенной зоны с одновременным уменьшением постоянной решетки [2, 3]. Такая необычная особенность разбавленных нитридов возникает из-за того, что при замещении небольшой доли элементов пятой группы (P и/или As) атомами N в таких растворах существенно модифицируется зона проводимости, а именно происходит ее расщепление и образование двух непарараблических подзон (E^- и E^+). Модель межзонного взаимодействия (Band Anticrossing Model, BAC-модель, модель антипересечения зон), описывающая формирование новой зонной структуры, была предложена и развита в работе [4]. Добавление атомов мышьяка в GaPN и создание четверного твердого раствора при варьировании соотношения элементов пятой группы позволяет изменять ширину запрещенной зоны в широком диапазоне от 1.5 до 2.0 эВ, сохраняя при этом соответствие решетки кремниевым подложкам [5]. Однако экспериментальные исследования демонстрируют низкое время жизни неосновных носителей заряда в активных слоях GaPNAs, выращенных на подложках фосфида галлия и кремния методами MOCVD [6] и MBE [7], что связано с образованием большого числа дефектов. Снижение плотности дефектов в твердых растворах GaPN(As), выращенных на подложках кремния, возможно при оптимизации конструкции буферных слоев, а также оптимизации параметров эпитаксиального выращивания слоев разбавленных нитридов. Сложность формирования буферных слоев фосфида галлия на поверхности кремния связана с возможностью возникновения химической реакции на границе этих материалов: атомы галлия могут растратливать поверхность кремния, приводя к

образованию ямок [8]. Широко распространенным в настоящее время для создания переходного слоя между подложкой кремния и активным слоем на основе разбавленных нитридов является метод эпитаксиального роста с повышенной миграцией MEE-GaP буфер [9], при котором потоки фосфора и галлия при пониженной температуре подаются на подложку поочередно, однако данный технологический прием неизбежно снижает ресурс заслонок установки молекулярно-пучковой эпитаксии [10]. Альтернативным методом эпитаксиального создания буферных слоев GaP на кремниевой подложке, как показано в работе [11], может служить рост буферного слоя, состоящего из низкотемпературного (440 °C) и высокотемпературного (580 °C) слоев объемного GaP.

В нашей работе были изучены характеристики гетероструктур, содержащих в качестве активного слоя объемный слой тройного GaPN или четверного GaPN(As) твердого раствора, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на кремниевых подложках, методами фотолюминесценции, рентгеновской дифрактометрии, а также исследовалась фотолюминесценция с временным разрешением (кинетика фотолюминесценции).

2. Экспериментальная часть

Исследуемые эпитаксиальные структуры были изготовлены методом МПЭ на установке Veeco Gen III с высокочастотным источником индуктивно связанный азотной плазмы на подложках Si (001) с разориентацией на 4° в направлении [100]. Использование разориентированных в направлении [100] кремниевых подложек необходимо для предотвращения появления антифазных областей на гетерогранице кремний – фосфид галлия. С той же целью на поверхность кремния осаждался монослой фосфора после отжига подложки в ростовой камере.

Исследуемые образцы представляли собой объемный слой тройного или четверного твердого раствора материала GaPN(As), выращенный на буферном слое. Образец №1 имеет MEE-GaP буферный слой на основе 45 периодов послойного роста галлия и фосфора [9] и последующего слоя GaP 50 нм, выращенного при температуре 450 °C. Буферный слой остальных образцов имеет тонкий подслой (1 нм) AlP, выращенный при температуре 450 °C, затем слой GaP с постепенным поднятием ростовой температуры до 600 °C. Слой AlP в образцах служит для предо-

твращения протравливания поверхности кремниевой подложки атомами галлия. Слой GaPN для образцов № 1 и № 2 выращивался в одинаковых ростовых условиях, где поток азота составлял 0.3 мл/мин. В образце № 3 для увеличения мольной доли азота в слое GaPN была увеличена мощность высокочастотного азотного источника с 225 Вт (для образцов № 1 и № 2) до 250 Вт при потоке азота 0.35 мл/мин. В образце № 4 выращивался слой GaPNAs, при этом мощность высокочастотного азотного источника составляла 250 Вт при таком же потоке азота, а соотношение потока мышьяка к суммарному потоку мышьяка и фосфора составляло 0.1.

Дифракционные кривые качания были получены при помощи рентгеновского дифрактометра ДРОН-8 с острофокусной рентгеновской трубкой БСВ 29. Материалом анода являлась медь с типом излучения $K\alpha 1$ ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$). Спектры фотолюминесценции зарегистрированы при помощи установки компании Accent Optical Technologies. Структуры исследовались методом фотолюминесценции (ФЛ) в спектральном диапазоне от 500 до 800 нм при комнатной температуре. Для оптической накачки структур использовался твердотельный лазер с длиной волны 266 нм в непрерывном режиме работы с плотностью мощности оптической накачки 12 Вт/см².

Исследование ФЛ с временным разрешением проводилось методом ап-конверсии на установке дифференциального измерения кинетики флуоресценции в видимом диапазоне FOG-100-DX-IR. Для стробирования и накачки образцов использовались лазерные импульсы длительностью 120 фс с частотой 80 МГц с длиной волны 780 нм, получаемые перестраивающимся титан-сапфировым лазером Coherent Mira 900D с максимальной средней мощностью 1.5 Вт. Для реализации накачки образцов импульс накачки пропускался через систему удвоения частоты на основе нелинейного кристалла ВВО ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ или бората β -бария). Таким образом накачка образов при исследовании временных зависимостей ФЛ осуществлялась на длине волны 395 нм, а стробирование производилось исходным импульсом с длиной волны – 780 нм.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции исследуемых образцов, полученные при комнатной температуре. Образцы № 1 и № 2 имеют разные буферные слои, но одинаковые ростовые параметры слоя GaPN. Из данных ФЛ видно, что интенсивность ФЛ второго образца на 20 % больше, при этом пик фотолюминесценции сдвигается в длинноволновую область. Из этого можно сделать предположение, что во

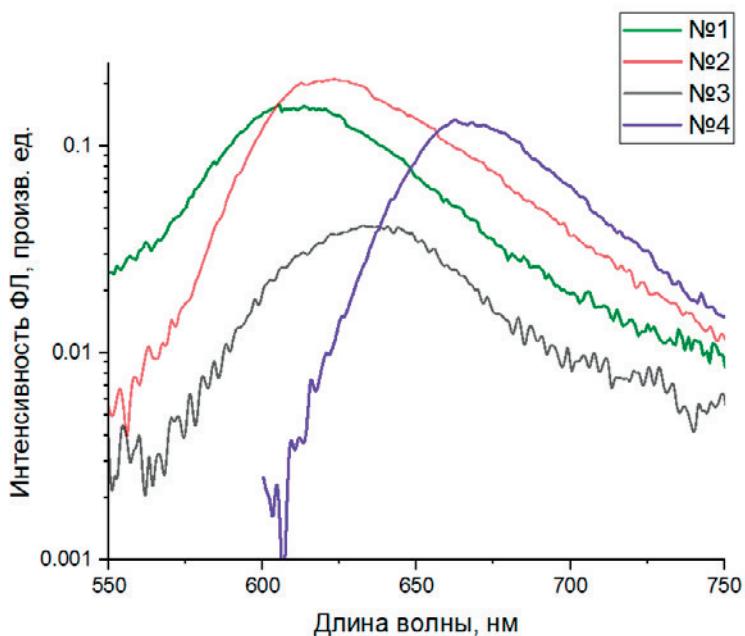


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции образцов с объемным слоем на основе тройных GaPN (образцы № 1, № 2, № 3) и четверных GaPNAs (образец № 4) твердых растворов, полученные при комнатной температуре

втором образце произошло лучшее встраивание азота в решетку GaP, и градиентный буферный слой позволяет получать GaPN слои с более интенсивной фотолюминесценцией по сравнению с широко распространенным MEE-GaP буферным слоем. Как будет показано ниже методом рентгеновской дифракции, это происходит из-за различных механизмов релаксации напряжения.

При росте образца № 3 поток азота был увеличен по сравнению с образцами № 1 и № 2. Энергия максимума фотолюминесценции образцов уменьшается по мере увеличения содержания азота в эпитаксиальном слое, соответственно и ширина запрещенной зоны уменьшается (длина волны излучения сдвигается в длинноволновую сторону). При увеличении содержания азота в твердом растворе обычно наблюдается резкое падение интенсивности пика фотолюминесценции, как показано в работе [12],

возможно связанное с тем, что при внедрении азота образуются глубокие уровни, работающие как центры безызлучательной рекомбинации. В нашем случае пиковая интенсивность ФЛ образца № 3 более чем в 5 раз ниже, чем для образца № 2. Также падение интенсивности ФЛ для образца № 3 может быть связано с тем, что объемный слой GaPN уже не является решеточно-согласованным по постоянной решетки с кремнием, что было подтверждено методом рентгеновской дифракции и будет обсуждаться далее, см. рис. 2.

При добавлении атомов мышьяка в твердый раствор GaPN можно подобрать соотношение материалов пятой группы так, чтобы получить решеточно-согласованный с кремнием материал, так как азот уменьшает, а мышьяк увеличивает постоянную решетки. В образце № 4 параметры источника азота во время роста слоя GaPNAs были такие же, как и для образца № 3, а соотношение потоков As и P было равно 0.1. В результате добавления мышьяка интенсивность ФЛ образца № 4 выросла по сравнению с образцом № 3 более чем в 3 раза, при этом длина волны сдвинулась в длинноволновую область до значения 665 нм.

На рис. 2 представлены рентгенодифракционные кривые качания исследуемых структур около симметричного рефлекса Si. Черной вертикальной линией обозначено теоретическое положение дифракционного максимума механически ненапряженного слоя GaP. Также приведены расчетные дифракционные кривые от слоев GaP различной степени релаксации на подложке кремния.

Расчетное положение дифракционного максимума от слоя GaP в образце № 1 соответствует полностью псевдоморфному слою. Анализ положения пика от GaAsN слоя показал содержание азота около 1.5 %. Положения максимумов от слоев GaP в образцах № 2, № 3 и № 4 указывают на приблизительную степень релаксации порядка 55 %, что следует из сравнения экспериментальных данных с данными моделирования. Это может быть связано с возникновением дислокаций на начальных стадиях роста, что в свою очередь приводит к частичной релаксации упругих напряжений эпитаксиального слоя в данных образцах, и постоянная решетка эпитаксиального слоя GaP приближается к постоянной решетке механически ненапряженного слоя GaP. Несмотря на большую разницу по положению дифракционного максимума, мольная

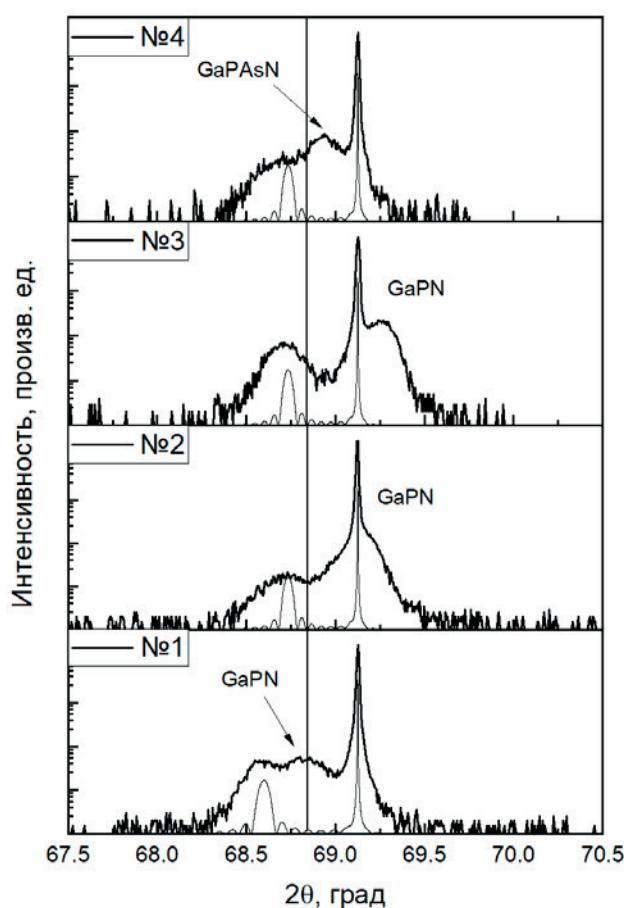


Рис. 2. Рентгенодифракционные кривые качания около симметричного рефлекса Si образцов с объемным слоем на основе тройных GaPN (образцы №1, №2, №3) и четверных GaPNAs (образец №4) твердых растворов

доля азота в GaPN в образце № 1 приближается по своему значению к слою в образце № 2, содержание азота в котором составляет порядка 1.8 %. Эта разница связана со сдвигом дифракционных пиков вправо область вследствие релаксации напряжений в эпитаксиальных слоях, что особенно заметно в образце № 3. Расчетная мольная доля азота в нем составляет около 2.24 %, однако максимум дифракционного пика от GaPN существенно сдвинут в сторону больших углов, в то время как содержание азота порядка 2.1 % должно приводить к совпадению пиков слоя GaPN и подложки кремния. В образце № 4 наблюдается эффект увеличения постоянной решетки при добавлении 10 % мышьяка в слой GaPN(As) с мольной долей азота, как в структуре № 3.

В табл. 1 представлены значения молярной доли азота, определенные из анализа рентгено-

дифракционных кривых качания и рассчитанные по ВАС-модели (Band Anticrossing Model, модель антипересечения зон) [4].

В работе [13] было показано, что на коэффициент полезного действия многопереходных солнечных элементов на основе твердых растворов GaPNAs в качестве верхних переходов и кремниевой подложки в качестве нижнего перехода также сильно влияет такой важный параметр материала, как время жизни неосновных носителей заряда. Поэтому были выполнены исследования кинетики фотолюминесценции структур с объемным слоем GaPN при комнатной температуре и при 5 К. На рис. 3 представлены зависимости спада интенсивности ФЛ при комнатной температуре от времени для длины волны света, соответствующей пику интенсивности ФЛ.

Таблица 1. Основные характеристики GaPN(As) гетероструктур на подложке кремния

Номер образца	Длина волны ФЛ, нм	Состав твердого раствора GaPNAs			$\tau_{1/e}$, пс	
		Мольная доля N		Мольная доля As	5 К	300 К
		PL	XRD			
1	612	0.0145	0.0149	—	2867	42
2	620	0.0175	0.018	—	3678	44
3	636	0.022	0.0224	—	488	35
4	663	0.022	0.0224	0.1	—	11

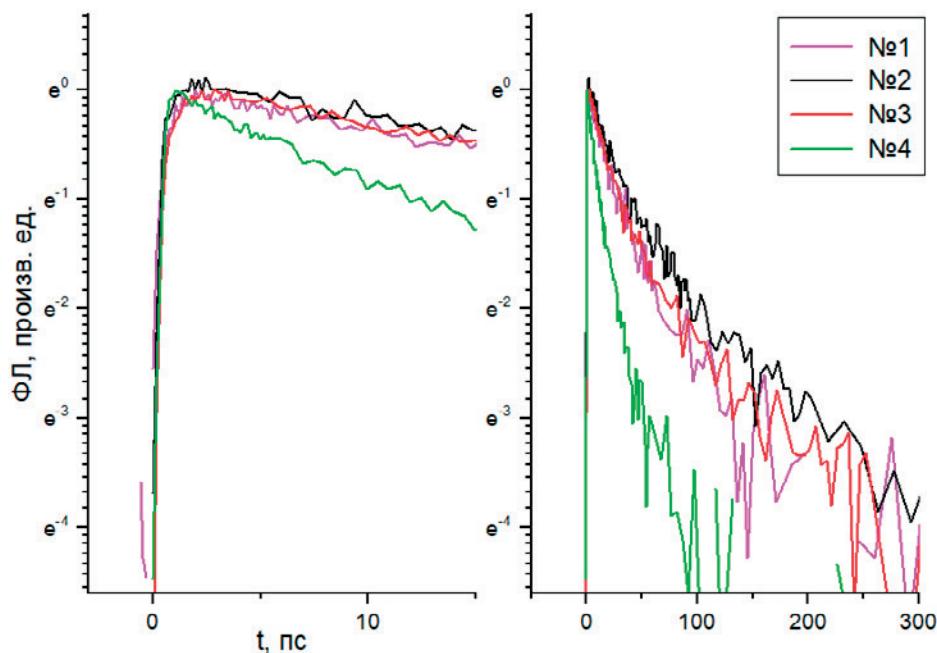


Рис. 3. Временная (нормированная) эволюция интенсивности ФЛ образцов с активной областью на основе слоев GaPN, полученная при 300 К для длины волны излучения 620 нм (образцы № 1, № 2, № 3) и 650 нм (образец № 4) и представлена в двух временных отрезках (0–15 пс – левая панель, 0–300 пс – правая панель)

Для всех исследованных образцов наблюдалась ФЛ с достаточно малым временем затухания интенсивности, которая, однако, не характеризуется моноэкспоненциальным спадом. Время ФЛ, оцененное по уровню $1/e$ от максимального значения интенсивности, составило около 40 пс для образцов с GaPN слоем и 11 пс для образца с GaPNAs слоем. Для объемных слоев GaPN, выращенных на подложках фосфида галлия, время жизни неосновных носителей соизмеримо и составляет 70–100 пс [14]. Таким образом, низкое время жизни неосновных носителей в слоях GaPN, выращенных на кремниевой подложке, связано в большей мере с дефектами, созданными во время внедрения азота в решетку GaP, а не из-за дефектов, вызванных ростом на кремниевой подложке.

Исследования временной динамики интенсивности фотолюминесценции были выполнены при температуре 5 К. На рис. 4 приведены зависимости спада интенсивности ФЛ для образцов с GaPN объемным слоем (образцы № 1, № 2 и № 3). На левой панели показана начальная часть временноОй зависимости интенсивности ФЛ, на правой показан полный исследованный диапазон. Необходимо отметить наличие постоянной составляющей во временных зависимостях, которая проявляется как наличие заметного уровня сигнала ФЛ до момента прихода импульса накачки. Это свидетельствует о наличии медленных механизмов спада ФЛ, превышающих по характеристическому времени период следования импульсов накачки.

Из сравнения зависимостей спада сигнала ФЛ структур при комнатной (рис. 3) и температуре 5 К (рис. 4) температурах хорошо видно, что время спада сигнала ФЛ для всех структур возрастает при понижении температуры. Так, например, для образца № 3 время спада сигнала ФЛ до уровня $1/e$ от своего максимального значения интенсивности увеличилось до 488 пс при изменении температуры от комнатной до криогенной (5 К). При этом стоит отметить, что при низких температурах временной спад сигнала ФЛ выглядит моноэкспоненциальным. Таким образом, можно заключить, что снижение температуры кардинально увеличивает жизни неосновных носителей в структурах GaPN, выращенных на подложке кремния.

В табл. 1 представлены основные полученные характеристики исследуемых гетероструктур с объемным слоем GaPN(As) на подложке кремния.

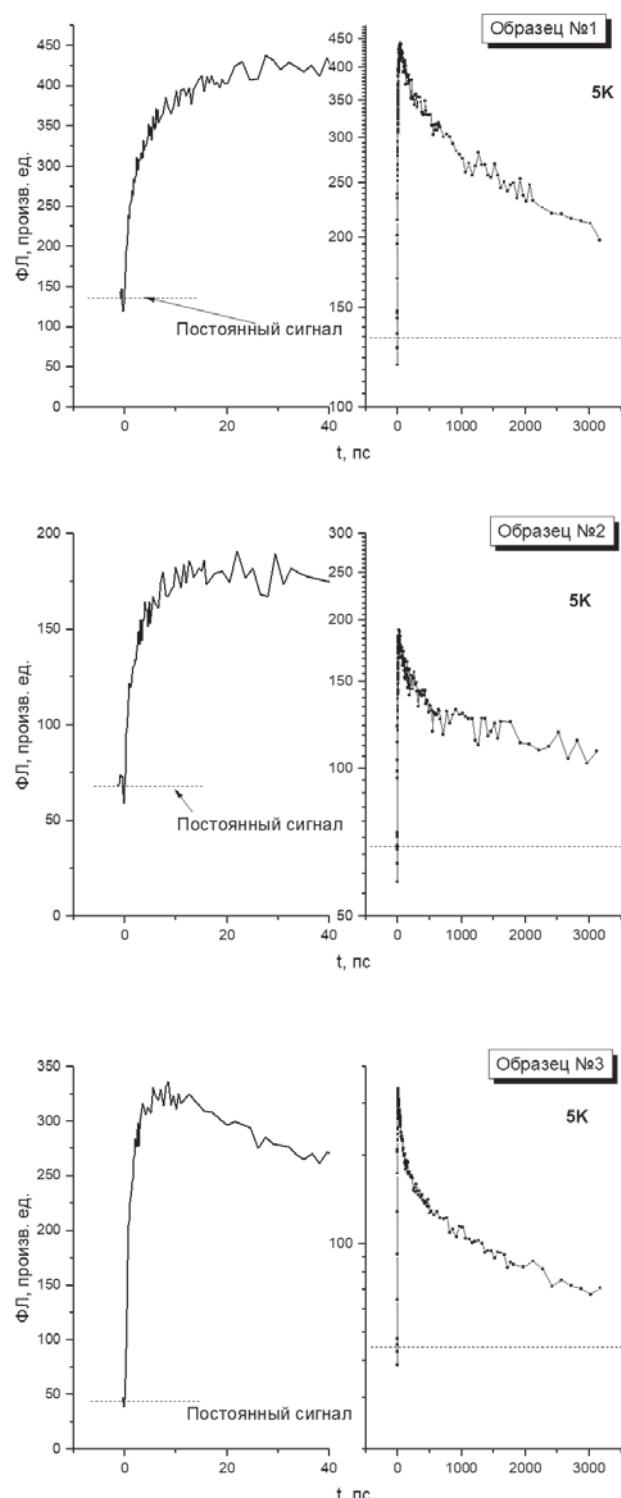


Рис. 4. Временная эволюция интенсивности ФЛ образцов с активной областью на основе слоев GaPN, полученная при 5 К для длины волны излучения 620 нм и представлена в двух временных отрезках (0–40 пс – левая панель, 0–3000 пс – правая панель)

4. Выводы

В настоящей работе проведены исследования гетероструктур с объемным слоем на основе тройных GaPN и четверных GaPNAs твердых растворов, выращенных методом МПЭ на подложках кремния. Рассмотрены два варианта буферного слоя: МЕЕ-GaP буфер и низкотемпературный GaP буфер с градиентно изменяющейся температурой. Показано, что в низкотемпературном градиентном буферном слое происходит частичная релаксация упругих напряжений со степенью релаксации порядка 55 %. В результате такой релаксации напряжения увеличивается мольная доля встраиваемого азота в матрицу GaP, что приводит к длинноволновому сдвигу пика фотолюминесценции. Увеличение потока азота приводит к увеличению мольной доли азота в твердом растворе GaPN, сдвигу длины фотолюминесценции в длинноволновую сторону и резкому падению интенсивности ФЛ. Добавление мышьяка в твердый раствор GaPN и создание четверного твердого раствора $\text{GaP}_{0.88}\text{N}_{0.02}\text{As}_{0.1}$ позволяет достичь максимума ФЛ на длине волны 663 нм при комнатной температуре, при этом интенсивность ФЛ вырастает в три раза по сравнению с $\text{GaP}_{0.98}\text{N}_{0.02}$.

В работе были проведены исследования зависимости кинетики фотолюминесценции гетероструктур от состава исследуемых объемных слоев GaPN и GaPNAs. Время спада интенсивности ФЛ при комнатной температуре, оцененное по уровню 1/e от максимального значения интенсивности, составило около 40 пс для образцов со слоем GaPN и 11 пс для образца со слоем GaPNAs. Уменьшение температуры измерения кинетики фотолюминесценции кардинально увеличивает время жизни неосновных носителей в структурах GaPN, выращенных на подложке кремния.

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. Henini M. *Dilute nitride semiconductors*. Elsevier; 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044502-1.X5000-8>
2. Shan W., Walukiewicz W., Yu K. M., ... Tu C. W. Nature of the fundamental band gap in $\text{GaN}_{x}\text{P}_{1-x}$ alloys. *Applied Physics Letters*. 2000;76: 3251. <https://doi.org/10.1063/1.126597>
3. Buyanova I. A., Pozina G., Bergman J. P., Chen W. M., Xin H. P., Tu C. W. Time-resolved studies of photoluminescence in $\text{GaN}_{x}\text{P}_{1-x}$ alloys: evidence for indirect-direct band gap crossover. *Applied Physics Letters*. 2002;81(1): 52–54. <https://doi.org/10.1063/1.1491286>
4. Kent P. R. C., Zunger A. Theory of electronic structure evolution in GaAsN and GaPN alloys. *Physical Review B*. 2001;64(11): 115208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.115208>
5. Geisz J. F., Friedman D. J. III-N-V semiconductors for solar photovoltaic applications. *Semiconductor Science and Technology*. 2002;17(8): 769–777. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/17/8/305>
6. Geisz J. F., Olson J. M., Friedman D. J., Jones K. M., Reedy R. C., Romero M. J. Lattice-matched GaNPAs-on-silicon tandem solar cells. In: *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2005. (pp. 695–698). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488226>
7. Baranov A. I., Gudovskikh A. S., Nikitina E. V., Egorov A. Y. Photoelectric properties of solar cells based on GaPNAs/GaP heterostructures. *Technical Physics Letters*. 2013;39: 1117–1120. <https://doi.org/10.1134/S1063785013120171>
8. Khouri M., Tottereau O., Feuillet G., Vennégués P., Zúñiga-Pérez J. Evolution and prevention of meltback etching: Case study of semipolar GaN growth on patterned silicon substrates. *Journal of Applied Physics*. 2017;122(10): 105108. <https://doi.org/10.1063/1.5001914>
9. Takagi Y., Yonezu H., Samonji K., Tsuji T., Ohshima N. Generation and suppression process of crystalline defects in GaP layers grown on misoriented Si(100) substrates. *Journal of Crystal Growth*. 1998;187(1): 42–50. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(97\)00862-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(97)00862-2)
10. Volz K., Beyer A., Witte W., Ohlmann J., Németh I., Kunert B., Stolz W. GaP-nucleation on exact Si (001) substrates for III/V device integration. *Journal of Crystal Growth*. 2011;315(1): 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysGro.2010.10.036>
11. Федоров В. В., Федина С. В., Кавеев А. К., Кириленко Д. А., Фалеев Н. Н., Мухин И. С. Формирование однодоменных буферных слоев фосфида галлия на кремниевой подложке без применения метода эпитаксии с повышенной миграцией. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2024;17(2): 120–133. <https://doi.org/10.18721/JPM.17209>
12. Румянцев О. И., Брунков П. Н., Пирогов Е. В., Егоров А. Ю. Исследование дефектов в гетероструктурах с квантовыми ямами GaPAsN и GaPN в матрице GaP. *Физика и техника полупроводников*. 2010;44(7): 923–927. Режим доступа: <https://elibrary.ru/rcqedr>
13. Кудряшов Д. А., Гудовских А. С., Никитина Е. В., Егоров А. Ю. Разработка конструкции многопереходных солнечных элементов на основе гетероструктур GaPNAs/Si методом компьютерного моделирования. *Физика и техника полупроводников*. 2014;48(3): 396–401. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21310756>
14. Никитина Е. В., Соболев М. С., Пирогов Е. В., ... Крыжановская Н. В. Фотолюминесценция сверхрешеток GaPNAs/GaP(N) и объемных слоев GaPN на подложках GaP. *Конденсированные среды и межфазные границы*.

2024;26(3): 490–495. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12224>

Информация об авторах

Екатерина Викторовна Никитина, к. ф.-м. н., в. н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6800-9218>
mail.nikitina@mail.ru

Кавеев Андрей Камильевич, д. ф.-м. н., в. н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3640-677X>
kaveev@mail.ioffe.ru

Максим Сергеевич Соболев, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>
sobolevsm@gmail.com

Евгений Викторович Пирогов, н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

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

Алексей Михайлович Надточий, к. ф.-м. н., в. н. с., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0982-907X>
anadtochiiy@hse.ru

Елена Игоревна Василькова, аспирант, инженер, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

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

Крыжановская Наталья Владимировна, д. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-4945-9803>
nkryzhanovskaya@hse.ru

Поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 15.11.2024; опубликована онлайн 25.09.2025.