

07

Генерация замкнутой моды в мощных суперлюминесцентных диодах со скользящим полосковым волноводом

© Н.Ю. Гордеев¹, Ю.М. Шерняков¹, Г.О. Корнышов¹, О.И. Симчук², А.А. Бекман¹, А.С. Паюсов¹,
Ю.А. Салий¹, М.М. Кулагина¹, М.В. Максимов²

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gordeev@switch.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 28 января 2025 г.

Принято к публикации 31 января 2025 г.

Исследованы особенности возникновения замкнутых оптических мод в суперлюминесцентных диодах со скользящим полосковым волноводом с активной областью на основе пяти слоев квантовых ям-точек InGaAs/GaAs, излучающих в диапазоне вблизи $1\ \mu\text{m}$. Предложена простая качественная модель, объясняющая уменьшение порогового тока при увеличении длительности импульса накачки. Предложены методы подавления замкнутых мод, которые могут существенно увеличить выходную оптическую мощность суперлюминесцентных диодов.

Ключевые слова: квантовые яма-точки, оптический волновод, суперлюминесцентный диод, замкнутая мода.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.10.60326.20221

Суперлюминесцентные диоды (СЛД) представляют особый класс полупроводниковых излучателей, для которых характерны широкий спектр излучения, достигающий десятков нанометров, и относительно высокая оптическая мощность [1]. По выходной мощности СЛД ближе к диодным лазерам, а по спектру излучения — к светодиодам. Ширина спектра излучения в общем случае обратно пропорциональна длине когерентности, поэтому для СЛД типична малая длина когерентности. Этот фактор определяет основные области применения СЛД — оптическая когерентная томография и волоконные гироскопы [1]. По конструкции СЛД близки к диодным лазерам: они имеют активную область, в которой создается усиление, интегрированную в оптический волновод. Принципиальным отличием СЛД от лазеров является максимальное подавление положительной обратной связи в СЛД. За счет этого СЛД после достижения инверсии населенности не переходят в режим лазерной генерации, а работают в режиме усиления спонтанного излучения (суперлюминесцентном режиме). В качестве активной области используются усиливающие среды, аналогичные применяемым в лазерах: квантовые ямы, квантовые точки. Основной проблемой при создании СЛД является эффективное подавление обратной связи. Принципиально это может быть сделано введением в оптический волновод локальных потерь, подавляющих лазерную генерацию, и/или уменьшением отражения на торцевых гранях волновода. Чаще всего применяют последний подход, который практически может быть реализован несколькими способами, такими как нанесение на выходные грани просветляющих покрытий с коэффициентом отражения менее 10^{-5} и/или использование так

называемых наклонных полосковых волноводов. Последний метод относительно прост технологически, но интерференция между падающим и отраженным светом на торце наклонного волновода приводит к возникновению резонансного характера спектра отражения, который является очень чувствительным к параметрам волноводов (ширина, контраст показателей преломления) и к режиму работы СЛД (температура, ток накачки). В итоге при некотором токе накачки оптическое усиление может превысить потери и начнется лазерная генерация. Еще одним недостатком наклонных полосков является наличие остаточной модуляции Фабри–Перо.

Недавно мы предложили новую простую конструкцию полоскового волновода, позволяющую эффективно подавлять обратную связь в СЛД [2]. Ключевым отличительным элементом конструкции является использование боковой грани суперлюминесцентного диода, относительно которой наклонный полосок находится под небольшим углом, поэтому конструкция получила название „скользящий полосковый волновод“ (рис. 1, *a*). Было показано, что СЛД в такой геометрии с активной областью на основе InGaAs квантовых ям-точек позволяют получить мощность вплоть до $150\ \text{mW}$ при ширине спектра более $20\ \text{nm}$ в диапазоне длин волн около $1\ \mu\text{m}$. Нами было отмечено, что в СЛД со скользящим полоском может возникать лазерная генерация на так называемых замкнутых модах (ЗМ). Моды такого типа известны и достаточно подробно исследованы в мощных торцевых лазерах, где они являются одной из причин срыва лазерной генерации мод резонатора Фабри–Перо [3]. ЗМ возникают из-за полного внутреннего отражения (рис. 1, *b*) и могут существовать во всем

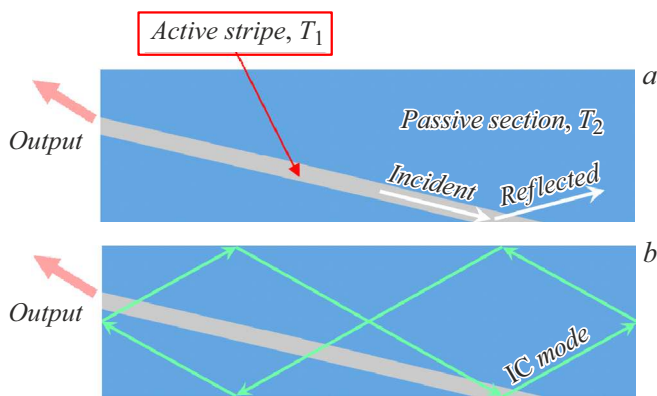


Рис. 1. *a* — схематическое изображение суперлюминесцентного диода со скользящим полосковым волноводом. Температура активной области T_1 больше температуры пассивной области T_2 . *b* — схема формирования замкнутых мод (internally circulating, IC mode) в СЛД.

волноводном слое, включая его активные и пассивные области. Замкнутые моды имеют высокую добротность и низкие оптические потери на выход, поэтому для них соответственно типичны узкая спектральная линия и относительно низкая выходная интенсивность. В случае достаточного перекрытия со средой с высоким усилением ЗМ могут участвовать в генерации.

В настоящей работе мы рассматриваем особенности возникновения замкнутых мод при импульсной и непрерывной накачке, предлагаем качественную модель необычной зависимости порога лазерной генерации от длительности импульса накачки и обсуждаем варианты подавления замкнутых мод.

Исследования проводились на образцах СЛД, аналогичных исследованным в работе [2]. Гетероструктура была выращена на GaAs-подложке методом металлоорганической газовой фазной эпитаксии. В качестве активной области использовались пять слоев чирпированных InGaAs квантовых ям-точек с номинальными длинами волн излучения 985, 1015, 1040, 1060 и 1075 nm. Разная длина волны каждого активного слоя задавалась на этапе эпитаксиального роста изменением номинальной толщины осаждаемого материала $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ от четырех до восьми монослоев. Активные слои были разделены прослойками GaAs толщиной 40 nm. Активная область находилась в середине GaAs волноводного слоя толщиной $0.44\ \mu\text{m}$, заключенного между $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ *n*- и *p*-эмиттерами толщиной 1.5 и $1.2\ \mu\text{m}$ соответственно. Толщина завершающего контактного GaAs слоя составляла 200 nm. Ширина полоскового волновода составляла $20\ \mu\text{m}$, угол его наклона к выходному зеркалу 10° . В исследуемых образцах качество зеркал, полученных скалыванием, контролировалось с помощью оптического микроскопа, работающего в режиме темного поля. Длина волновода варьировалась в пределах 1–2 mm. Образцы для исследований напайвались эпитаксиальными слоями вниз на медные теплоотводы. Выходная мощность

излучения измерялась с помощью калиброванной интегрирующей сферы, в которую было встроено оптическое волокно, соединенное со спектроанализатором. Использовались три варианта тока накачки: непрерывный, квазинепрерывный (длительность импульса 10, 20, 50, 100, $250\ \mu\text{s}$, частота 1 kHz), импульсный (350 ns, 3 kHz).

Типичная зависимость спектра излучения СЛД от амплитуды тока накачки представлена на рис. 2. Ширина спектра на половинной высоте составляет около 20 nm, что заметно меньше ширины 92 nm, полученной ранее для СЛД малой мощности, изготовленных из той же структуры [4]. В целом для СЛД любого типа при увеличении выходной мощности наблюдается тенденция сужения спектра излучения [5]. Порог лазерной генерации, возникающей в СЛД, регистрировался по возникновению узкой линии в спектре излучения (рис. 2). При пороговом токе не наблюдается какого-либо излома или иной особенности на зависимости излучение–ток (рис. 3). Увеличение длительности импульса тока накачки приводит к некоторому падению дифференциальной квантовой эффективности, что обусловлено большим разогревом активной области. Такая зависимость является типичной как для светодиодов, так и для диодных лазеров. В последних увеличение длительности импульса или температуры приводит к возрастанию порогового тока, поскольку уменьшается оптическое усиление из-за термического выброса носителей из активной области. В исследованных СЛД наблюдается иная зависимость. Пороговый ток лазерной генерации при накачке короткими импульсами в разы больше, чем при накачке постоянным током (рис. 4). Порог уменьшается при увеличении длительности импульса накачки до $100\ \mu\text{s}$ и далее остается практически неизменным вплоть до накачки постоянным током.

Такой характер зависимости можно объяснить в рамках следующей качественной модели. Ключевой особенностью лазерной генерации в исследованных СЛД является то, что она осуществляется не за счет мод Фабри–Перо, а за счет замкнутых мод. Их формирование и распространение осуществляется во всем волноводном слое. Замкнутая мода в пределах волноводного слоя испытывает усиление, когда ее оптический путь пересекает полосковый волновод, и поглощение, когда распространяется в пассивной области вне полоска. Условием возникновения лазерного излучения является равенство модального усиления сумме всех оптических потерь. Для замкнутых мод потерями на выход излучения из кристалла можно пренебречь, поэтому лазерный порог определяется зависимостью модальных потерь в пассивной области от длительности импульса накачки.

В общем случае ток накачки вызывает локальный разогрев области усиления, расположенной непосредственно под полосковым контактом, что приводит к возникновению разницы между температурами области усиления T_1 и области поглощения T_2 (рис. 1, *a*). Для коротких импульсов температурная разница пренебрежимо мала и не оказывает существенного влияния на

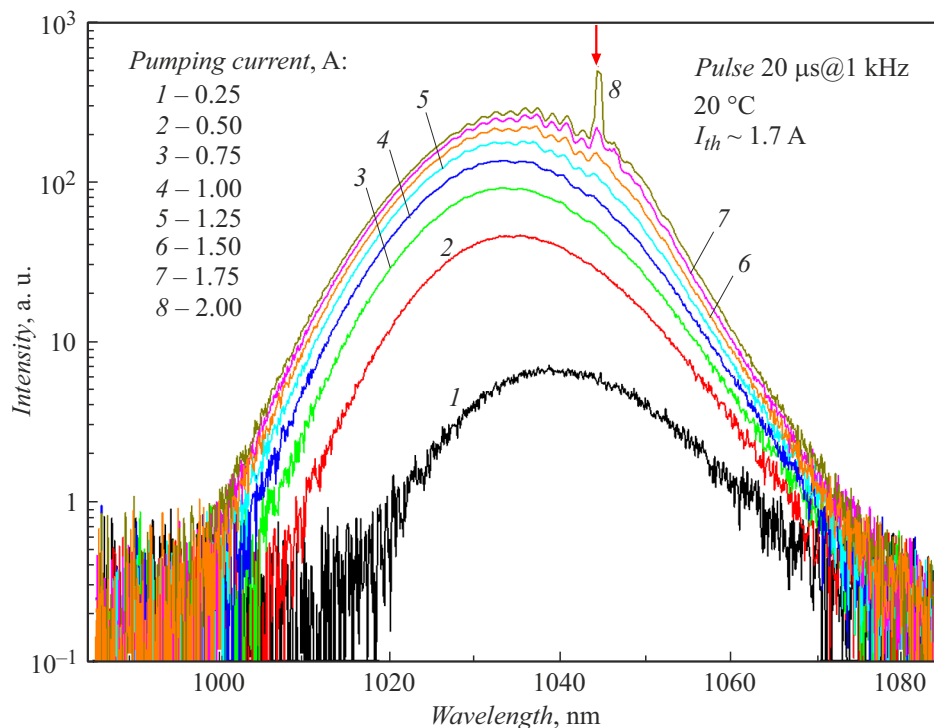


Рис. 2. Эволюция спектра излучения СЛД с длиной волновода 1.4 mm в зависимости от амплитуды тока накачки. Стрелкой отмечена линия лазерной генерации. Порог лазерной генерации I_{th} примерно равен 1.7 A.

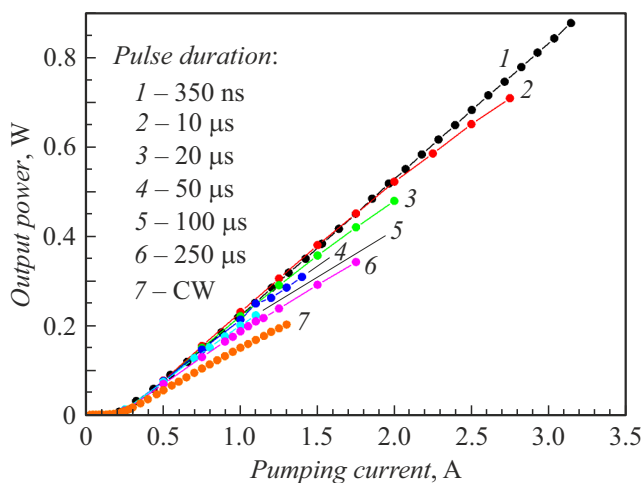


Рис. 3. Зависимости излучение—ток при разных длительностях импульса тока накачки и при непрерывной накачке (CW) для СЛД с длиной волновода 1.4 mm.

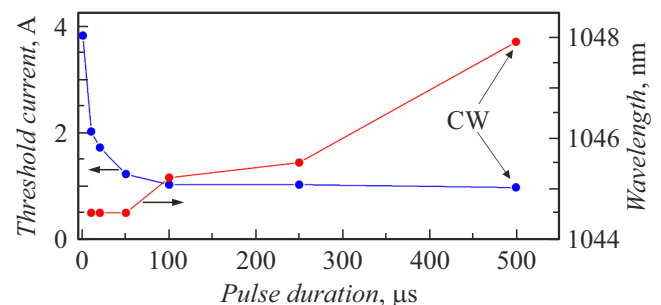


Рис. 4. Зависимость порогового тока и длины волны лазерной генерации от длительности импульса накачки для СЛД с длиной волновода 1.4 mm.

оптические моды. Увеличение длительности импульса тока накачки естественным образом увеличивает пространственный температурный градиент, и спектр усиления смещается в длинноволновую область относительно спектра поглощения пассивной области. Подтверждением этого может служить наблюдаемое длинноволновое смещение длины волны лазерной генерации (рис. 4). Заметим, что по этой зависимости нельзя делать оценку

изменения температуры активной области, поскольку при разных длительностях импульса накачки лазерная генерация может осуществляться на разных замкнутых модах. В исследованных СЛД за счет этого эффекта уменьшаются модальные оптические потери для замкнутых мод, и условие лазерной генерации при накачке импульсами большей длительности наступает при меньших амплитудах тока. Эта особенность формирования оптических мод была подробно исследована ранее для мощных торцевых диодных лазеров [3] при анализе причин срыва лазерной генерации мод резонатора Фабри–Перо.

Формирование замкнутых мод в СЛД со скользящим волноводом требует дальнейшего исследования, в том числе численного моделирования, но с учетом

уже имеющихся данных можно рассматривать варианты подавления замкнутых мод. Просветляющие покрытия на гранях кристалла или увеличение рассеивания не приведут к существенному подавлению замкнутых мод. Сообщалось, что такие моды наблюдались даже в лазерах с пилеными гранями [6]. Представляется, что они могут быть подавлены за счет увеличения их модального поглощения. Самым простым вариантом может быть увеличение размеров пассивной части образца, но исходя из полученных экспериментальных данных эффективность такого подхода может быть ограничена. Другим вариантом может быть создание гальванической развязки между активной и пассивной областями и приложение к последней обратного смещения. Такая область прибора будет работать как эффективный поглотитель. Недостатком этого решения является необходимость монтажа приборов либо на теплоотводы эпитаксиальными слоями вверх, что может препятствовать их работе при непрерывной накачке, либо на металлизированные платы с индивидуальными контактными площадками эпитаксиальными слоями вниз, что существенно усложнит изготовление СЛД. Для подавления ЗМ могут использоваться V-канавки, сформированные травлением сквозь волновод в пассивной области. Еще одним подходом может быть создание методами ионной имплантации [7] центров безызлучательной рекомбинации в пассивной области, вносящих в нее дополнительные оптические потери. Эта технология может сочетаться с постростовой обработкой структур.

Таким образом, в настоящей работе мы исследовали особенности возникновения замкнутых оптических мод в суперлюминесцентных диодах со скользящим полосковым волноводом при накачке непрерывным, квазипрерывным и импульсным током. Предложена простая качественная модель, объясняющая уменьшение порогового тока при увеличении длительности импульса накачки, которая учитывает пространственный температурный градиент в плоскости волноводного слоя внутри кристалла. Предложены варианты подавления замкнутых мод, которые могут существенно увеличить выходную оптическую мощность.

Благодарности

Исследования выполнены с использованием Уникальной научной установки „Комплексный оптоэлектронный стенд“ (Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург).

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00038 (<https://rscf.ru/project/23-72-00038/>). О.И. Симчук благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010) за поддержку исследования зеркал тестовых образцов методом темнопольной микроскопии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Lu, O. Alkhazragi, Y. Wang, N. Almaymoni, W. Yan, W.H. Gunawan, H. Lin, T.-Y. Park, T.K. Ng, B.S. Ooi, npj Nanophotonics, **1** (1), 9 (2024). DOI: 10.1038/s44310-024-00005-w
- [2] N.Yu. Gordeev, A.S. Payusov, Yu.M. Shernyakov, G.O. Kornyshev, A.A. Beckman, M.V. Maximov, Opt. Lett., **50** (3), 956 (2025). DOI: 10.1364/OL.546571
- [3] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, А.Ю. Лешко, Н.А. Пиктин, В.В. Забродский, И.С. Тарасов, ФТП, **45** (10), 1431 (2011). [S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, A.Y. Leshko, N.A. Pikhtin, V.V. Zabrodskiy, I.S. Tarasov, Semiconductors, **45** (10), 1378 (2011). DOI: 10.1134/S106378261100162].
- [4] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Г.О. Корнышов, О.И. Симчук, Н.Ю. Гордеев, А.А. Бекман, А.С. Паюсов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, М.М. Кулагина, А.Е. Жуков, ФТП, **57** (4), 301 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55902.5262 [M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, G.O. Kornyshev, O.I. Simchuk, N.Yu. Gordeev, A.A. Beckman, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.M. Kulagina, A.E. Zhukov, Semiconductors, **57** (4), 294 (2023). DOI: 10.61011/SC.2023.04.56429.5262].
- [5] F. Forrest, M. Krakowski, P. Bardella, M.A. Cataluna, Opt. Express, **27** (8), 10981 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.010981
- [6] G.D. Henshall, Appl. Phys. Lett., **31** (3), 205 (1977). DOI: 10.1063/1.89649
- [7] A. Kieslich, H. Doleschel, J.P. Reithmaier, A. Forchel, N.G. Stoffel, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **99** (1-4), 594 (1995). DOI: 10.1016/0168-583X(95)00323-1