

Научная статья

УДК 538.958

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16303>

## ВЛИЯНИЕ СТИМУЛИРОВАННОГО МЕЖЗОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРАГЕРЦОВУЮ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ В СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ *n*-ТИПА

**Н. Ю. Харин**<sup>1</sup> ✉, **В. Ю. Паневин**<sup>1</sup>, **А. Д. Петрук**<sup>2</sup>, **М. Я. Винниченко**<sup>1</sup>,  
**И. А. Норватов**<sup>1</sup>, **В. В. Федоров**<sup>3</sup>, **Д. А. Фирсов**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Университет штата Нью-Йорк в Стоуни Брук, г. Стоуни Брук, США;

<sup>3</sup> Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия  
✉ [kharin.nikita66@gmail.com](mailto:kharin.nikita66@gmail.com)

**Аннотация.** В работе исследована возможность увеличения интенсивности терагерцового (ТГц) излучения при оптической межзонной накачке в эпитаксиальном слое GaAs, легированном мелкими донорами, за счет реализации условий для стимулированного межзонного излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона, интенсивно опустошающего основное состояние донора. Получены спектры фотолюминесценции в ближнем ИК и ТГц диапазонах в до- и постпороговом режимах генерации излучения ближнего ИК диапазона. В ТГц спектрах наблюдается изменение характера зависимости интенсивности излучения от накачки, связанное с уменьшением излучательного времени жизни электронов на примесном уровне.

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, терагерцовое излучение, примесный переход, эпитаксиальный слой, объемный полупроводник, стимулированное излучение

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00105).

**Для цитирования:** Харин Н. Ю., Паневин В. Ю., Петрук А. Д., Винниченко М. Я., Норватов И. А., Федоров В. В., Фирсов Д. А. Влияние стимулированного межзонного излучения на терагерцовую фотолюминесценцию в слоях арсенида галлия *n*-типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 3. С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16303>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16303>

## INFLUENCE OF STIMULATED INTERBAND EMISSION ON TERAHERTZ PHOTOLUMINESCENCE IN *n*-TYPE GALLIUM ARSENIDE LAYERS

**N. Yu. Kharin**<sup>1</sup> ✉, **V. Yu. Panevin**<sup>1</sup>, **A. D. Petruk**<sup>2</sup>, **M. Ya. Vinnichenko**<sup>1</sup>,  
**I. A. Norvatov**<sup>1</sup>, **V. V. Fedorov**<sup>3</sup>, **D. A. Firsov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, USA;

<sup>3</sup> Alferov University of RAS, St. Petersburg, Russia

✉ [kharin.nikita66@gmail.com](mailto:kharin.nikita66@gmail.com)

**Abstract.** In the paper, a possibility of increasing the terahertz (THz) radiation intensity under optical interband pumping in the epitaxial GaAs layer doped with shallow donors has been studied. An increase in the intensity of THz radiation was achieved by implementation of conditions for stimulated interband radiation in the near-IR range, which depopulated intensively the donor ground state. The photoluminescence spectra of the samples were measured by Fourier spectrometer. Photoluminescence spectra were recorded in the near-IR and THz ranges in the sub- and post-threshold working conditions of radiation generation in the near-IR range. In the THz spectra, a change in behavior of the dependence of the radiation intensity on pumping was observed. The change was due to a decrease in the radiative lifetime of electrons at the impurity level.

**Keywords:** photoluminescence, terahertz radiation, impurity transition, epitaxial layer, bulk semiconductor, stimulated emission

**Funding:** The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 22-22-00105).

**For citation:** Kharin N. Yu., Panevin V. Yu., Petruk A. D., Vinnichenko M. Ya., Norvatov I. A., Fedorov V. V., Firsov D. A., Influence of stimulated interband emission on terahertz photoluminescence in *n*-type gallium arsenide layers, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (3) (2023) 29–38. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16303>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Создание оптоэлектронных устройств, работающих в терагерцовом (ТГц) диапазоне, является предметом исследования множества научных групп. Подобный интерес обусловлен широкой областью применения ТГц излучения. Спектры поглощения различных органических веществ обладают характерными особенностями в ТГц диапазоне [1], что позволяет осуществлять мониторинг состояния атмосферы, анализ газов, контроль скрытого содержимого закрытых пакетов. Это излучение может применяться в системах безопасности, биологии, медицине [2]. Наблюдение спектральных линий в ТГц спектральном диапазоне с помощью гетеродинных методов изучения излучения Вселенной может помочь в понимании состава и происхождения Солнечной системы [3].

Весьма совершенным компактным и достаточно мощным полупроводниковым источником ТГц излучения в настоящее время является квантово-каскадный лазер [4 – 6], однако его применение ограничено сложностью технологического процесса и высокой стоимостью производства. В связи с этим проведение фундаментальных исследований, направленных на разработку новых физических основ генерации ТГц излучения в полупроводниках, выступает актуальной задачей.

Перспективный подход к разработке полупроводниковых источников ТГц излучения – это использование оптических переходов носителей заряда с участием примесных уровней, поскольку энергия связи мелких примесей в полупроводниках лежит в ТГц диапазоне. Источники ТГц излучения с межзонной оптической накачкой на примесных переходах носителей заряда в легированных объемных полупроводниках впервые были продемонстрированы на примерах *n*-GaAs и *p*-Ge [7], а также *n*-GaN [8]. Если рассматривать донорные полупроводники, то излучение ТГц диапазона, исследованное в работе [8], было связано с переходами неравновесных электронов из зоны проводимости и возбужденных донорных состояний на основное состояние донора при межзонной оптической накачке. Опустошение основного донорного состояния, конечного для ТГц переходов электронов, происходило за счет межзонной излучательной электрон-дырочной рекомбинации, протекающей спонтанным образом между основным донорным состоянием и валентной зоной. ТГц излучение такой природы было также обнаружено и исследовано в структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs [9].

В описанном механизме генерации ТГц излучения, его интенсивность определяется скоростью опустошения конечного состояния для ТГц переходов электронов.

Таким образом, увеличение скорости опустошения основного примесного состояния должно привести к увеличению интенсивности ТГц излучения. Интенсивное опустошение основного примесного состояния может быть реализовано с помощью стимулированного межзонного излучения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне на переходах из основного состояния донора в валентную зону. Условия для возникновения такого стимулированного излучения должны быть реализованы в исследуемой нами структуре.

Использование подобного механизма эффективного опустошения конечного состояния для оптических переходов было продемонстрировано ранее для увеличения интенсивности примесной ТГц фотолюминесценции в лазерных наноструктурах с легированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs [10, 11], а также в диодных структурах с вертикально связанными квантовыми точками InGaAs/AlGaAs [12], где возникновение стимулированного межзонного излучения между основными уровнями электронов и дырок в квантовых точках использовалось для увеличения интенсивности излучения среднего ИК диапазона, связанного с внутризонными переходами носителей заряда между уровнями квантовых точек.

В настоящей работе исследуется влияние стимулированного излучения в ближнем ИК диапазоне на характеристики ТГц излучения, возникающего при примесных переходах неравновесных электронов в эпитаксиальных слоях *n*-GaAs при межзонной оптической накачке.

### Методы и материалы

Основной объект исследования – это структура с эпитаксиальным слоем арсенида галлия GaAs, легированным донорами кремния.

Образец был получен методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs, при этом концентрация легирующей донорной примеси кремния составляла  $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Температура роста составляла 620 – 630 °С, отношение потоков галлия и мышьяка (Ga : As) при росте эпитаксиальных слоев составляло 1 : 3. Эпитаксиальный слой находился в волноводе для ближнего ИК излучения, созданном слоями твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с градиентом состава *x*. Толщина эпитаксиального слоя составляла 0,52 мкм. Для создания условий возникновения стимулированного излучения ближнего ИК диапазона использовался высокочастотный резонатор полного внутреннего отражения, получаемый с помощью скалывания граней образца, предварительно сошлифованного до толщины около 100 мкм.

В экспериментах использовались три вида образцов: с резонатором полного внутреннего отражения (размер  $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$ ), без резонатора (геометрический размер  $5 \times 5 \text{ мм}$ ) и подложка с удаленными эпитаксиальными слоями.

Образцы припаивались индием к медной пластине, которая была прижата к медному держателю оптического криостата замкнутого цикла Janis PTSM-4-7, позволяющего плавно изменять температуру образца в диапазоне от 4 до 320 К.

Для исследования спектров фотолюминесценции в ближнем ИК диапазоне использовался решеточный монохроматор Horiba Jobin Yvon FHR 640 с голографической дифракционной решеткой 1200 штр/мм. В качестве детектора излучения использовалась ПЗС-матрица. Неравновесные носители заряда возбуждались излучением полупроводникового лазера (Nd : YAG с удвоением частоты в нелинейном кристалле  $\text{LiIO}_3$ , длина волны излучения – 532 нм).

Измерения спектров фотолюминесценции при невысоком уровне возбуждения проводились с помощью лазера, работающего в непрерывном режиме. Для возбуждения стимулированного излучения ближнего ИК диапазона использовался импульсный лазер большой мощности с той же длиной волны излучения. Частота следования импульсов составляла 8 кГц, длительность импульса – 250 нс.

Те же самые лазеры использовались для изучения фотолюминесценции в ТГц диапазоне. Спектры регистрировались с помощью вакуумного Фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, работающего в режиме step-scan. Детектором служил кремниевый болометр, охлаждаемый жидким гелием. На входе болометра находился фильтр из полиэтилена, покрытого

алмазной пылью, с пропусканием в диапазоне энергий кванта от 6 до 100 мэВ. В спектрометре использовался светоделитель из лавсана, входное окно спектрометра было выполнено из белого полиэтилена; оно дополнительно экранировалось с помощью черного полиэтилена для предотвращения попадания излучения накачки в измерительную часть установки. С помощью lock-in усилителя SR 830 сигнал с болометра извлекался из шумов, затем поступал на компьютер для обработки интерферограммы и получения спектра.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции структуры с резонатором и подложки в ближнем ИК диапазоне для разных интенсивностей оптической накачки при  $T = 4$  К. Использовался непрерывный режим накачки – уровень возбуждения не достигал порога возникновения в структуре с резонатором стимулированного излучения ближнего ИК диапазона.

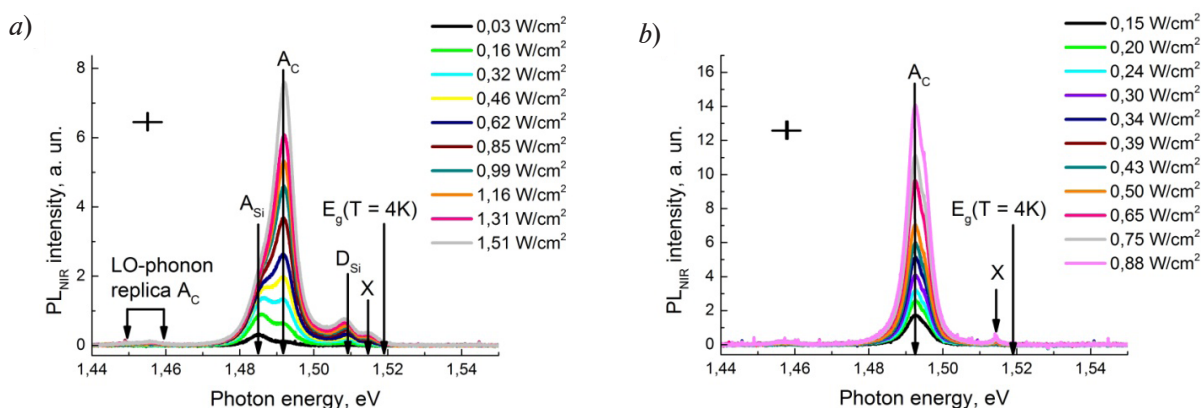


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции в ближнем ИК диапазоне при разных интенсивностях оптической накачки для структуры с резонатором (a) и для подложки (b). Температура измерения  $T = 4$  К

На спектрах фотолюминесценции эпитаксиального слоя (см. рис. 1, a) наблюдается несколько особенностей. Отметим, что в спектрах структур с резонатором и спектрах подложки не наблюдается оптических переходов при энергии кванта, равной ширине запрещенной зоны GaAs (1,519 эВ для  $T = 4$  К), вследствие низкой температуры и возбуждения экситонов. Линия излучения при энергии 1,514 эВ, обозначенная на спектрах как "X", соответствует энергии свободного экситона в GaAs [13] и отчетливо видна на всех спектрах фотолюминесценции. Пик при энергии 1,509 эВ, обозначенный как "D<sub>Si</sub>", отсутствует в спектрах фотолюминесценции подложки (см. рис. 1, b), поэтому мы можем утверждать, что этот пик связан с эпитаксиальным слоем и соответствует переходам с участием донора кремния. В пользу данной интерпретации также говорит значительное уширение экситонной линии в спектрах эпитаксиального слоя, по сравнению с аналогичной линией в спектрах подложки. В спектрах фотолюминесценции эпитаксиального слоя экситонная линия существенно уширена из-за относительно высокого уровня присутствующих ионизированных примесей [14].

Спектральное расстояние между пиком D<sub>Si</sub> и шириной запрещенной зоны GaAs составляет около 10 мэВ, что согласуется со спектром наблюдаемого нами ТГц излучения (см. далее). Пик излучения при энергии 1,493 эВ, обозначенный "A<sub>C</sub>", по-видимому, связан с неконтролируемой акцепторной примесью углерода, возникающей в процессе роста GaAs-содержащих полупроводниковых структур и подложек [15].

Линия излучения при энергии 1,485 эВ, обозначенная как "A<sub>Si</sub>", вероятно, связана с включением амфотерной легирующей примеси кремния в нашей структуре в качестве акцептора. Найденная из спектров фотолюминесценции энергия связи акцепторной примеси кремния в нашей структуре равна 35 мэВ, что согласуется с литературными данными [16]. Данная линия отсутствует на спектрах подложки (см. рис. 1, b), что также говорит о происхождении данной особенности в спектре: она связана с легированием. Стоит



отметить, что с ростом уровня накачки данная линия сливается с высокоинтенсивным углеродным пиком и практически неразличима в спектрах при интенсивном возбуждении. Этот факт, вероятно, связан с низкой концентрацией акцепторов кремния в нашей структуре. Слабо различимые особенности в спектрах в диапазоне от 1,450 до 1,460 эВ относятся к фоновым репликам, связанным с акцепторами углерода в нашей структуре [17].

На рис 2,а приведены данные по фотолюминесценции в ближнем ИК диапазоне, полученные при высоких уровнях импульсной оптической накачки. При достижении некоторого порога интенсивности накачки линия излучения  $D_{Si}$ , связанная с донорной примесью кремния в нашей структуре, начинает преобладать по интенсивности над остальными линиями излучения.

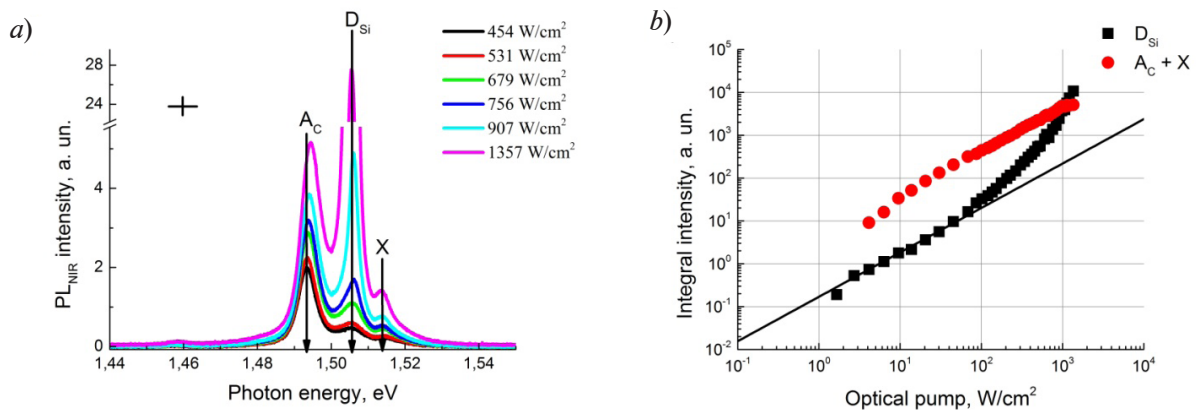


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции в ближнем ИК диапазоне при разных мощностях оптической накачки для структуры с резонатором (а), а также их обработка: зависимости интегральной интенсивности отдельных пиков от интенсивности оптической накачки (б).

Температура измерения  $T = 4$  К

Мы аппроксимировали экспериментальный спектр с тремя особенностями (см. рис. 2,а) тремя лоренцевскими контурами. Площади отдельных контуров соответствовали интегральной интенсивности излучения каждого пика. Таким образом были получены зависимости интегрального сигнала фотолюминесценции в ближнем ИК-диапазоне для отдельных пиков от интенсивности накачки (приведены на рис. 2,б). Пороговый характер зависимости для линии излучения  $D_{Si}$ , связанной с донорами кремния в нашей структуре, указывает на начало генерации стимулированного излучения. Пороговая интенсивность оптического возбуждения, определенная из полученной зависимости, составляет около  $100$   $W/cm^2$ .

На рис. 3 приведены спектры ТГц фотолюминесценции для образцов с резонатором и без него. В спектрах, полученных для образца с эпитаксиальным слоем, но без резонатора (см. рис. 3,а), наблюдается широкая линия излучения в области энергий кванта от 15 до 30 мэВ. Такую же линию излучения мы наблюдаем в спектре подложки (кривая черного цвета на рис. 3,а). Таким образом, эта линия может быть связана с внутрицентровыми переходами между состояниями акцепторной примеси углерода или с переходами с основного акцепторного состояния в валентную зону. Данная линия присутствует как в спектрах излучения эпитаксиальных слоев, так и в спектре подложки. Энергия данных переходов согласуется с литературными данными [16]. Полоса излучения в диапазоне энергий кванта 5 – 13 мэВ не наблюдается в спектре подложки и, следовательно, эта полоса может быть связана с наличием донорной примеси кремния в эпитаксиальных слоях арсенида галлия. При увеличении мощности оптической накачки интенсивности линий, связанных как с донорами, так и с акцепторами, монотонно растут.

На спектрах ТГц фотолюминесценции образца с резонатором (см. рис. 3,б) видно, что возгорание стимулированного излучения ближнего ИК диапазона при интенсивностях накачки, превышающих  $100$   $W/cm^2$ , приводит к изменению характера зависимости интенсивности ТГц фотолюминесценции от уровня накачки. Спектры на рис. 3,б можно

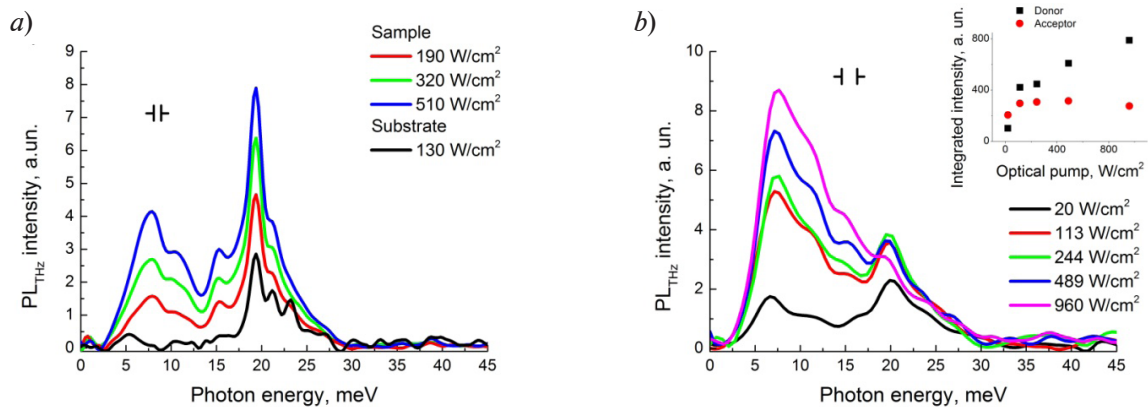


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции в ТГц диапазоне для подложки (кривая черного цвета) и для структуры без резонатора (цветные кривые) при разных интенсивностях оптической накачки (а), спектры для структуры с резонатором также при разных интенсивностях оптической накачки (б).

На вставке: зависимости интегральной интенсивности спектральных полос излучения, связанных с донорами и акцепторами, от уровня накачки.

Температура измерения  $T = 4$  К

аппроксимировать двумя лоренцевскими контурами. На вставке к рис. 3,б приведены полученные нами зависимости интегральной интенсивности излучения этих двух полос от интенсивности оптической накачки. Видно, что интенсивность полосы излучения в диапазоне энергий кванта от 5 до 13 мэВ, связанной с донорами, продолжает расти после порога стимулированного излучения, тогда как полоса от 15 до 30 мэВ, связанная с акцепторами, демонстрирует поведение, близкое к насыщению.

Подобные зависимости интенсивности излучения, связанного с переходами с участием донорных и акцепторных состояний, подтверждают тезис о влиянии стимулированного излучения ближнего ИК диапазона на интенсивность оптических переходов в ТГц области спектра. В наших экспериментах стимулированное излучение ближнего ИК диапазона возникает с участием донорных состояний. При достижении порога стимулированного излучения донорные состояния начинают более интенсивно опустошаться, поскольку излучательное время жизни электронов на основном донорном уровне уменьшается. При этом переходы электронов из зоны проводимости на уровень донора с испусканием ТГц фотонов идут более интенсивно и начинают преобладать над ТГц излучением, связанным с акцепторными примесями. После начала стимулированного излучения в ближнем ИК диапазоне ТГц излучение, связанное с переходами электронов с основного акцепторного уровня в валентную зону, испытывает насыщение. Это можно объяснить стабилизацией концентрации дырок в валентной зоне с ростом уровня накачки после начала стимулированного излучения в ближнем ИК диапазоне.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что стимулированное излучение ближнего ИК диапазона, возникающее при оптической межзонной накачке эпитаксиального слоя  $n$ -GaAs, помещенного в оптический волновод и резонатор полного внутреннего отражения, существенно влияет на интенсивность оптических переходов электронов из зоны проводимости на состояния примеси, увеличивая интенсивность терагерцового излучения, связанного с примесными переходами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Federici J. F., Schulkin B., Huang F., Gary D., Barat R. Oliveira F., Zimdars D. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs // Semiconductor Science and Technology. 2005. Vol. 20. No. 7. Pp. 266–280.

2. **Perenzoni M., Paul D. J.** (Eds.) Physics and applications of terahertz radiation. Series: Springer Series in Optical Science. Vol. 173. Dordrecht (Netherlands): Springer, 2014.
3. **Kulesa C.** Terahertz spectroscopy for astronomy: From comets to cosmology // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2011. Vol. 1. No. 1. Pp. 232–240.
4. **Khalatpour A., Paulsen A. K., Deimert C., Wasilewski Z. R., Hu Q.** High-power portable terahertz laser systems // Nature Photonics. 2021. Vol. 15. No. 1. Pp. 16–20.
5. **Lu Q. Y., Bandyopadhyay N., Slivken S., Bai Y., Razeghi M.** Room temperature terahertz quantum cascade laser sources with 215  $\mu$ W output power through epilayer-down mounting // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103. No. 1. P. 011101.
6. **Belkin M. A., Capasso F.** New frontiers in quantum cascade lasers: high performance room temperature terahertz sources // Physica Scripta. 2015. Vol. 90. No. 11. P. 118002.
7. **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. № 2. С. 102–105.
8. **Захарьин А. О., Бобылев А. В., Андрианов А. В.** Терагерцовое излучение при межзонном фотовозбуждении слоев GaN // Физика и техника полупроводников. 2012. Vol. 46. No. 9. Pp. 1158–1162.
9. **Фирсов Д. А., Воробьев Л. Е., Паневин В. Ю., Софронов А. Н., Балагула Р. М., Махов И. С., Козлов Д. В., Васильев А. П.** Терагерцовое излучение, связанное с примесными переходами электронов в квантовых ямах при оптической и электрической накачке // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 1. С. 30–34.
10. **Makhov I. S., Panevin V. Y., Sofronov A. N., Firsov D. A., Vorobjev L. E., Vinnichenko M. Y., Vasil'ev A. P., Maleev N. A.** The effect of stimulated interband emission on the impurity-assisted far-infrared photoluminescence in GaAs/AlGaAs quantum wells // Superlattices and Microstructures. 2017. Vol. 112. December. Pp. 79–85.
11. **Vinnichenko M. Ya., Makhov I. S., Panevin V. Yu., Sofronov A. N., Firsov D. A., Vorobjev L. E., Sadofev Yu. G., Vasiliev A. P.** Terahertz radiation related to the electron relaxation after interband optical pumping in doped quantum wells // Proceedings of The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz); 25–30 September 2016. Copenhagen, Denmark (2016) No. 16502800.
12. **Воробьев Л. Е., Фирсов Д. А., Шалыгин В. А., Тулупенко В. Н., Шерняков Ю. М., Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Алфёров Ж. И.** Спонтанное излучение дальнего ИК диапазона при переходах носителей заряда между уровнями квантовых точек // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. № 4. С. 256–260.
13. **Nam S. B., Reynolds D. C., Litton C. W., Almassy R. J., Collins T. C., Wolfe C. M.** Free-exciton energy spectrum in GaAs // Physical Review B. 1976. Vol. 13. No. 2. Pp. 761–767.
14. **Ploog K., Fischer A., Künzel H.** The use of Si and Be impurities for novel periodic doping structures in GaAs grown by molecular beam epitaxy // Journal of The Electrochemical Society. 1981. Vol. 128, No. 2. Pp. 400–410.
15. **Dingle R., Weisbuch C., Störmer H. L., Morkoc H., Cho A. Y.** Characterization of high purity GaAs grown by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters. 1982. Vol. 40. No. 6. Pp. 507–510.
16. **Kisker D. W., Tews H., Rehm W.** Luminescence study of C, Zn, Si, and Ge acceptors in GaAs // Journal of Applied Physics. 1983. Vol. 54. No. 3. Pp. 1332–1336.
17. **Huang Q., Ulbrich R. G.** Carbon-acceptor-induced cascade scattering by acoustic phonons above the ( $e, A^0$ ) threshold in GaAs // Physical Review B. 2001. Vol. 64. No. 11. P. 113205.

## REFERENCES

1. **Federici J. F., Schulkin B., Huang F., et al.,** THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs, Semicond. Sci. Technol. 20 (7) (2005) 266–280.
2. **Perenzoni M., Paul D. J.** (Eds.), Physics and applications of terahertz radiation, Series: Springer Series in Optical Science. Vol. 173. Springer, Dordrecht (Netherlands), 2014.
3. **Kulesa C.,** Terahertz spectroscopy for astronomy: From comets to cosmology, IEEE Trans. Terahertz Sci. 1 (1) (2011) 232–240.
4. **Khalatpour A., Paulsen A. K., Deimert C., et al.,** High-power portable terahertz laser systems, Nat. Photonics. 15 (1) (2021) 16–20.

5. Lu Q. Y., Bandyopadhyay N., Slivken S., et al., Room temperature terahertz quantum cascade laser sources with 215  $\mu$ W output power through epilayer-down mounting, Appl. Phys. Lett. 103 (1) (2013) 011101.
6. Belkin M. A., Capasso F., New frontiers in quantum cascade lasers: high performance room temperature terahertz sources, Phys. Scr. 90 (11) (2015) 118002.
7. Andrianov A. V., Zakhar'in A. O., Ivanov Y. L., Kipa M. S., Terahertz impurity luminescence under the interband photoexcitation of semiconductors, JETP Lett. 91 (2) (2010) 96–99.
8. Zakhar'in A. O., Bobylev A. V., Andrianov A. V., Terahertz emission upon the interband excitation of GaN layers, Semicond. 46 (9) (2012) 1135–1139.
9. Firsov D. A., Vorobjev L. E., Panevin V. Y., et al., Terahertz radiation associated with the impurity electron transition in quantum wells upon optical and electrical pumping, Semicond. 49 (1) (2015) 28–32.
10. Makhov I. S., Panevin V. Y., Sofronov A. N., et al., The effect of stimulated interband emission on the impurity-assisted far-infrared photoluminescence in GaAs/AlGaAs quantum wells, Superlattices Microstr. 112 (December) (2017) 79–85.
11. Vinnichenko M. Ya., Makhov I. S., Panevin V. Yu., et al., Terahertz radiation related to the electron relaxation after interband optical pumping in doped quantum wells, Proc. of 41st Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 25–30 Sept. 2016, Copenhagen, Denmark (2016) 16502800.
12. Vorob'ev L. E., Firsov D. A., Shalygin V. A., et al., Spontaneous far-IR emission accompanying transitions of charge carriers between levels of quantum dots, JETP Lett. 67 (4) (1998) 275–279.
13. Nam S. B., Reynolds D. C., Litton C. W., et al., Free-exciton energy spectrum in GaAs, Phys. Rev. B. 13 (2) (1976) 761–767.
14. Ploog K., Fischer A., Künzel H., The use of Si and Be impurities for novel periodic doping structures in GaAs grown by molecular beam epitaxy, J. Electrochem. Soc. 128 (2) (1981) 400–410.
15. Dingle R., Weisbuch C., Sturmer H. L., et al., Characterization of high purity GaAs grown by molecular beam epitaxy, Appl. Phys. Lett. 40 (6) (1982) 507–510.
16. Kisker D. W., Tews H., Rehm W., Luminescence study of C, Zn, Si, and Ge acceptors in GaAs, J. Appl. Phys. 54 (3) (1983) 1332–1336.
17. Huang Q., Ulbrich R. G., Carbon-acceptor-induced cascade scattering by acoustic phonons above the ( $e, A^0$ ) threshold in GaAs, Phys. Rev. B. 64 (11) (2001) 113205.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХАРИН Никита Юрьевич** – инженер Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
 kharin.nikita66@gmail.com  
 ORCID: 0000-0002-2220-881X

**ПАНЕВИН Вадим Юрьевич** – старший преподаватель Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
 rvuu@rphf.spbstu.ru  
 ORCID: 0000-0003-4424-1722

**ПЕТРУК Антон Дмитриевич** – PhD-студент Университета штата Нью-Йорк в Стоуни Брук, г. Стоуни Брук, США.

USA, 100 Nicolls Rd, Stony Brook, NY 11794-2350  
 ianton583@gmail.com  
 ORCID: 0000-0003-1824-9173



**ВИННИЧЕНКО Максим Яковлевич** — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
 mvin@spbstu.ru  
 ORCID: 0000-0002-6118-0098

**НОРВАТОВ Илья Алексеевич** — стажер-исследователь Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
 norv2@mail.ru  
 ORCID: 0000-0002-0048-7512

**ФЕДОРОВ Владимир Викторович** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета РАН им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3  
 burunduk.uk@gmail.com  
 ORCID: 0000-0001-5547-9387

**ФИРСОВ Дмитрий Анатольевич** — доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
 dmfir@rphf.spbstu.ru  
 ORCID: 0000-0003-3947-4994

## THE AUTHORS

### **KHARIN Nikita Yu.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
 kharin.nikita66@gmail.com  
 ORCID: 0000-0002-2220-881X

### **PANEVIN Vadim Yu.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
 pvyu@rphf.spbstu.ru  
 ORCID: 0000-0003-4424-1722

### **PETRUK Anton D.**

*State University of New York at Stony Brook*  
 100 Nicolls Rd, Stony Brook, New York, 11794-2350, USA  
 ianton583@gmail.com  
 ORCID: 0000-0003-1824-9173

### **VINNICHENKO Maxim Ya.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
 mvin@spbstu.ru  
 ORCID: 0000-0002-6118-0098

**NORVATOV Ilya A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
norv2@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-0048-7512

**FEDOROV Vladimir V.**

*Alferov University of RAS*  
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia  
burunduk.uk@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5547-9387

**FIRSOV Dmitry A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
dmfir@rphf.spbstu.ru  
ORCID: 0000-0003-3947-4994

*Статья поступила в редакцию 06.07.2023. Одобрена после рецензирования 12.07.2023.  
Принята 12.07.2023.*

*Received 06.07.2023. Approved after reviewing 12.07.2023. Accepted 12.07.2023.*