

## **ПРИМЕСНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ПРИ МЕЖЗОННОМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ**

Представлены результаты экспериментального исследования примесной фотолюминесценции дальнего (терагерцового) и ближнего ИК спектральных диапазонов в структурах с квантовыми ямами  $n$ -GaAs/AlGaAs различной ширины при межзонном фотовозбуждении электронно-дырочных пар. В спектрах фотолюминесценции в дальнем ИК диапазоне обнаружены оптические переходы электронов между первой подзоной размерного квантования и основным состоянием донорной примеси, а также между возбужденным и основным состояниями донорной примеси. Наблюдение этих оптических переходов стало возможным, благодаря опустошению основного состояния донора в квантовой яме за счет излучательных переходов носителей заряда с основного донорного состояния в первую подзону размерного квантования дырок в квантовой яме. Экспериментально показана возможность перестройки длины волны терагерцового излучения структур с легированными квантовыми ямами за счет изменения ширины квантовых ям.

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, ИЗЛУЧЕНИЕ, КВАНТОВАЯ ЯМА, СПЕКТР, НАНОСТРУКТУРА, ПОЛУПРОВОДНИК.

### **Введение**

В настоящее время актуальной является задача разработки эффективных полупроводниковых источников терагерцового излучения (диапазон длин волн электромагнитного излучения составляет 30 – 300 мкм), поскольку они могут найти свое применение в различных областях науки и техники, таких как медицина, экологический мониторинг окружающей среды, системы безопасности, а также информационные технологии (см., например, работы [1 – 3]). Один из перспективных механизмов для генерации терагерцового излучения основан на оптических переходах неравновесных носителей заряда с участием примесных состояний в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Этот меха-

низм является альтернативой квантово-каскадному лазеру [4], для производства которого требуются очень сложные методики роста высококачественных полупроводниковых наноструктур.

В настоящее время существует несколько механизмов генерации терагерцового излучения, основанных на примесных переходах носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Так, терагерцовое излучение наблюдалось на переходах неравновесных носителей заряда с участием резонансных состояний примеси при пробое примесей электрическим полем в механически деформированном  $p$ -Ge [5] и в микроструктурах со встроенными механическими напряжениями GaAs/GaAsN:Be [6]. Кроме того, при внутризонном опти-

ческом возбуждении носителей заряда наблюдалось терагерцовое излучение из объемного кремния, легированного различными примесями [7]. При межзонном фотовозбуждении излучение терагерцового диапазона было обнаружено в легированных объемных полупроводниках, таких как GaN [8], GaAs и Ge [9].

Работ, посвященных исследованию излучения, лежащего в терагерцовом диапазоне, из наноструктур с легированными квантовыми ямами (КЯ), опубликовано немного. Например, в продольных электрических полях терагерцовое излучение наблюдалось в квантовых ямах GaAs/AlGaAs, легированных примесями донорного [10] и акцепторного [11] типов.

Первое наблюдение терагерцового излучения из наноструктур с легированными КЯ при межзонной оптической накачке представлено в работе [11]. При такой накачке происходит генерация электронно-дырочных пар с их последующим захватом в КЯ. При низкой температуре кристаллической решетки донорные примеси в КЯ выморожены, т. е. нейтральны. Электроны с основных донорных состояний могут рекомбинировать с неравновесными дырками. Этот процесс обычно сопровождается испусканием квантов света ближнего ИК диапазона. На освободившиеся в результате этого процесса основные примесные состояния возможен захват неравновесных электронов, который может происходить с испусканием квантов света терагерцового диапазона.

Настоящая работа является развитием предыдущей работы авторов по этой тематике [11] и посвящена исследованию излучения терагерцового и ближнего ИК диапазонов в наноструктурах с легированными донорами КЯ различной ширины.

### Исследуемые образцы и методика эксперимента

Оптические исследования были выполнены на трех образцах. Два из них были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке арсенида галлия и содержали легированные КЯ GaAs/AlGaAs различной ширины.

В первом из образцов было 226 периодов КЯ GaAs шириной 16,1 нм, разделенных барьерами  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  толщиной 4,8 нм. Второй образец содержал 50 периодов КЯ GaAs шириной 30 нм, разделенных барьерами  $\text{Al}_{0,30}\text{Ga}_{0,70}\text{As}$  толщиной 7 нм. Структуры с узкими и широкими КЯ имели поверхностный слой GaAs толщиной 60 и 20 нм, соответственно. Легирование КЯ в обеих структурах осуществлялось кремнием (донор) с поверхностной концентрацией  $n_s = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . В качестве третьего образца была использована полуизолирующая подложка GaAs, аналогичная тем подложкам, на которых были выращены наноструктуры с легированными КЯ.

При оптических исследованиях образцы находились в криостате замкнутого цикла Janis РТСМ-4-7, который позволял поддерживать температуру образца в диапазоне от 4 до 320 К. Оптическое возбуждение неравновесных носителей заряда в структурах осуществлялось через окно из плавленого кварца непрерывным излучением твердотельного лазера с диодной накачкой (длина волны  $\lambda = 532 \text{ нм}$ , средняя выходная мощность  $P = 8 \text{ мВт}$ ).

Исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) в терагерцовом спектральном диапазоне осуществлялось с помощью вакуумного Фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, работающего в режиме пошагового сканирования. Выходное окно криостата замкнутого цикла было выполнено из полиметилпентена, а входное окно спектрометра — из полиэтилена. Данные материалы окон обладают высокой степенью прозрачности в терагерцовом диапазоне. Излучение ФЛ образца собиралось внеосевым параболическим зеркалом Фурье-спектрометра через фильтр из черного полиэтилена, который предотвращал попадание рассеянного излучения накачки в измерительную часть экспериментальной установки. В качестве детектора терагерцового излучения использовался охлаждаемый жидким гелием кремниевый болометр, который имел вакуумный оптический контакт с Фурье-спектрометром. Сигнал фотоответа болометра измерялся фазочувствительным детектором (lock-in amplifier) SR-830, который

был синхронизирован с лазером накачки (излучение лазера модулировалось обтюратором на частоте 87 Гц со скважностью 2).

Для исследования спектров терагерцовой ФЛ нами использовались две конфигурации оптической системы Фурье-спектрометра.

Первая включала в себя комбинацию полиэтиленового фильтра толщиной 0,5 мм на входе кремниевого болометра и светоделителя из многослойного лавсана толщиной 6 мкм. Данная оптическая конфигурация позволяла проводить исследования в диапазоне энергий кванта от 4 до 40 мЭВ.

Вторая конфигурация включала в себя фильтр из кристаллического кварца на болометре и лавсановый светоделитель толщиной 25 мкм; она позволяла повысить пропускание оптической системы Фурье-спектрометра в диапазоне энергий кванта 2 – 14 мЭВ.

Измерение спектров ФЛ в ближнем ИК диапазоне производилось с помощью решеточного монохроматора Horiba Jobin Yvon FHR-640 с голографической дифракционной решеткой, имеющей 1200 штрихов / мм. При исследовании спектров ФЛ ближнего ИК диапазона использовалось выходное окно криостата замкнутого цикла из плавленного кварца. Излучение фотолюминесценции образца проходило через светофильтр КС-15, который обладает прозрачностью в диапазоне длин волн 0,68 – 2,50 мкм и не пропускает рассеянное излучение накачки, и фокусировалось линзой на входной щели решеточного монохроматора. Детектирование сигнала осуществлялось кремниевой ПЗС-матрицей, охлаждаемой жидким азотом.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры терагерцовой ФЛ, зарегистрированные для структуры с узкими легированными КЯ и для полуизолирующей подложки GaAs, представлены на рис. 1. Видно, что в обоих спектрах наблюдается полоса излучения в диапазоне энергий кванта 18 – 27 мЭВ. Поэтому можно утверждать, что данная полоса не связана с наличием легированных КЯ в изучаемой

структуре. Эта полоса может быть вызвана наличием неконтролируемых примесей в подложке или в объемных слоях структуры с КЯ. Одной из таких примесей может быть углерод, который обладает энергией связи около 20 мЭВ и может возникать в процессе выращивания объемного арсенида галлия методом Чохральского [12] или в процессе выращивания эпитаксиальных слоев методом молекулярно-пучковой эпитаксии [13]. Различие в ширине полос терагерцового излучения (в спектре 1 она больше) и отсутствие тонкой структуры полосы в спектре 1 (см. рис. 1) объясняются более низким разрешением спектра для структуры с узкими КЯ (спектр 1). Тонкая структура линий спектра 2 связана с артефактом – интерференцией в черном полиэтиленовом фильтре. Период интерференции равен примерно 1,86 мЭВ, что соответствует реальной толщине полиэтилена (около 100 мкм).

Полоса излучения в диапазоне энергий кванта 8 – 16 мЭВ с максимумом вблизи 12 мЭВ наблюдается только в спектре терагерцовой ФЛ образца с узкими КЯ и не наблюдается в спектре излучения подложки GaAs (см. рис. 1). Это указывает на то, что данная полоса излучения может быть связана с наличием КЯ в изучаемой наноструктуре.

Энергию связи донорной примеси

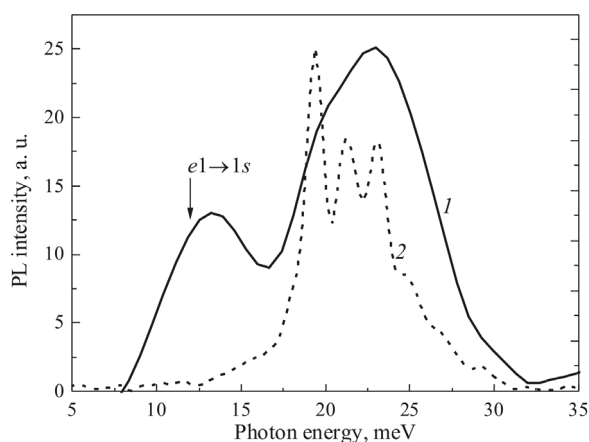


Рис. 1. Спектры терагерцовой фотолюминесценции образца GaAs/AlGaAs (узкие КЯ) (кривая 1) и полуизолирующей подложки GaAs (2), измеренные при температуре 4,2 К

кремния в узких КЯ мы можем оценить на основе результатов теоретического расчета энергетического спектра КЯ, учитывающего примесные состояния [14]. Энергия связи примеси для КЯ шириной 16,1 нм, согласно нашим оценкам, составляет примерно 10 мэВ. Поэтому полоса излучения с максимумом близи энергии кванта 12 мэВ может быть связана с излучательными переходами неравновесных электронов с первого уровня размерного квантования для электронов  $e1$  на основное состояние ионизированной донорной примеси  $1s$ . Спектральное положение этой полосы излучения удовлетворительно соответствует нашим оценкам энергии ионизации примеси в узкой КЯ изучаемого образца, составляющей около 10 мэВ. Значительная ширина данной полосы излучения может быть связана с низким спектральным разрешением измеренного спектра терагерцовой ФЛ, а также с его неоднородным уширением вследствие неоднородного распределения значительного числа примесей в КЯ.

В соответствии с механизмом генерации излучения, описанным выше, наличие переходов  $e1 \rightarrow 1s$ , обнаруженное в спектре терагерцовой ФЛ для образца с узкими КЯ (см. рис. 1), должно подтверждаться наличием особенностей в спектрах межзонной ФЛ, которые вызваны излучательной рекомбинацией неравновесных электронов и дырок через основное состояние донора в КЯ. Результаты экспериментального исследования спектров ФЛ ближнего ИК диапазона для образца с узкими КЯ GaAs/AlGaAs представлены на рис. 2. Расчетное значение энергии межзонного перехода  $e1 \rightarrow hh1$  отмечено на рис. 2 стрелкой вниз.

Как правило, в спектрах межзонной ФЛ легированных наноструктур (когда спектры регистрируются при низкой температуре и низких уровнях накачки) обнаруживаются пики излучения, связанные с излучательной рекомбинацией свободных тяжелых или легких экситонов, с излучательной рекомбинацией экситонов, связанных на примеси, и с излучательной рекомбинацией электронно-дырочных пар через примесные состояния (см., например, [15 – 17]).

Пик излучения при энергии кван-

та 1,528 эВ отстоит от расчетного значения оптического перехода  $e1 \rightarrow hh1$  на 7 мэВ. Мы полагаем, что этот пик обусловлен излучательной рекомбинацией свободных тяжелых экситонов, образованных на основных подзонах размерного квантования (переход  $Xe1 \rightarrow hh1$  на рис. 2). Энергия связи свободного тяжелого экситона в объемном GaAs составляет величину около 4,2 мэВ [18], а для достаточно узких КЯ значение энергии связи экситона должно быть выше объемного [15]. Аналогичным образом были выявлены излучательные переходы свободных тяжелых и легких экситонов, связанных на соответствующих подзонах размерного квантования: переходы  $Xe1 \rightarrow lh1$ ,  $Xe2 \rightarrow hh2$ ,  $Xe2 \rightarrow lh2$ ,  $Xe3 \rightarrow hh3$  (также отмечены стрелками на рис. 2).

Пик излучения при энергии кванта 1,5257 эВ отстоит по энергии от перехода  $Xe1 \rightarrow hh1$  на 2,1 мэВ и связан с излучательной рекомбинацией экситонов, связанных на донорной примеси. Согласно данным работы [15], для квантовых ям шириной 20 нм значение энергии связи экситона, связанного на донорной примеси, составляет 2 мэВ, что хорошо согласуется с нашими результатами.

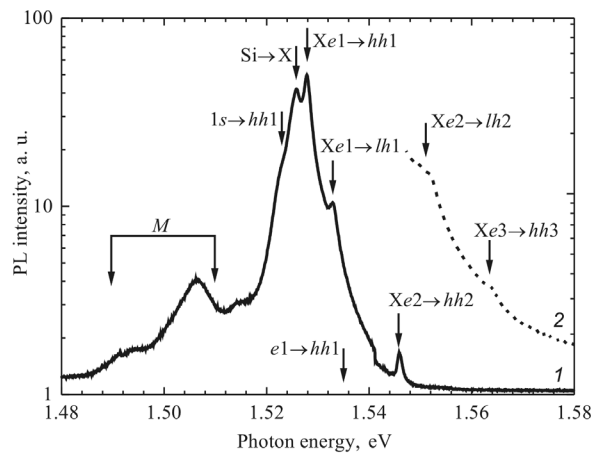


Рис. 2. Спектры ФЛ ближнего ИК диапазона образца с узкими КЯ GaAs/AlGaAs ( $T = 4,2$  К), измеренные с различными периодами накопления сигнала: 1 с (кривая 1) и 10 с (2); масштаб кривых по вертикальной оси различен. Стрелки указывают на позиции предполагаемых основных переходов; расчетное значение энергии для перехода  $e1 \rightarrow hh1$  также отмечено стрелкой;  $M$  – матрица



На спектре ФЛ наблюдается плечо вблизи энергии кванта 1,523 эВ (см. рис. 2), которое отстоит на 12 мэВ от расчетного значения излучательного перехода  $e1 \rightarrow hh1$ ; оно связывается с излучательной рекомбинацией неравновесных электронов и дырок через основное состояние донорной примеси Si в узких КЯ изучаемого образца (переход  $1s \rightarrow hh1$  на рис. 2). Напомним, что в спектре терагерцовой ФЛ для образца с узкими КЯ (см. рис. 1) была обнаружена полоса излучения с максимумом вблизи энергии кванта 12 мэВ, которая связывается с излучательными переходами неравновесных электронов между основной подзоной размерного квантования для электронов  $e1$  и основным донорным состоянием  $1s$ . Кроме того, в КЯ GaAs/AlGaAs шириной 20 нм энергия связи донорной примеси составила 11,6 мэВ [15], что также хорошо согласуется с нашими результатами.

Широкая полоса излучения в диапазоне энергий кванта от 1,485 до 1,510 эВ, отмеченная как  $M$  (матрица) на рис. 2, может быть связана с оптическими переходами зона  $\rightarrow$  примесь в объемных слоях структуры.

Таким образом, для образца с узкими легированными КЯ, в спектрах межзонной ФЛ была обнаружена линия излучательной рекомбинации неравновесных электронов и дырок через основное донорное состояние (переход  $1s \rightarrow hh1$  на рис. 2), а в спектре терагерцовой ФЛ для того же образца обнаружена полоса излучения, вызванная оптическими переходами электронов между основной подзоной размерного квантования и основным примесным состоянием (переход  $e1 \rightarrow 1s$  на рис. 1).

Второй образец с КЯ не отличается от первого по уровню легирования КЯ, однако ширина его легированной КЯ больше. Увеличение указанной ширины должно приводить к снижению энергии связи донорной примеси в КЯ [19, 20], а это должно отразиться на спектрах терагерцовой ФЛ смещением в длинноволновую область пика излучения, относящегося к электронным переходам, связанным с наличием донорных примесей в КЯ.

Спектры терагерцовой ФЛ для образца с широкими легированными КЯ, измеренные при различных температурах кристаллической решетки, представлены на рис. 3. При этих измерениях использовалась вторая конфигурация оптической системы Фурье-спектрометра, описанная выше. На данном графике присутствует пик ФЛ, который соответствует энергии кванта 8 мэВ. Положение этого пика на спектре хорошо согласуется с результатами расчета энергетического спектра КЯ, учитывающего наличие примесных состояний [10]. Пик может быть связан с оптическим переходом электронов из первой подзоны размерного квантования в основное состояние донорной примеси ( $e1 \rightarrow 1s$ , энергия кванта – 8,7 мэВ), а также с внутрицентровым переходом  $2p_{xy} \rightarrow 1s$  (6,6 мэВ). Расчетные значения энергий этих переходов показаны стрелками на рис. 3.

Полученные нами результаты также хорошо согласуются со спектрами фотопроводимости при возбуждении светом  $p$ - и  $s$ -поляризации, в структуре, аналогичной изучаемой нами, тоже с широкими легированными КЯ [10], где также наблюдали широкую линию поглощения, связанную с переходами  $1s \rightarrow e1$  и  $1s \rightarrow 2p_{xy}$ .

Из сравнения спектров терагерцовой

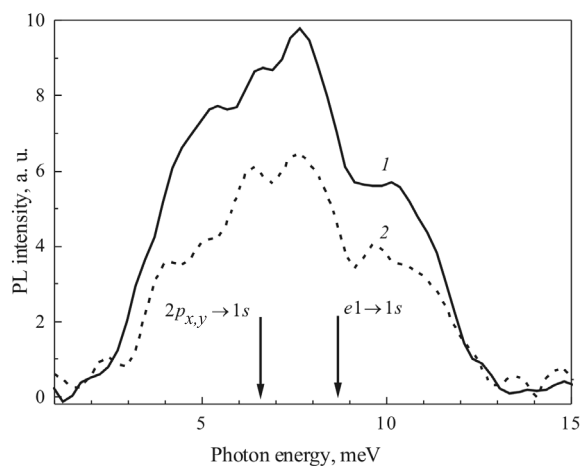


Рис. 3. Спектры терагерцовой ФЛ образца с широкими КЯ GaAs/AlGaAs, измеренные при температурах 4,4 К (кривая 1) и 10 К (2). Стрелками отмечены расчетные значения энергий для указанных электронных переходов

ФЛ, зарегистрированных для образцов с узкой и широкой ямами, видно, что полоса излучения, вызванная примесными переходами неравновесных электронов в КЯ, смещается в длинноволновую область с увеличением ширины КЯ, что и ожидалось.

Из сравнения спектров терагерцовой ФЛ, полученных для образца с широкими легированными КЯ при двух температурах (см. рис. 3), видно, что при увеличении температуры интенсивность терагерцовой ФЛ падает. Это может быть связано с соответствующим снижением вероятности захвата электрона на ионизованный донор. Такое поведение терагерцовой люминесценции с ростом температуры уже наблюдалось в объемных полупроводниках авторами работы [21].

Чтобы подтвердить предполагаемый механизм генерации терагерцового излучения (с участием примесных состояний в КЯ), был измерен спектр межзонной ФЛ (рис. 4), как и для образца с узкими КЯ. Стрелками на рис. 4 отмечены спектральные особенности, которые могут быть связаны с излучательной рекомбинацией свободных тяжелых экситонов, связанных на основной электронной и дырочной подзонах (переход  $Xe1 \rightarrow hh1$  на рис. 4), а также с излучательной рекомбинацией экситонов, связанных на донорной примеси кремния (переход  $Si \rightarrow X$  на рис. 4). Приведенная идентификация спектральных особенностей сделана на основе данных эксперимента и расчета энергетического спектра, сопоставления оценок глубины залегания примеси, энергии связи экситонов в КЯ. Широкая полоса излучения в диапазоне энергий кванта от 1,48 до 1,51 эВ, отмеченная как  $M$  («матрица»), может быть связана с оптическими переходами зона  $\rightarrow$  примесь в объемных слоях структуры. Эта полоса также наблюдается в спектрах межзонной ФЛ для структуры с узкими легированными КЯ (см. рис. 2). Линия излучения при энергии кванта 1,528 эВ приписывается излучательной рекомбинации неравновесных электронов и дырок через основное примесное состояние (переход  $1s \rightarrow hh1$  на рис. 4), поскольку отстоит от расчетного значения излучательного перехода  $e1 \rightarrow hh1$

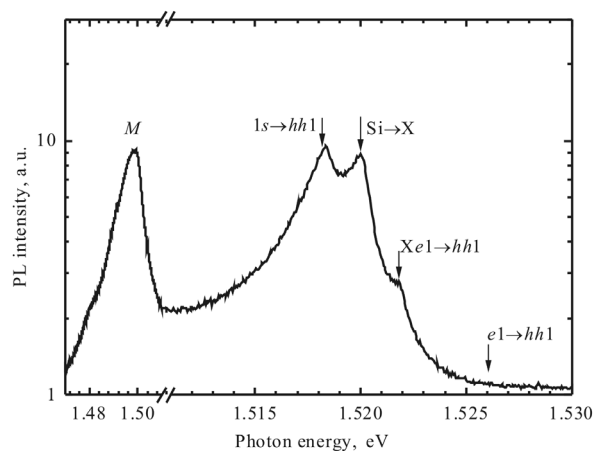


Рис. 4. Спектр ФЛ ближнего ИК диапазона, полученный для структуры с широкими КЯ GaAs/AlGaAs ( $T = 4,2$  К).

Стрелки указывают на позиции предполагаемых основных переходов

на 8 мэВ. Этот результат хорошо согласуется с результатами расчета энергетического спектра электронных состояний с учетом состояний примеси [10], а также с результатами анализа спектров терагерцовой ФЛ для образца с широкими КЯ (см. рис. 3).

### Заключение

В работе продемонстрирован механизм генерации терагерцового излучения при межзонном фотовозбуждении неравновесных носителей заряда в легированных донорной примесью кремния квантовых ямах GaAs/AlGaAs различной ширины, который подкреплён экспериментальными результатами исследования спектров межзонной фотолюминесценции для исследуемых образцов. Проведен подробный анализ этих спектров, их сравнение с результатами проведенного теоретического расчета, а также с литературными данными. Показана возможность перестройки длины волны терагерцового излучения в наноструктурах при изменении ширины легированных КЯ.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-32-60085, гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-6064.2016.2 и Минобрнауки России (государственное задание).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Humphreys K., Loughran J.P., Gradziel M., et al.** Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering // Conference Proceedings IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2004. Vol. 1. Pp. 1302–1305.
- [2] **Duque C.A., Tiutiunnyk A., Morales A.L., et al.** Terahertz – yesterday, today, and tomorrow // Momento. 2016. No. 51E. Pp. 103–116.
- [3] **Goryachuk A.A., Khodzitsky M.K., Borovkova M.A., et al.** The optical properties and spectral features of malignant skin melanocytes in the terahertz frequency range // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 741. P. 012072.
- [4] **Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C.W.I., et al.** Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~ 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling // Optics Express. 2012. Vol. 20. No. 4. Pp. 3866–3876.
- [5] **Gousev Yu.P., Altukhov I.V., Korolev K.A., et al.** Widely tunable continuous-wave THz laser // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 75. No. 6. Pp. 757–759.
- [6] **Shalygin V.A., Vorobjev L.E., Firsov D.A., et al.** Terahertz luminescence in strained GaAsN:Be layers under strong electric fields // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 90. No. 16. P. 161128.
- [7] **Ковалевский К.А., Жукавин Р.Х., Цыпленков В.В. и др.** Лазеры на мелких донорах в одноосно-деформированном кремнии // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 2. С. 199–205.
- [8] **Захарьин А.О., Бобылев А.В., Андрианов А.В.** Терагерцовое излучение при межзонном фотовозбуждении слоев GaN // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 9. С. 1158–1162.
- [9] **Андрианов А.В., Захарьин А.О., Иванов Ю.Л., Кипа М.С.** Примесная терагерцовая люминесценция при межзонном фотовозбуждении полупроводников // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 2. С. 102–105.
- [10] **Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Паневин В.Ю. и др.** Излучение и фотопроводимость в квантовых ямах в терагерцовой области спектра: роль резонансных состояний // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 11. С. 1443–1446.
- [11] **Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Паневин В.Ю. и др.** Терагерцовое излучение, связанное с примесными переходами электронов в квантовых ямах при оптической и электрической накачке // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 1. С. 28–32.
- [12] **Wakefield B., Leigh P.A., Lyons M.H., Elliot C.R.** Characterization of semi-insulating liquid encapsulated Czochralski GaAs by cathodoluminescence // Applied Physics Letters. 1984. Vol. 45. No. 1. Pp. 66–68.
- [13] **Dingle R., Weisbuch C., Stormer H.L., et al.** Characterization of high purity GaAs grown by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters. 1982. Vol. 40. No. 6. Pp. 507–509.
- [14] **Helm M., Peeters F.M., DeRosa F., et al.** Far-infrared spectroscopy of minibands and confined donors in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As superlattices // Physical Review B. 1991. Vol. 43. No. 17. Pp. 13983–13991.
- [15] **Kundrotas J., Čerškus A., Valušis G., et al.** Impurity-related photoluminescence line shape asymmetry in GaAs/AlAs multiple quantum wells: Fractional-dimensional space approach // Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 107. No. 7 P. 093109.
- [16] **Kundrotas J., Čerškus A., Nargelien V., et al.** Enhanced exciton photoluminescence in the selectively Si doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures // Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 108. No. 6. P. 063522.
- [17] **Tabata A., Levine A., Ceschin A.M., et al.** Optical properties of GaAs/AlGaAs selectively doped quantum well structures // Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology. 1998. Vol. 146. No. 1–4. Pp. 207–214.
- [18] **Nam S.B., Reynolds D.C., Litton C.W., et al.** Free-exciton energy spectrum in GaAs // Physical Review B. 1976. Vol. 13. No. 2. Pp. 761–767.
- [19] **Greene R.L., Bajaj K.K.** Energy levels of hydrogenic impurity states in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As quantum well structures // Solid State Communications. 1983. Vol. 45. No. 9. Pp. 825–829.
- [20] **Chaudhuri S.** Hydrogenic-impurity ground state in GaAs-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As multiple-quantum-well structures // Physical Review B. 1983. Vol. 28. No. 8. Pp. 4480–4488.
- [21] **Pavlov S.G., Hübers H.-W., Rümmele M.H.** Far-infrared stimulated emission from optically excited bismuth donors in silicon // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 80. No. 25. Pp. 4717–4719.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАХОВ Иван Сергеевич** – аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
makhoviv@gmail.com

**ПАНЕВИН Вадим Юрьевич** – старший преподаватель кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
pvyu@rphf.spbstu.ru

**ВИННИЧЕНКО Максим Яковлевич** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
mvin@spbstu.ru

**СОФРОНОВ Антон Николаевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
sofronov@rphf.spbstu.ru

**ФИРСОВ Дмитрий Анатольевич** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
dmfir@rphf.spbstu.ru

**ВОРОБЬЕВ Леонид Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
lvor@rphf.spbstu.ru

*Makhov I.S., Panevin V.Yu., Vinnichenko M.Ya., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorobjev L.E.* IMPURITY ASSISTED TERAHERTZ LUMINESCENCE IN QUANTUM WELL NANOSTRUCTURES UNDER INTERBAND PHOTOEXCITATION.

The results of experimental study of the impurity-assisted photoluminescence in far- (terahertz) and near-infrared spectral ranges in *n*-GaAs/AlGaAs quantum well structures with different well widths under interband photoexcitation of electron-hole pairs have been presented. In the far-infrared photoluminescence spectra the optical electron transitions between the first electron subband and donor ground state as well as between excited and ground donor states were revealed. Observation of these optical electron transitions became possible because of the depopulation of the donor ground state in the quantum well due to the non-equilibrium charge carrier radiative transitions from the donor ground state to the first heavy hole subband. The opportunity to tune the terahertz radiation wavelength in structures with doped quantum wells by changing the quantum well width was demonstrated experimentally.

TERAHERTZ LUMINESCENCE, RADIATION, QUANTUM WELL, SPECTRUM, NANOSTRUCTURE, SEMICONDUCTOR.



## REFERENCES

- [1] **K. Humphreys, J.P. Loughran, M. Gradziel, et al.**, Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering, Conference Proceedings IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 1 (2004) 1302–1305.
- [2] **C.A. Duque, A. Tiutiunnyk, A.L. Morales, et al.**, Terahertz – yesterday, today, and tomorrow, *Momento*. 51E (2016) 103–116.
- [3] **A.A. Goryachuk, M.K. Khodzitsky, M.A. Borovkova, et al.**, The optical properties and spectral features of malignant skin melanocytes in the terahertz frequency range, *Journal of Physics: Conference Series*. 741 (2016) 012072.
- [4] **S. Fatholoulumi, E. Dupont, C.W.I. Chan, et al.**, Terahertz quantum cascade lasers operating up to  $\sim 200$  K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling, *Optics Express*. 20(4) (2012) 3866–3876.
- [5] **Yu.P. Gousev, I.V. Altukhov, K.A. Korolev, et al.**, Widely tunable continuous-wave THz laser, *Applied Physics Letters*. 75(6) (1999) 757–759.
- [6] **V.A. Shalygin, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, et al.**, Terahertz luminescence in strained GaAsN:Be layers under strong electric fields, *Applied Physics Letters*. 90(16) (2007) 161128.
- [7] **K.A. Kovalevsky, R.Kh. Zhukavin, V.V. Tsyplenkov, et al.**, Shallow-donor lasers in uniaxially stressed silicon, *Semiconductors*. 47(2) (2013) 235–241.
- [8] **A.O. Zakhar'in, A.V. Bobylev, A.V. Andrianov**, Terahertz emission upon the interband excitation of GaN layers, *Semiconductors*. 46(9) (2012) 1135–1139.
- [9] **A.V. Andrianov, A.O. Zakhar'in, Y.L. Ivanov, M.S. Kipa**, Terahertz impurity luminescence under the interband photoexcitation of semiconductors, *JETP Letters*. 91(2) (2010) 96–99.
- [10] **D.A. Firsov, V.A. Shalygin, V.Yu. Panevin, et al.**, Terahertz emission and photoconductivity in *n*-type GaAs/AlGaAs quantum wells: the role of resonant impurity states, *Semiconductors*. 44(11) (2010) 1394–1397.
- [11] **D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, V.Yu. Panevin, et al.**, Terahertz radiation associated with the impurity electron transition in quantum wells upon optical and electrical pumping, *Semiconductors*. 49(1) (2015) 28–32.
- [12] **B. Wakefield, P.A. Leigh, M.H. Lyons, C.R. Elliot**, Characterization of semi-insulating liquid encapsulated Czochralski GaAs by cathodoluminescence, *Applied Physics Letters*. 45(1) (1984) 66–68.
- [13] **R. Dingle, C. Weisbuch, H.L. Stormer, H. Morkoc, et al.**, Characterization of high purity GaAs grown by molecular beam epitaxy, *Applied Physics Letters*. 40 (6) (1982) 507–509.
- [14] **M. Helm, F.M. Peeters, F. DeRosa, et al.**, Far-infrared spectroscopy of minibands and confined donors in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga(1–*x*)As superlattices, *Physical Review B*. 43 (17) (1991) 13983–13991.
- [15] **J. Kundrotas, A. Čerškus, G. Valušis, et al.**, Impurity-related photoluminescence line shape asymmetry in GaAs/AlAs multiple quantum wells: Fractional-dimensional space approach, *Journal of Applied Physics*. 107 (7) (2010) 093109.
- [16] **J. Kundrotas, A. Čerškus, V. Nargelien, et al.**, Enhanced exciton photoluminescence in the selectively Si doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga(1–*x*)As heterostructures, *Journal of Applied Physics*. 108 (6) (2010) 063522.
- [17] **A. Tabata, A. Levine, A. Marti Ceschin, et al.**, Optical properties of GaAs/AlGaAs selectively doped quantum well structures, *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*. 146(1–4) (1998) 207–214.
- [18] **S.B. Nam, D.C. Reynolds, C.W. Litton, et al.**, Free-exciton energy spectrum in GaAs, *Physical Review B*. 13(2) (1976) 761–767.
- [19] **R.L. Greene, K.K. Bajaj**, Energy levels of hydrogenic impurity states in GaAs/Ga<sub>1–*x*</sub>Al<sub>*x*</sub>As quantum well structures, *Solid State Communications*. 45(9) (1983) 825–829.
- [20] **S. Chaudhuri**, Hydrogenic-impurity ground state in GaAs-Ga<sub>1–*x*</sub>Al<sub>*x*</sub>As multiple-quantum-well structures, *Physical Review B*. 28(8) (1983) 4480–4488.
- [21] **S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, M.H. Rummeli, et al.**, Far-infrared stimulated emission from optically excited bismuth donors in silicon, *Applied Physics Letters*. 80 (25) (2002) 4717–4719.

## THE AUTHORS

**МАКHOV Ivan S.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

makhoviv@gmail.com

**PANEVIN Vadim Yu.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
pvyu@rphf.spbstu.ru

**VINNICHENKO Maksim Ya.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
mvin@spbstu.ru

**SOFRONOV Anton N.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
sofronov@rphf.spbstu.ru

**FIRSOV Dmitriy A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
dmfir@rphf.spbstu.ru

**VOROBJEV Leonid E.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
lvor@rphf.spbstu.ru