

Спектральные и пространственные характеристики излучения торцевых лазерных диодов на основе квантовых ям InGaAs/GaAs со сверхшироким волноводом

© А.А. Бекман¹, И.А. Мельниченко^{2,3}, Ю.М. Шерняков¹, Г.О. Корнышов¹, Н.Ю. Гордеев¹,
А.С. Паюсов¹, О.И. Симчук², Ю.С. Ткач², М.В. Максимов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
190008 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: spbgate21@gmail.com

Поступила в Редакцию 28 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 16 июля 2025 г.

Принята к публикации 23 июля 2025 г.

В зависимости от тока накачки и температуры исследованы спектры лазерного излучения, а также диаграммы направленности и распределения интенсивности излучения в ближнем поле InGaAs/GaAs/AlGaAs торцевых лазерных диодов на квантовых ямах со сверхшироким волноводом. Показано, что лазерная генерация на основном состоянии квантово-размерной активной области происходит на моде 2-го порядка, а на возбужденном состоянии — на фундаментальной моде.

Ключевые слова: полупроводниковые лазерные диоды, моды вертикального волновода, фундаментальная мода, мощные лазерные диоды.

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61480.8224

1. Введение

Пространственное распределение интенсивности излучения в дальнем поле является одной из важнейших характеристик полупроводниковых лазеров. Традиционно для практических применений требуются вертикально-одномодовые лазеры, дальнее поле которых имеет гауссову форму. Однако в связи с расширением применений полупроводниковых лазерных диодов приборы с широким многомодовым вертикальным волноводом и многолепестковой диаграммой направленности также могут представлять определенный интерес [1,2]. Управление дальним полем за счет изменения тока накачки может найти применение в лидарах с контролируемой диаграммой направленности. Важное преимущество лазеров с широким вертикальным волноводом связано с уменьшением плотности оптической мощности на выходном зеркале, что позволяет повысить уровень катастрофической оптической деградации зеркал и тем самым увеличить выходную мощность.

В настоящей статье приведены результаты исследования спектров излучения и распределения интенсивности излучения в ближнем и дальнем полях в зависимости от тока накачки и температуры в лазерах с квантовыми ямами (КЯ) со сверхшироким волноводом.

2. Методика и образцы

InGaAs/GaAs/AlGaAs-лазерная структура, излучающая на длине волны $\lambda \approx 1.04$ мкм, была выращена на

подложке *n*-GaAs(100) методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Активная область, состоящая из двух КЯ In_{0.25}Ga_{0.75}As, разделенных спейсерным слоем толщиной 70 нм, располагалась в середине сверхширокого волноводного слоя GaAs толщиной 2,6 мкм. Слой *n*-эмиттера толщиной 1 мкм состоял из Al_{0.15}Ga_{0.85}As и был легирован кремнием, слой *p*-эмиттера, легированный цинком, был аналогичного состава и толщины. На рис. 1, *a* показано изображение скола изготовленных лазерных диодов с указанием толщин слоев, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии. На рис. 1, *b* показан профиль показателя преломления исследуемой структуры и расчетный профиль вертикальных мод: фундаментальной моды и моды 2-го порядка. Толщина волновода подбиралась для поддержания в нем 4 вертикальных оптических мод (0, 1, 2 и 3), ширина была чуть меньше отсечки для возможной генерации моды 4-го порядка. Генерация на модах 1-го и 3-го порядка была невозможна за счет ничтожно малого Q -фактора.

Из эпитаксиальных пластин с помощью стандартных пистолетов процессов и скалывания резонаторных граней были получены полосковые лазеры с шириной контакта 50 мкм с различной длиной резонатора. Образцы были смонтированы *p*-контактом вверх на медные теплоотводы с помощью индиевого припоя. Для снижения влияния саморазогрева измерения производились в импульсном режиме. В результате измерений ватт-амперных характеристик лазеров с разными длинами резонаторов были определены дифференциальные кван-

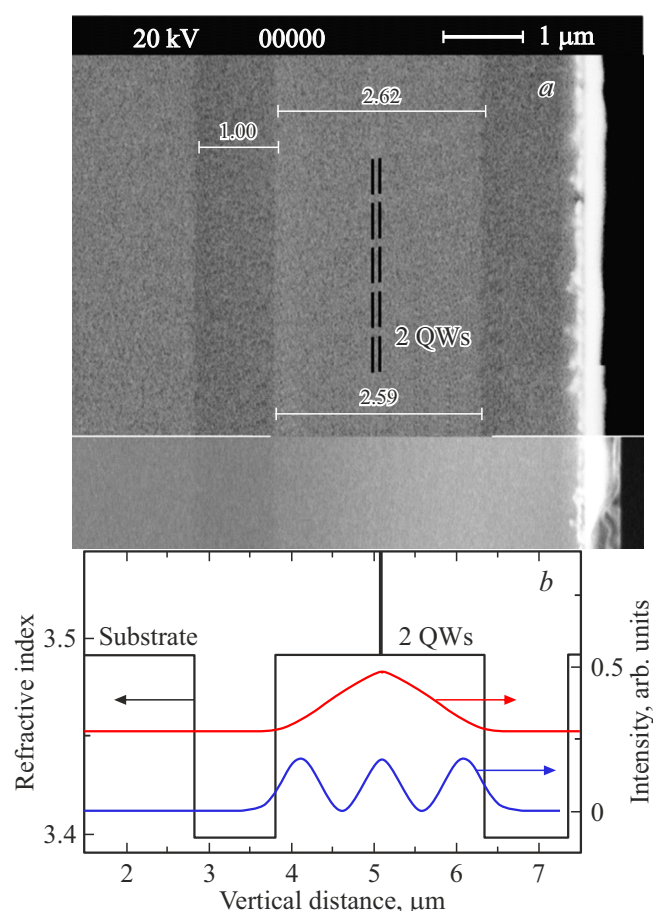


Рис. 1. Изображение исследуемой лазерной структуры, полученное сканирующей электронной микроскопией (a) в режимах: отраженных (сверху) и вторичных (снизу) электронов, а также профиль показателя преломления и расчетное распределение интенсивности фундаментальной моды (красная линия) и моды 2-го порядка (синяя линия) (b).

товые эффективности, на основании которых вычислены внутренние оптические потери и внутренняя квантовая эффективность, которые составили 1.3 см^{-1} и 77% соответственно.

Информация о лазерных оптических модах может быть получена как из измерения картин дальнего поля (диаграмм направленности излучения) [3], так и из распределения излучения в ближнем поле с помощью сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) [4]. Измерения картин дальнего поля производились с использованием установки, описанной в работе [5], которая состояла из двух угловых моторизированных подвижек Standa, обеспечивающих вращение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Исследование ближнего поля лазерного диода осуществлялось методом волоконной СБОМ. Для сканирования поверхности использовалась установка NT-MDT Integra Spectra II с волоконным зондом. В качестве зонда применялось одномодовое оптическое волокно Nufern 980-HP, закрепленное на кварцевом резонаторе вилочной формы.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 изображены ватт-амперные характеристики лазерного диода длиной 1 мм при температуре 20 °С (рис. 2, a) и 60 °С (рис. 2, b), полученные интегрированием спектров электролюминесценции в двух спектральных диапазонах. Линия в диапазоне 1020–1031 нм соответствует излучению через основное состояние (ground state, GS), а линия в диапазоне 986–998 нм — излучению через возбужденное (exited state, ES) состояние. Эффект двухуровневой генерации в лазерах как на основе квантовых точек (КТ), так и на основе квантовых ям хорошо известен [6–8]. Абсолютные значения мощности отдельных спектральных компонент определялись с учетом независимо измеренной дифференциальной

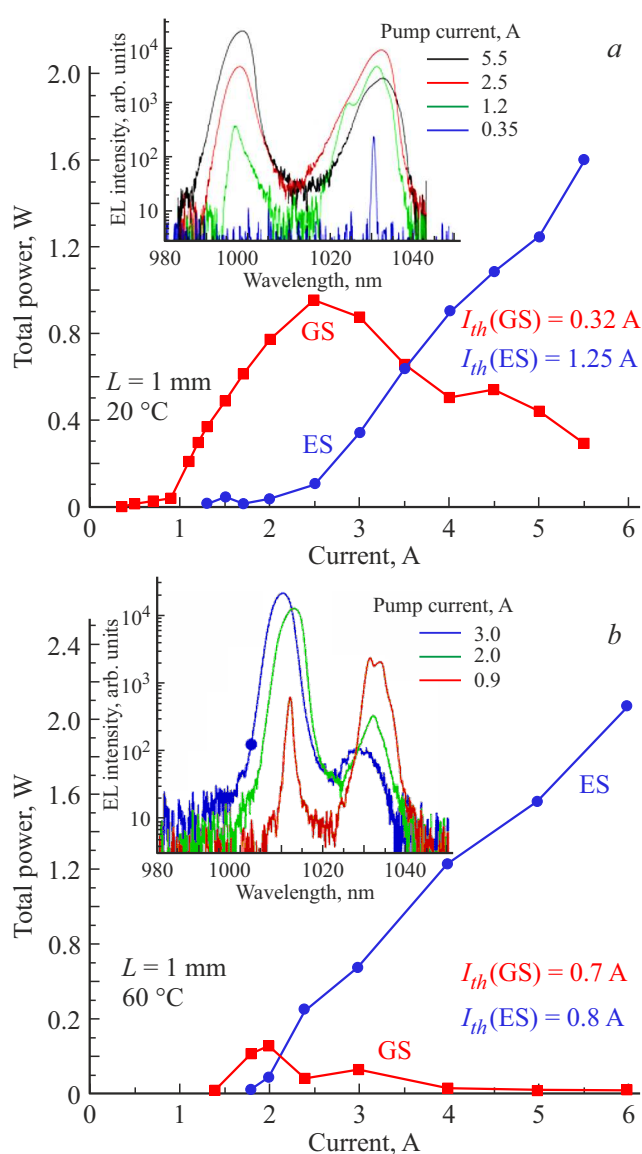


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики лазера с резонатором 1 мм при температуре 20 (a) и 60 °С (b). На вставках показаны соответствующие спектры излучения.

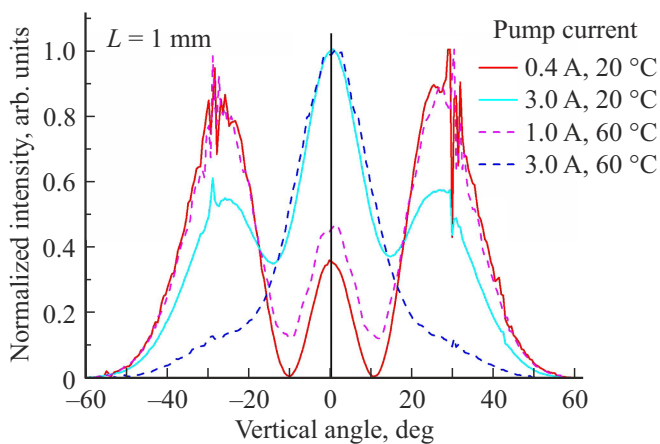


Рис. 3. Картины дальнего поля при различных токах накачки и температурах.

эффективности на начальном участке GS-генерации. При низком уровне инжекции лазерная генерация начинается на GS-оптическом переходе с порогом 0.32 A и длиной волны излучения ~ 1030 nm. С увеличением тока до 2 A наблюдается появление и рост линии излучения в коротковолновой части спектра при ~ 995 nm, обусловленной генерацией на переходе, связанном с ES-состоянием. Интенсивность GS-генерации сначала растет с увеличением тока до 2.5 A (см. рис. 2, а), а потом начинает уменьшаться [9], но при 20 °C в исследуемом диапазоне токов не падает до нуля. Интенсивность ES-генерации монотонно увеличивается с ростом тока. С увеличением температуры до 60 °C порог GS-генерации увеличивается до 0.7 A, а порог ES-генерации снижается до 0.9 A. При этом при высокой температуре интенсивность GS-излучения после начала ES-генерации спадает с ростом тока практически до нуля (при 3 A интенсивность GS-излучения слабее интенсивности ES-излучения на 2 порядка).

Нами были исследованы картины дальнего поля в диапазоне токов (0.3–3.3 A) и температур (20–60 °C). Распределения интенсивностей излучения в дальнем поле при нескольких значениях токов и температур представлены на рис. 3. Видно, что с ростом тока центральный пик распределения интенсивности растет, а интенсивность боковых пиков уменьшается, т. е. лазерная генерация переключается с моды 2-го порядка на фундаментальную моду. Важно подчеркнуть, что такое переключение модового состава излучения сопровождается переключением генерации с основного на возбужденное состояние. Исследование зависимости дальнего поля от температуры показало, что в области высоких температур излучение имеет еще более выраженный пик в центральной части дальнего поля и практически полное отсутствие пиков вблизи углов $\pm 30^\circ$. Данные переключения мод с ростом тока мы связываем с ростом концентрации неравновесных носителей в волноводе и, как следствие, с более быстрым ростом оптических

потерь для мод высоких порядков [10]. Измеренные профили мод лазеров очень близки к смоделированным и представленным на рис. 1.

Были также исследованы распределения интенсивностей излучения лазеров в ближнем поле при различных токах при помощи волоконного СБОМа. Они имели сложную картину, свидетельствующую о генерации мод высокого порядка как в вертикальном, так и в боковом направлениях. С увеличением тока накачки лазеры демонстрировали изменение интенсивности излучения в вертикальном направлении. В спектре, измеренном с помощью оптоволоконного зонда (рис. 4), присутствуют два пика интенсивности, соответствующие генерации через основное и возбужденное состояния. Для определения модового состава излучения, соответствующего линиям GS- и ES-генерации, был использован режим измерения спектров излучения с пространственным разрешением. На рис. 4 (см. вставку слева) показана картина ближнего поля, соответствующая части спектра в диапазоне 986–998 nm (ES-генерации). Отчетливо наблюдается одна полоса интенсивности в вертикальном направлении, что соответствует фундаментальной вертикальной моде. На рис. 4 (см. вставку справа) показано распределение интенсивности излучения в диапазоне 1020–1031 nm (GS-генерации). В этом случае в ближнем поле наблюдаются три пика интенсивности, соответствующие вертикальной моде 2-го порядка. Таким образом, в исследованных лазерах со сверхшироким волноводом лазерная генерация на основном состоянии происходит на моде 2-го порядка, а на возбужденном состоянии — на фундаментальной моде. Экспериментально измеренные ближние и дальние поля соответствуют результатам расчета оптических мод волновода, представленным на рис. 1.

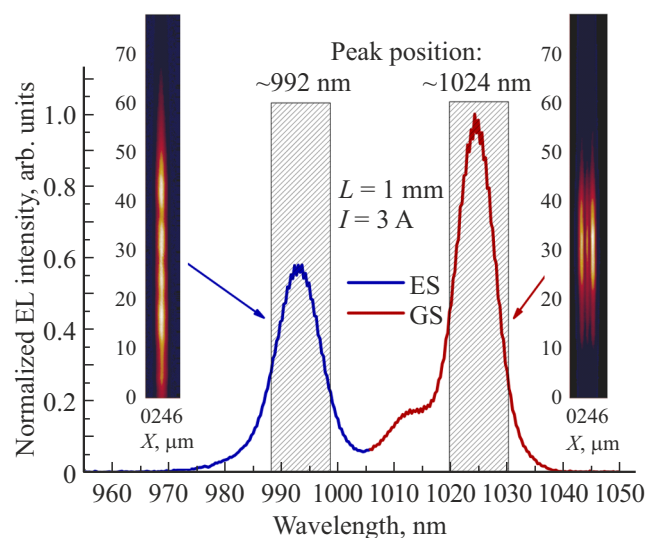


Рис. 4. Спектр электролюминесценции лазерного диода при токе накачки 3 A, полученный при комнатной температуре. На вставках представлены распределения интенсивности на зеркале, полученные в разных спектральных диапазонах.

4. Заключение

Исследованы распределения интенсивности излучения в ближнем и дальнем полях в лазерах InGaAs/GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами со сверхшироким вертикальным волноводом. Показано, что изменение тока накачки или температуры может приводить к изменению пространственного распределения интенсивности излучения вследствие переключения между вертикальными модами и спектральными линиями генерации, соответствующими основному и возбужденному состояниям активной области. При этом впервые показано, что генерация через возбужденное состояние происходит на фундаментальной вертикальной моде. Данный эффект наблюдается при 60 °С, что соответствует стандартному рабочему режиму (перегреву) полупроводниковых лазеров. В лазерах на основе КТ, работающих в режиме ЕС-генерации, большое оптическое усиление и быстрая релаксация носителей заряда из волновода на уровни возбужденного состояния приводят к увеличению максимальной частоты прямой токовой модуляции по сравнению с лазерами, работающими в режиме GS-генерации [11,12]. Те же самые закономерности, вероятно, применимы и к лазерам на КЯ, что обуславливает перспективность потенциального применения данных приборов в высокоскоростных системах оптической связи. Лазеры со сверхшироким волноводом имеют увеличенный порог катастрофической оптической деградации зеркал вследствие меньшей плотности оптической мощности на зеркале, что является одним из условий достижения высокой выходной мощности. Контролируемое током изменение спектра излучения и диаграммы направленности перспективно для передачи информации с использованием новых методов кодирования [13].

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00358. О.И. Симчук благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010) за поддержку исследования скола образцов методом сканирующей электронной микроскопии. И.А. Мельниченко благодарит Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ за поддержку измерений ближнего поля методом СБОМ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Slipchenko, I. Shashkin, D. Nikolayev, V. Shamakhov, A. Podoskin, O. Soboleva, K. Bakhvalov, V. Kriyckov, N. Pikhtin, P. Kop'ev. *Optics Lett.*, **48** (2), 203 (2023). DOI: 10.1364/OL.476248
- [2] N. Ammouri, H. Christopher, A. Maaßdorf, J. Fricke, A. Gino-las, A. Liero, H. Wenzel, A. Knigge, G. Tränkle. *Optics Lett.*, **48** (24), 6520 (2023). DOI: 10.1364/OL.510521
- [3] A. Kozłowska, A. Malag. *Proc. SPIE*, **5120**, 178 (2003). DOI: 10.1117/12.515429
- [4] A.V. Ankudinov, M.L. Yanul, S.O. Slipchenko, A.V. Shelaev, P.S. Dorozhkin, A.A. Podoskin, I.S. Tarasov. *Opt. Express*, **22** (21), 26438 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.026438
- [5] S. Peled. *Appl. Optics*, **19** (2), 324 (1980). DOI: 10.1364/ao.19.000324
- [6] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Z.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **18** (8), 774 (2003). DOI: 10.1088/0268-1242/18/8/310
- [7] M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, G.O. Kornyshev, A.A. Beckman, F.I. Zubov, A.A. Kharchenko, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.G. Dubrovskii, N.Yu. Gor-deev. *Optics Lett.*, **49** (21), 6213 (2024). DOI: 10.1364/OL.532606
- [8] D.A. Veselov, K.R. Ayusheva, N.A. Pikhtin, A.V. Lyutetskiy, S.O. Slipchenko, I.S. Tarasov. *J. Appl. Phys.*, **121** (16), 163101 (2017). DOI: 10.1063/1.4982160
- [9] V.V. Korenev, A.V. Savelyev, M.V. Maximov, F.I. Zubov, Yu.M. Shernyakov, M.M. Kulagina, A.E. Zhukov. *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 132103 (2017). DOI: 10.1063/1.5004268
- [10] E.A. Avrutin, B.S. Ryvkin, A.S. Payusov, A.A. Serin, N.Y. Gor-deev. *Semicond. Sci. Technol.*, **30** (11), 115007 (2015). DOI: 10.1088/0268-1242/30/11/115007
- [11] B.J. Stevens, D.T.D. Childs, H. Shahid, R.A. Hogg. *Appl. Phys. Lett.*, **95** (6), 061101 (2009). DOI: 10.1063/1.3193664
- [12] C. Wang, B. Lingnau, K. Ludge, J. Even, F. Grillot. *IEEE J. Quant. Electron.*, **50** (9), 1 (2014). DOI: 10.1109/JQE.2014.2335811
- [13] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.М. Над-точий, А.Е. Жуков. *Письма ЖТФ*, **49** (5), 18 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.05.54664.19450

Редактор А.Н. Смирнов

Spectral and spatial emission characteristics of edge-emitting InGaAs/GaAs quantum well laser diodes featuring an ultra-broad optical waveguide

A.A. Beckman¹, I.A. Melnichenko^{2,3},
Yu.M. Shernyakov¹, G.O. Kornyshev¹,
N.Yu. Gordeev¹, A.S. Payusov¹,
O.I. Simchuk², Yu.S. Tkach², M.V. Maximov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

³ National Research University
„Higher School of Economics“,
190008 St. Petersburg, Russia

Abstract The laser emission spectra, far-field patterns, and near-field emission intensity distributions of InGaAs/GaAs/AlGaAs edge-emitting quantum well laser diodes with ultra-broad optical waveguide were studied as functions of the pump current and temperature. It was shown that lasing in the ground state occurs in the second-order mode and in the excited state in the fundamental mode.