

07

Электролюминесценция квантовых ям InGaAs (1017 nm) в инжекционных гетероструктурах AlGaAs/GaAs, выращенных на подложках Si методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, М.И. Кондратов, Д.Н. Николаев, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, Н.А. Пихтин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2026 г.

В окончательной редакции 4 мая 2026 г.

Принято к публикации 4 мая 2026 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке кремния выращены инжекционные гетероструктуры AlGaAs/GaAs с активной областью на основе одной квантовой ямы InGaAs. Изготовлены и исследованы кристаллы со сплошной конструкцией омических контактов. Продемонстрирована электролюминесценция при комнатной температуре на длине волны 1017 nm при накачке плотностью тока до 2 A/cm² и 4 kA/cm² в непрерывном и импульсном режимах соответственно.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия, подложка кремния, квантовая яма, электролюминесценция.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.15.63400.20682

За последнее десятилетие наблюдается заметный прогресс в области фотонных интегральных схем (ФИС), реализованных на кремнии [1,2]. В первую очередь это связано с развитием кремниевых технологий, позволивших формировать базовые элементы, такие как волноводы, делители и сумматоры, модуляторы и т.д. При этом реализуются два основных подхода, которые обеспечивают генерацию оптического излучения в ФИС: 1) использование внешних источников [3]; 2) гетерогенная интеграция гетероструктур A³B⁵ [4]. Оба подхода требуют дополнительных технологических операций, связанных в первом случае с формированием дифракционных элементов ввода оптического излучения и прецизионной юстировкой источника относительно данных элементов, а во втором — с применением технологии гетерогенной интеграции инжекционной гетероструктуры A³B⁵ и кремниевой ФИС с последующими нетипичными для кремниевой технологии операциями формирования области инжекции и оптического усиления за счет травления части A³B⁵ и напыления металлических и диэлектрических покрытий. Кроме того, для обоих подходов характерны дополнительные оптические потери на ввод излучения в кремниевые волноводы. Однако реализация подхода, основанного на гетерогенной эпитаксии, подразумевающей монокристаллический рост инжекционной гетероструктуры A³B⁵ на кремниевой пластине, позволит избавиться от необходимости использования дополнительных элементов и технологических операций, а также трудоемкой юстировки. В настоящее время с использованием как технологии молекулярно-пучковой эпитаксии [5], так и газофазной эпитаксии из металлоорганических соеди-

нений [6] продемонстрированы решения, показывающие возможность создания инжекционных источников лазерного излучения, полученных на основе гетероструктур A³B⁵, выращенных монокристаллически на кремниевых подложках. При этом использовались активные области как на основе квантовых ям InGaAs [7,8], так на основе квантовых точек InAs [5,6]. Во всех случаях авторы используют достаточно сложные буферные структуры. В рамках настоящей работы с использованием метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений продемонстрирована возможность создания инжекционного источника оптического излучения на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур с InGaAs квантовой ямой, излучающей в спектральном диапазоне 1017 nm при комнатной температуре, выращенных с использованием простой GaAs/Si буферной структуры, продемонстрировавшей ранее малую плотность прорастающих дислокаций (ППД) и низкую шероховатость поверхности [9].

Технология газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в настоящее время активно используется для создания оптоэлектронных приборов, что связано с возможностью промышленных установок обеспечивать высокую воспроизводимость и однородность при массовом производстве. Однако при разработке экспериментальной технологии важно обеспечить ее трансфер в серийную технологию. Это может быть осуществлено за счет линейки технологических установок, включающей реакторы исследовательского и промышленного уровня, с реализованной в этой линейке возможностью масштабирования. В большинстве случаев экспериментальные результаты, демонстрирующие рост эпитаксиальных структур A³B⁵ на кремниевой подложке, получены с

использованием установок Aixtron с исследовательскими реакторами горизонтального типа, которые не подразумевают возможности переноса технологии на более производительные реакторы, или с реакторами типа Showerhead, в которых такая возможность реализована [10,11]. В рамках настоящей работы впервые для роста эпитаксиальных структур A^3B^5 на кремниевой подложке был использован вертикальный реактор турбодискового типа, который позволяет реализовать возможность масштабирования при использовании более производительных реакторов.

Экспериментальные образцы выращивались на подложках кремния (001) с разориентацией 4° в направлении [110], легированных As. Для эпитаксиального роста в качестве реагентов элементов третьей группы использовались триметилалюминий, триметилгаллий и триметилиндий, а элементов пятой группы — арсин. В качестве реагентов легирующей примеси *n*- и *p*-типа проводимости использовались моносилан и бис(циклопентадиенил)магния соответственно. В качестве газа-носителя использовался водород. Инжекционная гетероструктура включала две конструкционные части: буферную и инжекционную. Буферная часть была сформирована на основе GaAs, легированного Si, выращиваемого непосредственно на подложке кремния. Буферный слой имел толщину $2.7\ \mu\text{m}$ и обеспечивал получение базового эпитаксиального слоя GaAs с низкой ППД и шероховатостью поверхности, характеризуемой среднеквадратичной шероховатостью (СКШ). В проводимых экспериментах буферный слой обеспечивал минимальные значения ППД и СКШ (на площади $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$) порядка $7 \cdot 10^7\ \text{cm}^{-2}$ и $2.5\ \text{nm}$ соответственно. Более подробное описание разработанных буферных слоев представлено в работе [9]. Непосредственно на буферном слое *n*-GaAs выращивалась инжекционная гетероструктура с квантовой ямой. На основании результатов проведенных ранее исследований было установлено, что использование алюминийсодержащих эпитаксиальных слоев повышает шероховатость поверхности эпитаксиальной гетероструктуры [12]. В связи с этим на текущем этапе исследований было принято решение использовать AlGaAs-эмиттеры минимальной толщины. В результате экспериментальная гетероструктура включала широкозонные эмиттеры *n*- и *p*-типа проводимости $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной $0.6\ \mu\text{m}$ каждый. Между эмиттерами располагался волноводный слой GaAs толщиной $1.3\ \mu\text{m}$. В центре волноводного слоя размещалась активная область на основе одной квантовой ямы InGaAs толщиной $10\ \text{nm}$. Поверх $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ эмиттера *p*-типа проводимости был сформирован контактный слой *p*-GaAs толщиной $0.35\ \mu\text{m}$. Рост инжекционной части гетероструктуры проходил при температуре 650°C . Перед изготовлением образцов для электролюминесцентных (ЭЛ) исследований нами была исследована при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме сканирования поверхность выращенной гетероструктуры. На рис. 1 представлено АСМ-изображение

поверхности гетероструктуры (площадь сканирования $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$). На рис. 1 видно, что поверхность имеет достаточно развитый рельеф и СКШ получается равной $5.3\ \text{nm}$. Значение СКШ гетероструктуры более чем в 2 раза выше, чем СКШ буферного слоя.

Для изготовления инжекционных экспериментальных образцов были сформированы сплошные омические контакты со стороны кремниевой подложки и контактного слоя *p*-GaAs. Контакты формировались методом магнетронного напыления металлических пленок с последующим их отжигом. Со стороны контактного слоя *p*-GaAs использовалась композиция Ti–Pt–Au, а со стороны подложки *n*-Si — композиция Ti–Au. Перед ЭЛ-исследованиями проводилась оценка омичности контактов к кремниевой подложке. Для этого проводилась оценка линейности вольт-амперной характеристики. Проведенная оценка показала, что отсутствуют дополнительные барьеры, определяющие неомичность контактов и ограничивающие инжекцию носителей заряда. Это свидетельствует о том, что омические контакты не вносят существенных ограничений для проведения ЭЛ-исследований. Для ЭЛ-исследований структура раскалывалась на кристаллы размером $500 \times 500\ \mu\text{m}$, которые напайвались *p*-стороной вниз на медные теплоотводы. На рис. 2 показано изображение скола гетероструктуры, полученное на растровом электронном микроскопе (РЭМ). На изображении также указаны все функциональные слои гетероструктуры.

Исследования ЭЛ проводились при накачке кристаллов непрерывным и импульсным током при комнатной температуре без принудительного охлаждения. Спектральные зависимости интенсивности оптического излучения фиксировались с помощью InGaAs-фотоприемника и монохроматора. Спектр оптического излучения, полученный при накачке непрерывным током $5\ \text{mA}$ (плотность тока $2\ \text{A/cm}^2$), показан на рис. 3 (кривая 5). Видно, что максимум спектра ЭЛ находится на длине волны $1017\ \text{nm}$, при этом ширина спектра

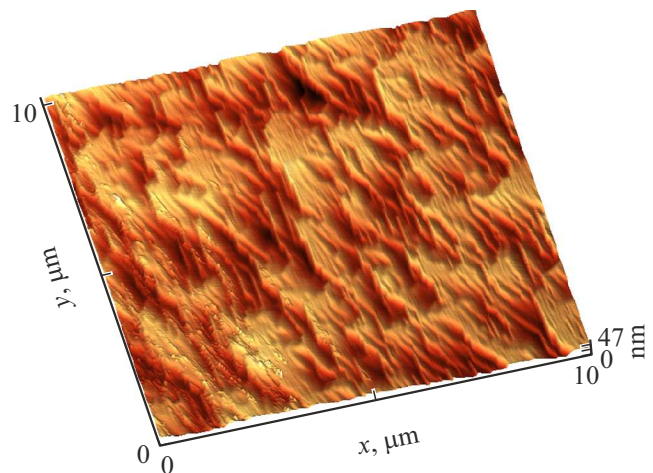


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности гетероструктуры.

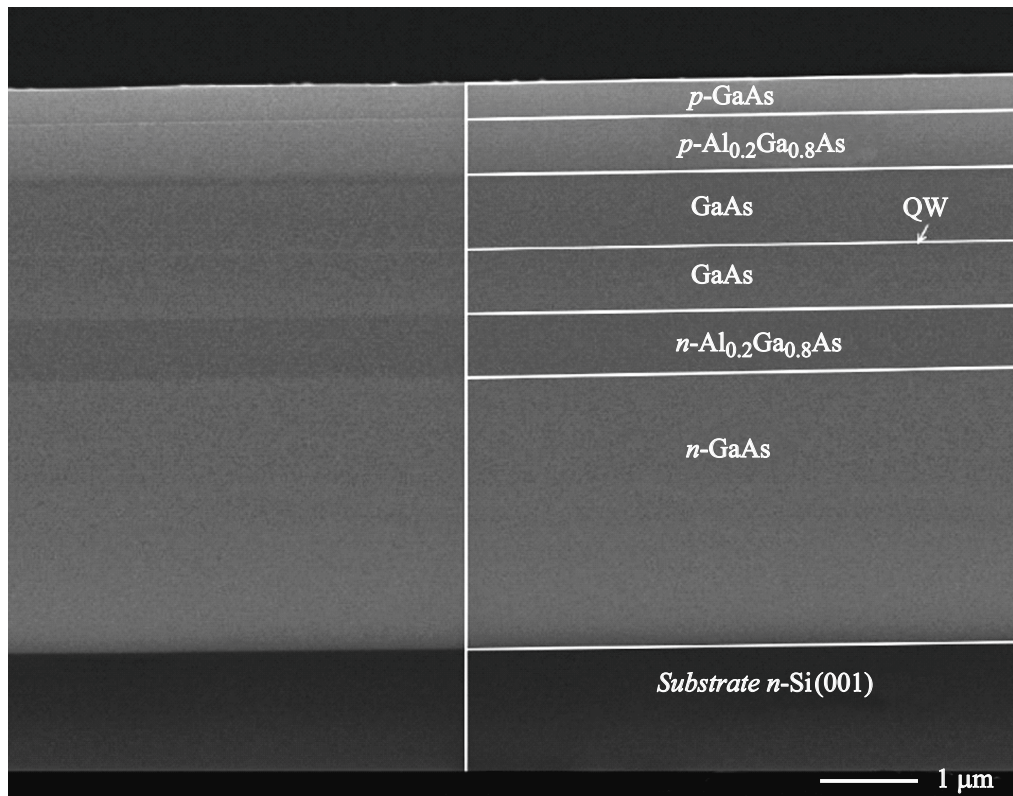


Рис. 2. РЭМ-изображение скола гетероструктуры.

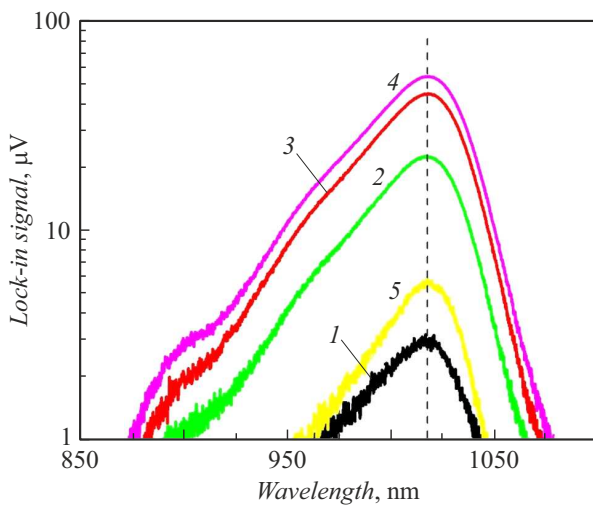


Рис. 3. Спектр электролюминесценции при комнатной температуре в импульсном режиме накачки с частотой импульсов 248 Hz (1 — плотность тока накачки 2.8 kA/cm², длительность импульса 50 ns; 2 — 2.8 kA/cm², 500 ns; 3 — 2.8 kA/cm², 1000 ns; 4 — 4 kA/cm², 1000 ns) и в непрерывном режиме накачки (5 — 2 A/cm²).

на уровне половины от максимума (FWHM) составляет 42 nm. Для исследований в импульсном режиме использовался генератор, обеспечивающий накачку импульсами тока амплитудой до 10 A (до плотности

тока 4 kA/cm²) и длительностью 50–1000 ns. Из рис. 3 видно, что для всего исследованного диапазона токов накачки центральная часть спектра ЭЛ не претерпевает заметных изменений, при этом максимум спектра ЭЛ сохраняет свое положение и совпадает с положением максимума спектра, полученного при накачке непрерывным током. Кроме того, видно, что на положение максимума спектра ЭЛ длительность импульса в диапазоне 50–1000 ns не оказывает существенного влияния. Для демонстрации наблюдаемых особенностей на рис. 3 показаны спектры ЭЛ, полученные при накачке импульсами тока амплитудой 7 A (плотность тока 2.8 kA/cm²) с длительностями 50, 500 и 1000 ns (рис. 3, кривые 1–3). Видно, что положение максимума спектра ЭЛ не меняется с увеличением длительности импульса, однако заметно перераспределение интенсивности в коротковолновой части спектра, а FWHM спектра достигает 52 nm. Особенности коротковолновой части спектра выражены в росте интенсивности дополнительного пика, соответствующего длине волны 905 nm: если при длительности импульса 500 ns данный дополнительный пик явно не проявляется, то при длительности 1000 ns он достаточно хорошо просматривается. Данная особенность могла быть связана с влиянием температуры. Как показано в работе [13], за время до 1 μs может наблюдаться переходный процесс, сопровождающийся непрерывным увеличением

температуры активной области. Однако в рассматриваемом случае не наблюдается движения максимума спектра ЭЛ в длинноволновую область, что могло бы свидетельствовать о разогреве. Поэтому в данном эксперименте в качестве возможной причины можно рассматривать пространственную неоднородность накачки током. Как показано в работах [14,15], для многопереходных структур гетеротристоров может наблюдаться пространственная локализация тока в первый момент включения, которая выражается в виде токового шнура. Со временем токовый шнур распространяется на всю область контакта, что получило название распространения включенного состояния. Аналогичное явление распространения включенного состояния также наблюдалось в гетеротранзисторах [16]. В настоящей работе при пространственной локализации тока в начальный момент импульса могут формироваться области с более высоким материальным поглощением для коротковолновой части спектра, так как в данных областях при низкой плотности тока не происходит заполнения высокоэнергетических состояний. По мере расширения области накачки на всю площадь кристалла, что реализуется для длинных импульсов, области с поглощением преобразуются в области с усилением, что позволяет проявиться дополнительному пику в коротковолновой части.

Таким образом, нами были созданы кристаллы инжекционных источников оптического излучения и исследованы их ЭЛ-характеристики. Показано, что разработанная активная область на основе одной квантовой ямы InGaAs в волноводе GaAs обеспечивает генерацию оптического излучения с шириной до 52 nm и максимумом спектра на 1017 nm. Продемонстрировано, что положение максимума спектра ЭЛ не меняется при изменении длительности импульса, однако с ростом длительности возникает дополнительный пик в коротковолновой области на длине волны 905 nm. Полученные результаты могут в дальнейшем использоваться для создания источников лазерного излучения, монолитно выращенных на кремниевой подложке. Длина волны излучения около 1020–1030 nm является востребованной в ФИС на кремнии при использовании волноводов на основе Si₃N₄ [17,18], а также для монолитно-интегрированных усилителей на базе Al₂O₃, легированных Yb [19]. Также полученные данные дают возможность сдвинуть длину волны излучения в более длинноволновую область до 1070–1080 nm путем корректировки состава квантовой ямы InGaAs за счет увеличения содержания индия.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Z. Xiao, W. Liu, S. Xu, J. Zhou, Z. Ren, C. Lee, *Adv. Opt. Mater.*, **11** (20), 2301028 (2023). DOI: 10.1002/adom.202301028
- [2] J. Yang, M. Tang, S. Chen, H. Liu, *Light Sci. Appl.*, **12** (1), 16 (2023). DOI: 10.1038/s41377-022-01006-0
- [3] M. Jahed, A. Caut, J. Goyvaerts, M. Rensing, M. Karlsson, A. Larsson, G. Roelkens, R. Baets, P. O'Brien, *J. Light Technol.*, **40** (15), 5190 (2022). DOI: 10.1109/JLT.2022.3172781
- [4] J. Rahimi, J. Van Kerrebrouck, B. Haq, J. Bauwelinck, G. Roelkens, G. Morthier, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **28** (3), 1 (2022). DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3122552
- [5] M. Mtunzi, H. Zeng, L. Bao, C. Chen, J.-S. Park, H. Deng, Y. Wang, H. Jia, J. Li, H. Wang, Y. Hou, M.G. Masteghin, R. Beanland, F. Gardes, J. Moeyaert, T. Baron, M. Tang, A. Seeds, H. Liu, *J. Phys. D*, **58** (40), 405101 (2025). DOI: 10.1088/1361-6463/ae074b
- [6] H. Park, S. Lee, W.S. Han, D. Jung, H. Kim, *Laser Photon. Rev.*, **19** (19), e00574 (2025). DOI: 10.1002/lpor.202500574
- [7] J. Huang, Q. Lin, W. Luo, W. Gu, L. Lin, K.M. Lau, *Appl. Phys. Lett.*, **123** (26), 261101 (2023). DOI: 10.1063/5.0179895
- [8] H. Liu, C. Jiang, S. Liu, J. Ye, H. Zhai, J. Li, J. Wang, Q. Wang, X. Wei, X. Ren, *Opt. Commun.*, **574**, 131214 (2025). DOI: 10.1016/j.optcom.2024.131214
- [9] С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, М.И. Кондратов, Е.В. Фомин, Д.Н. Николаев, А.В. Мясоедов, Н.А. Берт, Н.А. Пихтин, *Письма в ЖТФ*, **52** (7), 48 (2026). DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62523.20553 [S.O. Slipchenko, V.V. Shamakhov, M.I. Kondratov, E.V. Fomin, D.N. Nikolaev, A.V. Myasoedov, N.A. Bert, N.A. Pikhtin, *Tech. Phys. Lett.*, **52** (4), 42 (2026). DOI: 10.61011/TPL.2026.04.63200.20553].
- [10] Y. Han, Z. Yan, W.K. Ng, Y. Xue, K.S. Wong, K.M. Lau, *Optica*, **7** (2), 148 (2020). DOI: 10.1364/OPTICA.381745
- [11] C. Jiang, H. Liu, J. Wang, X. Ren, Q. Wang, Z. Liu, B. Ma, K. Liu, R. Ren, Y. Zhang, S. Cai, Y. Huang, *Appl. Phys. Lett.*, **121** (6), 061102 (2022). DOI: 10.1063/5.0098264
- [12] С.О. Слипченко, В.В. Шамахов, Д.Н. Николаев, Е.В. Фомин, М.И. Кондратов, Н.А. Пихтин, *Письма в ЖТФ*, **52** (10), 15 (2026). DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62733.20607 [S.O. Slipchenko, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, E.V. Fomin, M.I. Kondratov, N.A. Pikhtin, *Tech. Phys. Lett.*, **52** (5), 61 (2026)].
- [13] И.С. Шашкин, А.Д. Рыбкин, В.А. Крючков, А.Е. Казакова, Д.Н. Романович, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, *Квантовая электроника*, **52** (9), 794 (2022). [I.S. Shashkin, A.D. Rybkin, V.A. Kryuchkov, A.E. Kazakova, D.N. Romanovich, N.A. Rudova, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50** (1), S18 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623130122].
- [14] О.С. Соболева, В.С. Головин, В.С. Юферев, П.С. Гаврина, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, *ФТП*, **54** (5), 478 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.05.49265.9341 [O.S. Soboleva, V.S. Golovin, V.S. Yuferev, P.S. Gavrina, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, *Semiconductors*, **54** (5), 575 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620050140].

- [15] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov, *J. Appl. Phys.*, **121** (5), 054502 (2017). DOI: 10.1063/1.4975411
- [16] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov, *J. Appl. Phys.*, **119** (12), 124513 (2016). DOI: 10.1063/1.4945321
- [17] Y. Han, K.M. Lau, *J. Appl. Phys.*, **128** (20), 200901 (2020). DOI: 10.1063/5.0029804
- [18] X. Hu, M. Girardi, Z. Ye, P. Muñoz, A. Larsson, V. Torres-Company, *Opt. Express*, **28** (9), 13019 (2020). DOI: 10.1364/OE.386494
- [19] J. Mu, M. Dijkstra, Y.-S. Yong, M. de Goede, L. Chang, S.M. García-Blanco, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **25** (5), 1 (2019). DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2908559