

Высокоскоростные одномодовые вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 1550 нм

© С.А. Блохин¹, А.В. Бабичев², Л.Я. Карачинский², И.И. Новиков², А.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, А.Г. Кузьменков¹, Н.А. Малеев¹, В.В. Андришкин², В.Е. Бугров², А.Г. Гладышев³, Д.В. Денисов⁴, К.О. Воропаев⁵, И.О. Жумаева⁵, В.М. Устинов⁶, Н. Li⁷, S.C. Tian^{8,9}, S.Y. Han^{8,9}, Г.А. Сапунов^{8,9}, А.Ю. Егоров^{3,10}, D. Bimberg^{8,9}

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

² Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

³ ООО Коннектор Оптикс, 194292 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, Россия

⁵ АО „ОКБ-Планета“, 173004 Великий Новгород, Россия

⁶ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁷ College of Mathematical and Physical Sciences, Qingdao University of Science and Technology, 266061 Qingdao, China

⁸ Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences (CAS), 130033 Changchun, China

⁹ Center of Nanophotonics, Institute of Solid State Physics, Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, Germany

¹⁰ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 17 мая 2022 г.

В окончательной редакции 16 июня 2022 г.

Принята к публикации 16 июня 2022 г.

Представлены результаты комплексных исследований статических и динамических характеристик вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1550 нм, созданных по технологии спекания пластины оптического резонатора InAlGaAs/InP с пластинами распределенных отражателей AlGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Лазеры с диаметром мезы зарощенного туннельного перехода менее 7 мкм продемонстрировали одномодовую лазерную генерацию с фактором подавления боковых мод более 40 дБ, однако при размерах мезы менее 5 мкм наблюдается резкое увеличение порогового тока, обусловленное возникновением насыщающегося поглотителя из-за проникновения поля фундаментальной моды в непрокачиваемые области активной области. Максимальные выходная оптическая мощность в одномодовом режиме генерации и эффективная частота модуляции по уровню спада сигнала на –3 дБ достигали значений 4.5 мВт и 8 ГГц соответственно при 20 °С. Максимальная скорость передачи данных при 20 °С в режиме прямой токовой модуляции при кодировании по амплитудному формату без возвращения к нулю составила 23 Гбит/с для короткой линии связи на основе одномодового волокна SMF-28. По мере увеличения протяженности оптической линии связи до 2000 м предельная скорость передачи данных падала и составляла 18 Гб/с. Выявлены и обсуждаются основные факторы, влияющие на быстродействие и дальность передачи данных, и предложены дальнейшие пути их преодоления.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, спекание пластин, молекулярно-пучковая эпитаксия, одномодовый режим, быстродействие.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53151.9890

1. Введение

Растущие с каждым годом потребности центров хранения-обработки данных (англ. datacenters) и информационно-вычислительных систем (англ. supercomputers)

в повышении пропускной способности и одновременно протяженности оптических межсоединений стимулируют не только активное внедрение оптических линий связи на основе одномодового оптического волокна (англ. single-mode fiber, SMF), но и поиск новых техниче-

ских решений. Благодаря низкому энергопотреблению, малым потерям в SMF волокнах и совместимости с классической технологией спектрального уплотнения канала связи (англ. wavelength division multiplexing, WDM) наблюдается новый виток научного интереса к длинноволновым вертикально-излучающим лазерам (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting laser) [1]. Поскольку пропускная способность оптических каналов связи может быть увеличена в рамках технологии пространственного мультиплексирования (англ. spatial division multiplexing, SDM) при использовании оптического волокна с малым числом мод (англ. few-mode fiber, FMF) или многомодового оптического волокна (англ. multicore fiber, MCF) [2], применение ВИЛ для реализации нового поколения многоканальной оптической передачи данных представляется многообещающим решением [3]. При этом длинноволновые ВИЛ открывают широкие перспективы в области реализации экономичных и энергоэффективных высокоскоростных многоканальных протяженных оптических межсоединений [4]. Таким образом, повышение скорости и дальности оптической передачи данных с использованием одномодовых длинноволновых ВИЛ является крайне актуальным.

Классический способ создания монокристаллических (т. е. выращенных в едином ростовом процессе) ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе системы материалов InAlGaAsP/InP сопряжен с проблемой малого контраста показателей преломления и низкой теплопроводности тройных и четверных твердых растворов, решеточно-согласованных с InP, что ведет к сильному эффекту саморазогрева и ограничивает выходную оптическую мощность (~ 1.6 мВт @ 20°C) и быстродействие (~ 4 ГГц @ 20°C) [5]. Альтернативным способом создания ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм является комбинация активной области на основе системы материалов InAlGaAsP/InP с распределенными брэгговскими отражателями (РБО, англ. distributed Bragg reflector), обладающими одновременно высокой отражательной способностью и повышенной теплопроводностью. В настоящий момент можно выделить два основных перспективных подхода: гибридная интеграция оптического резонатора с высококонтрастными металл-диэлектрическими зеркалами (далее ГИ-ВИЛ) и технология спекания пластин (далее СП-ВИЛ).

В рамках первого подхода замена только одного полупроводникового InAlGaAs/InAlAs РБО на диэлектрическое зеркало привела к повышению частоты эффективной модуляции ГИ-ВИЛ с активной областью на основе напряженных InAlGaAs квантовых ям (КЯ) до 12 ГГц @ 25°C [6] и продемонстрировала принципиальную возможность оптической передачи данных на ультракороткой линии связи (англ. back-to-back, ВТВ) на скорости до 25 Гбит/с при прямой токовой модуляции в режиме без возвращения к нулю (англ. nonreturn-to-zero, NRZ) [7]. Дальнейшее развитие этого подхода за счет применения концепции сверхкороткого микрорезонатора и уменьшения диаметра токовой апертуры позволило реализовать рекордно высокие частоты эффективной

модуляции в режиме малого сигнала ~ 22 ГГц @ 25°C и поднять скорость передачи данных до 50 Гбит/с в конфигурации ВТВ, а также продемонстрировать возможность безошибочной передачи данных по одномодовому волокну SMF-28 на 200 м при 40 Гбит/с и 1 км при 28 Гбит/с [8] без применения алгоритмов цифрового предсказания и коррекции ошибок. Однако используемый в данной конструкции ГИ-ВИЛ подход, основанный на минимизации объема моды с целью достижения более высоких резонансных частот, в значительной степени ограничивает предельную выходную оптическую мощность лазеров [9]. К недостаткам описанного подхода также стоит отнести необходимость использования специфических диэлектрических материалов (AlF_3 , ZnS , CaF_2) для формирования РБО.

Второй подход позволяет объединить уникальные возможности системы материалов InAlGaAsP/InP (в части реализации эффективной активной области) с преимуществами системы материалов AlGaAs/GaAs (в части создания эффективных полупроводниковых РБО) и получить рекордно высокую (> 6 мВт @ 20°C) выходную мощность в одномодовом режиме генерации [10,11] без применения дополнительных методов селекции мод высокого порядка в отличие от первого подхода [12]. Следует отметить, что, несмотря на необходимость последовательного двойного спекания пластины оптического резонатора InAlGaAsP/InP с пластинами верхнего и нижнего AlGaAs/GaAs РБО, данного рода СП-ВИЛ потенциально позволяют обеспечить надежность, удовлетворяющую стандарту GR-468-CORE Telcordia [13]. В случае применения InAlGaAs КЯ в качестве активной области была достигнута предельная частота эффективной модуляции около 8 ГГц и продемонстрирована безошибочная передача данных на 10 км при 10 Гбит/с в NRZ-режиме модуляции [14]. Для дальнейшего повышения быстродействия лазеров нами было предложено использовать активную область на основе тонких напряженных InGaAs/InAlGaAs КЯ [15]. С точки зрения реализации резких гетероинтерфейсов наиболее предпочтительным вариантом является применение технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ, англ. molecular beam epitaxy), поскольку она обеспечивает контроль роста на атомарном уровне в отличие от метода газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС, англ. metalorganic chemical vapour deposition) [16]. Недавно мы показали принципиальную возможность применения метода МПЭ на всех этапах создания гетероструктуры ВИЛ, включая эпитаксиальное зарастивание для формирования заросшего туннельного перехода (ЗТП, англ. buried tunnel junction) [17], и продемонстрировали эффективные СП-ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм [18,19].

В настоящей работе представлены результаты детальных исследований ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм, реализованных в рамках метода МПЭ и технологии спекания пластин. Изучены статические характеристики и модовый состав излучения лазеров в зависимости от размера токовой апертуры. Методом мало-сигнального частного анализа исследованы механизмы,

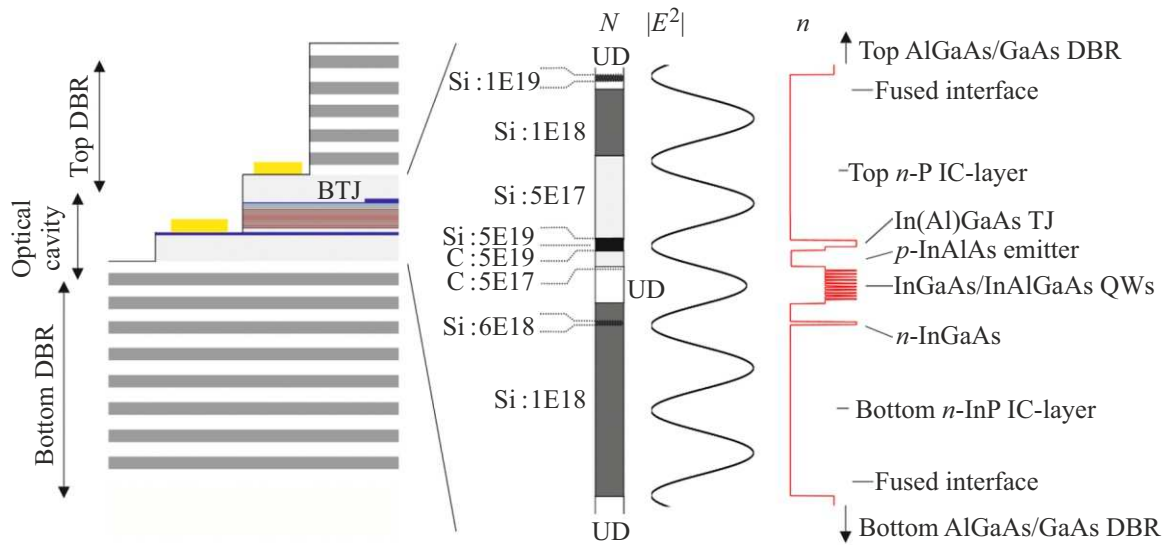


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения приборной конструкции СП-ВИЛ и распределение интенсивности электромагнитного поля фундаментальной моды $|E^2|$ (в отн. ед.) и уровня легирования N (в см^{-3}) вдоль профиля показателя преломления n в области микрорезонатора. DBR — распределенный брэгговский отражатель, IC — внутрирезонаторный контакт, TJ — туннельный переход, TJ — заращенный туннельный переход, QW — квантовая яма, UD — undoped (нелегированный).

ограничивающие быстродействие лазеров. Определена дальность оптической передачи данных с использованием разработанных одномодовых лазеров при прямой токовой модуляции в NRZ-режиме.

2. Экспериментальные образцы

В качестве базовой конструкции СП-ВИЛ использована геометрия вертикального оптического микрорезонатора, ограниченного нелегированными полупроводниковыми РБО, с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои (ВРК-слои) n -типа и туннельный переход для минимизации поглощения на свободных носителях [10,11]. Гибридная гетероструктура СП-ВИЛ (рис. 1) спектрального диапазона 1550 нм сформирована последовательным двойным спеканием пластины оптического резонатора InAlGaAs/InP с пластинами верхнего РБО на основе 22.5 пар слоев AlGaAs/GaAs и нижнего РБО на основе 35.5 пар слоев AlGaAs/GaAs на установке соединения пластин EVG 510. Нюансы примененной технологии спекания пластин приведены в работе [20]. В качестве активной области выбраны сильнонапряженные $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ КЯ толщиной 2.4 нм (параметр рассогласования кристаллической решетки $\sim 1.4\%$), разделенные решеточно-согласованными барьерными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.31}\text{As}$. С целью повышения модового усиления за счет модификации продольного фактора оптического ограничения количество ям увеличено до 10, а толщина барьеров уменьшена до 7 нм [15]. В результате, суммарное напряжение слоев активной области относительно материала подложки InP составило $\sim 0.36\%$. Латеральное токовое и оптическое ограничение было реализовано

в рамках концепции ЗТП [21], путем формирования в композитном $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.31}\text{As}$ ТП мелких мез диаметром 4–8 мкм химическим травлением n^{++} - и p^{++} - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ слоев с последующим эпитаксиальным заращиванием поверхностного рельефа слоем n -InP с модулированным профилем легирования [17]. Выбор глубины травления мез обусловлен компромиссом между высокой выходной оптической мощностью в одномодовом режиме генерации и подавлением эффекта насыщающегося поглотителя в непрокачиваемых частях активной области, возникающего при относительно слабом поперечном оптическом ограничении [22]. Следует отметить, что эпитаксиальный рост исходных гетероструктур оптического резонатора и РБО, а также процесс заращивания выполнены в рамках метода МПЭ на промышленной установке Riber 49. Прочие детали конструкции гетероструктуры СП-ВИЛ приведены в работах [17,22].

Приборная конструкция СП-ВИЛ представляет собой тройную мезаструктуру (рис. 1) и формируется следующим образом: плазмохимическим травлением в индуктивно-связанной плазме формируется первая меза в верхнем AlGaAs/GaAs РБО для вскрытия верхнего ВРК-слоя, химическим травлением формируется вторая меза в оптическом резонаторе InAlGaAs/InP для вскрытия нижнего ВРК-слоя, химическим травлением формируется третья меза в нижнем ВРК-слое для снижения ёмкости контактных площадок, плазмохимическим осаждением из газовой фазы формируется слой диэлектрика SiN для электрической изоляции, плазмохимическим травлением диэлектрика SiN формируются окна к контактным слоям, методом взрывной литографии формируются контакты и контактные площадки Ti/Pt/Au.

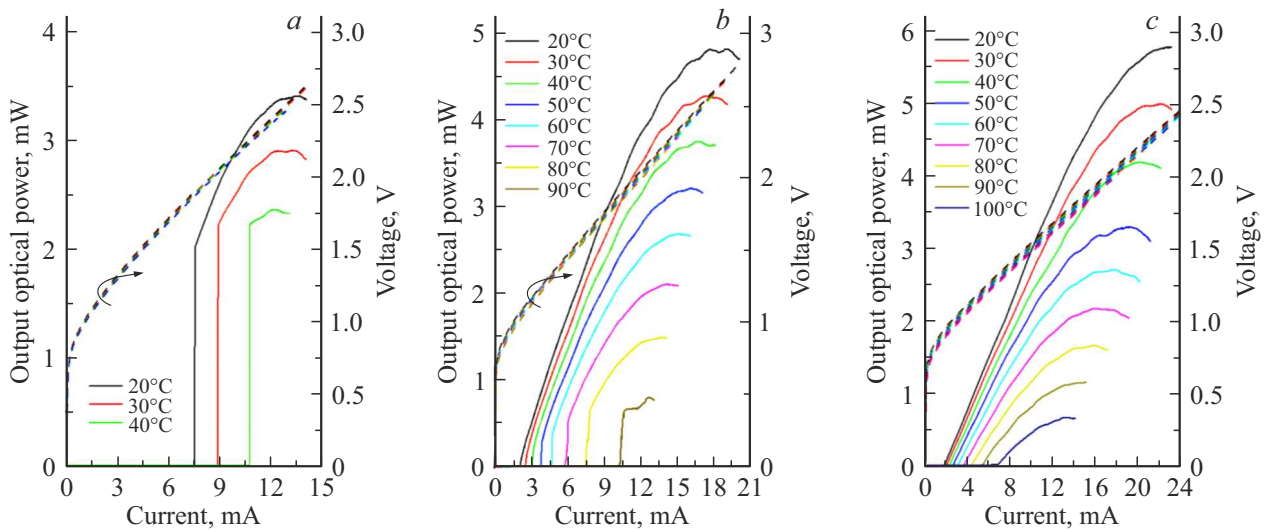


Рис. 2. Вольт- и ватт-амперные характеристики СП-ВИЛ с диаметром мезы ЗТП 4 (а), 6 (b) и 8 мкм (с).

Особенности изготовления данного типа лазеров приведены в работе [23].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены вольт-амперные и ватт-амперные характеристики (ВтАХ) для СП-ВИЛ с различным диаметром мезы ЗТП, измеренные в широком диапазоне температур. Лазеры с диаметром мезы ЗТП 4 мкм демонстрируют скачкообразное увеличение выходной оптической мощности с ростом тока накачки, сопровождаемое резким увеличением наблюдаемой величины порогового тока (далее нелинейность ВтАХ), что затрудняет адекватную оценку дифференциальной эффективности лазеров (см. рис. 2, а). Поскольку настоящая приборная конструкция ВИЛ не оптимизирована для работы при высоких уровнях выделяемой тепловой мощности, тепловой загиб ВтАХ наблюдается при относительно малых рабочих токах ~ 13 мА, что ограничивает максимальную выходную оптическую мощность на уровне 3.4 мВт. Приборы демонстрируют лазерную генерацию через фундаментальную моду (так называемый одномодовый режим) с фактором подавления боковых мод (англ. side mode suppression ratio, SMSR) > 50 дБ во всем рабочем диапазоне токов накачки (см. рис. 3, а). Наблюдаемая нелинейность ВтАХ может быть обусловлена как резким увеличением дифракционных потерь на периферии мезы ЗТП [24], так и с формированием насыщающего поглотителя вне области мезы ЗТП (с учетом латерального растекания тока) [25]. Увеличение внешней температуры лазера ведет к усилению эффекта нелинейности ВтАХ и исчезновению лазерной генерации при температурах $> 40^\circ\text{C}$. Поскольку рассеяние/дифракция света на неоднородностях показателя преломления слабо зависит от внешней температуры, можно предположить, что основной вклад дает поглощение света на

резонансной длине волны в непрокачиваемых частях активной области, которое резко усиливается по мере приближения максимума спектра усиления активной области к резонансной длине волны микрорезонатора.

С увеличением размера мезы ЗТП наблюдается ослабление эффекта нелинейности ВтАХ и увеличение предельной температуры, при которой наблюдается лазерная генерация, что обусловлено ростом фактора поперечного оптического ограничения для фундаментальной моды. Так, лазеры с диаметром мезы ЗТП 6 мкм демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током < 2 мА и дифференциальной эффективностью 0.4 Вт/А при температуре 20°C . Дифференциальное сопротивление не превышает 95–100 Ом благодаря отказу от использования слоев InGaAsP в качестве контактных слоев. Поскольку тепловое сопротивление ВИЛ обратно пропорционально размеру токовой апертуры, а последовательное электрическое сопротивление обратно пропорционально площади токовой апертуры, то эффект саморазогрева с ростом тока наиболее ярко выражен в лазерах с малым размером токовой апертуры. Увеличение размера мезы ЗТП позволяет расширить диапазон рабочих токов и поднять максимальную выходную оптическую мощность до 4.8 мВт (см. рис. 2, б). Предельное значение коэффициента полезного действия (кпд, англ. — wall-plug efficiency) достигает 20%. Следует отметить, что увеличение латеральных размеров зарощенного рельефа (зарощивание поверхностного рельефа, сформированного в ТП) ведет к уменьшению фактора поперечного оптического ограничения для мод высокого порядка и способствует реализации режима одномодовой генерации при больших размерах мезы ЗТП. В результате лазеры демонстрируют стабильную одномодовую генерацию с величиной SMSR > 45 дБ при размерах мезы ЗТП до 7 мкм.

По мере увеличения температуры до 70°C наблюдается увеличение порогового тока до 6 мА, а также падение

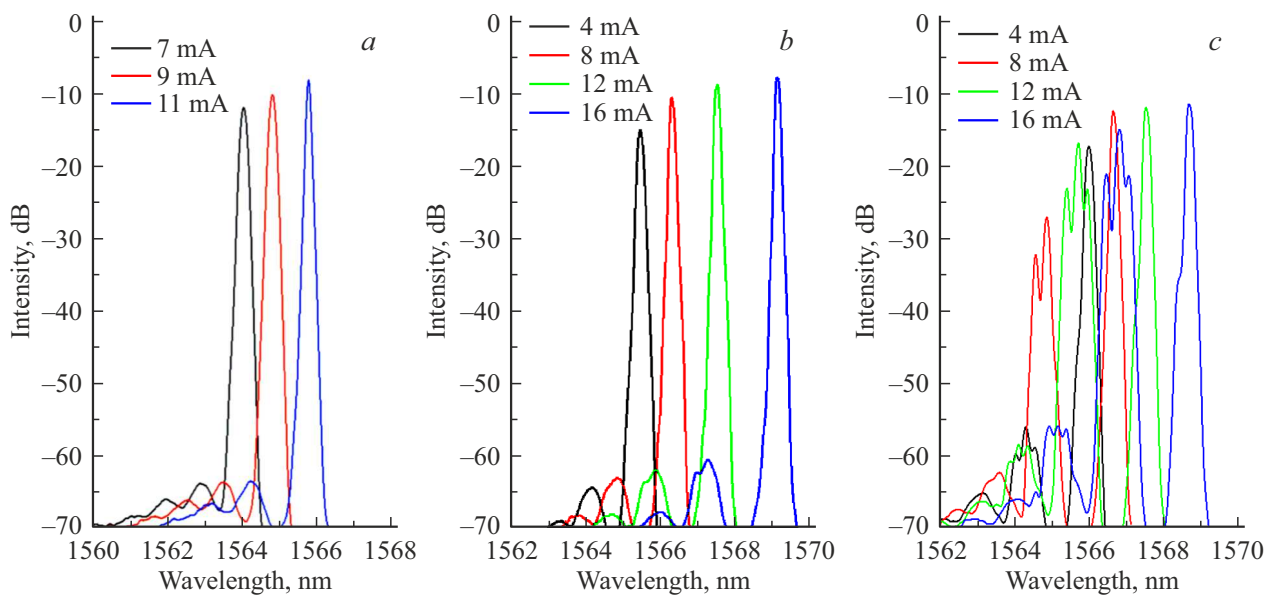


Рис. 3. Спектры лазерной генерации СП-ВИЛ с диаметром мезы ЗТП 4 (а), 6 (б) и 8 мкм (с), измеренные при температуре 20°С.

максимальной выходной оптической мощности и предельного значения КПД до 2.1 мВт и 9% соответственно. Предельная температура, при которой наблюдается лазерная генерация, достигает 95°С. Следует отметить, что при температурах > 50°С начинают проявляться характерные особенности, присущие эффекту насыщающегося поглотителя, что связано с уменьшением актуального спектрального рассогласования резонансной длины волны микрорезонатора относительно спектра усиления активной области с ростом температуры.

Для лазеров с размером мезы ЗТП > 7 мкм эффект нелинейности ВТАХ полностью подавлен (фактор поперечного оптического ограничения близок к 100%). Однако проявляется аномальное поведение ВТАХ другого рода — увеличение дифференциальной эффективности с ростом тока накачки. Так, лазеры с диаметром мезы ЗТП 8 мкм при температуре 20°С демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током < 2 мА, предельным КПД ~ 19% и максимальной выходной оптической мощностью ~ 5.8 мВт (см. рис. 2, с). При малых токах накачки дифференциальная эффективность достигает 0.35 Вт/А (область I), но при более высоких токах она увеличивается до 0.41 Вт/А (область II). Данный эффект может быть связан с особенностями изменения модового состава излучения. Анализ спектров лазерной генерации выявил резкое падение величины SMSR и переключение в многомодовый режим генерации в области II (см. рис. 3, с). По-видимому, обнаруженное поведение связано с неравномерностью распределения плотности тока накачки по площади (концентрацией тока на периферии мезы ЗТП, так называемый current crowding), характерной для ВИЛ с инжекцией носителей через ВРК-слои [26] и приводящей к снижению эффективной инжекции носителей заряда для фундаментальной моды по сравнению с модами высокого порядка. Следует

отметить, что обнаруженный эффект будет усиливаться при дальнейшем увеличении размера мезы ЗТП.

По мере увеличения температуры наблюдается рост порогового тока, преимущественно обусловленный термическим выбросом носителей из тонких InGaAs КЯ [11]. Так, при температуре 70°С пороговый ток возрастает до 3.5 мА, а максимальная выходная оптическая мощность и предельное значение КПД падают до 2.2 мВт и 9.5% соответственно. Предельная температура, при которой наблюдается лазерная генерация, достигает ~ 110°С. Более того, точка перегиба ВТАХ между областями I и II сдвигается в сторону больших токов, а разница в величине дифференциальной эффективности нивелируется, что, по-видимому, связано с резким ростом оптических потерь для мод высокого порядка в непрокачиваемых частях активной области.

Следует отметить, что ранее реализованные одномодовые СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе InGaAs КЯ и n^+/p^+ -InAlGaAs ТП продемонстрировали меньшее значение КПД (~ 14%), несмотря на более высокую дифференциальную эффективность, что, по-видимому, связано с более высоким электрическим сопротивлением приборов и меньшим количеством КЯ [11]. В то же время одномодовые СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе InAlGaAs КЯ и с n^+/p^+ -InAlGaAs ТП заметно уступают по значениям порогового тока при сравнимом уровне дифференциальной эффективности [10,14]. При этом ГИ-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе InAlGaAs КЯ и с n^+ -InGaAs/ p^+ -InAlGaAs ТП в геометрии короткого микрорезонатора демонстрируют одномодовый режим генерации лишь при размерах мезы ЗТП < 5 мкм, что ограничивает максимальную выходную оптическую мощность на уровне 2.2 мВт [9].

Малосигнальный частотный анализ (измерение S-параметров) проводился с использованием векторного

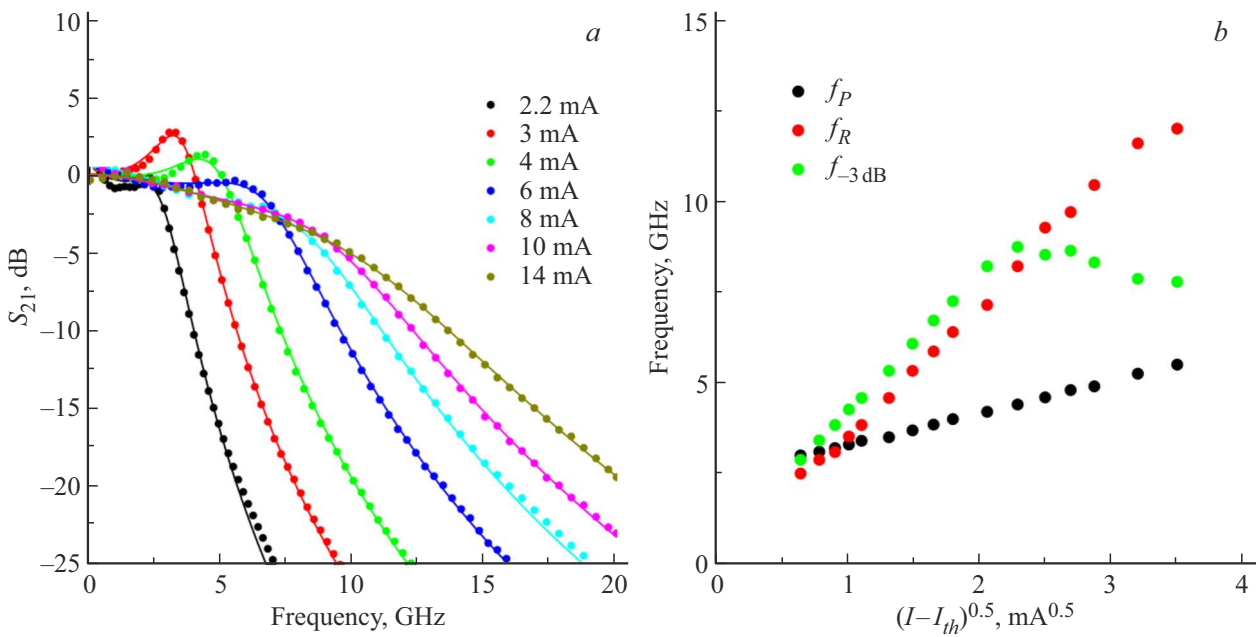


Рис. 4. Результаты малосигнального частотного анализа СП-ВИЛ с диаметром ЗТП 6 мкм: *a*) амплитудно-частотные характеристики S_{21} при различном токе; *b*) зависимости паразитной частоты отсечки f_P , резонансной частоты f_R и частоты эффективной модуляции $f_{-3\text{dB}}$ от тока. Температура измерений — 20°C.

анализатора цепей Rodhe & Schwarz ZVA 40 и фотодетектора New Focus 1434 с полосой пропускания 25 ГГц. На быстродействие инжекционного лазера в режиме токовой модуляции влияют тепловые эффекты, ограничивающие предельно достижимую резонансную частоту, демпфирование релаксационных колебаний, приводящее к уменьшению амплитуды резонансного пика, и полоса пропускания (паразитная частота отсечки) электрической цепочки, соединяющей между собой генератор сигнала и внутренний источник лазерных колебаний. Однако сильный эффект насыщающегося поглотителя, обычно сопровождающийся гистерезисом, затрудняет адекватную интерпретацию динамических характеристик лазеров с диаметром ЗТП < 5 мкм. На рис. 4, *a* представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ, параметр S_{21}) для лазеров с диаметром ЗТП 6 мкм, измеренные при температуре 20°C. Частота эффективной модуляции $f_{-3\text{dB}}$ (оцененная по уровню спада АЧХ на -3 дБ) достигает 6 ГГц при токе накачки 4.5 мА, а затем насыщается на уровне ~ 8 ГГц. Соответствующая величина МСЕФ-фактора ($\text{MCEF} = f_{-3\text{dB}} / (I - I_{th})^{0.5}$), определяющая эффективность токовой модуляции (англ. modulation current efficiency factor, MCEF), лежит в диапазоне ~ 3.6 ГГц/мА^{0.5}. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными для СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе InGaAs КЯ и n^+/p^+ -InAlGaAs ТП [14].

Для оценки ключевых параметров СП-ВИЛ была применена классическая модель отклика одночастотного лазера на синусоидальную модуляцию тока накачки [27]. С целью минимизации ошибки при решении обратной задачи анализа данных измерений S_{21} паразитная ча-

стота отсечки фильтра низких частот, образованного электрическими элементами лазера, была независимо определена из эквивалентной схемы лазера, восстановленной на основе данных измерений коэффициента отражения входного СВЧ-сигнала (параметр S_{11}). Согласно результатам, представленным на рис. 4, *b*, паразитная частота отсечки f_P лазера с диаметром ЗТП 6 мкм сперва растет с током накачки, но при напряжениях > 1.6 В насыщается на уровне ~ 5 ГГц. Скорость нарастания резонансной частоты с током, так называемый *D*-фактор ($D = f_R / (I - I_{th})^{0.5}$), который отражает уровень дифференциального усиления и объем моды, превышает 3.2 ГГц/мА^{0.5}, что заметно выше результатов, полученных для СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм на основе InGaAs КЯ и n^+/p^+ -InAlGaAs ТП [11]. В результате резонансная частота f_R при токах накачки > 6 мА превышает частоту эффективной модуляции и достигает ~ 12 ГГц.

Достигнутые значения свидетельствуют о существенном потенциале предложенной активной области. В самом деле, согласно анализу основных механизмов, влияющих на быстродействия ВИЛ, при доминировании тепловых эффектов предельная частота эффективной модуляции определяется резонансной частотой и, согласно выражению $f_{-3\text{dB,thermal}} = \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_R$, достигает ~ 18 ГГц, что существенно превосходит экспериментальные значения $f_{-3\text{dB}}$. В случае доминирования механизма, связанного с низкой паразитной частотой отсечки, предельная частота модуляции, согласно выражению $f_{-3\text{dB,parasitics}} = (2 + \sqrt{3}) f_P$, дает величину > 18 ГГц. При доминировании эффекта демпфирования релаксационных колебаний предельная частота эффек-

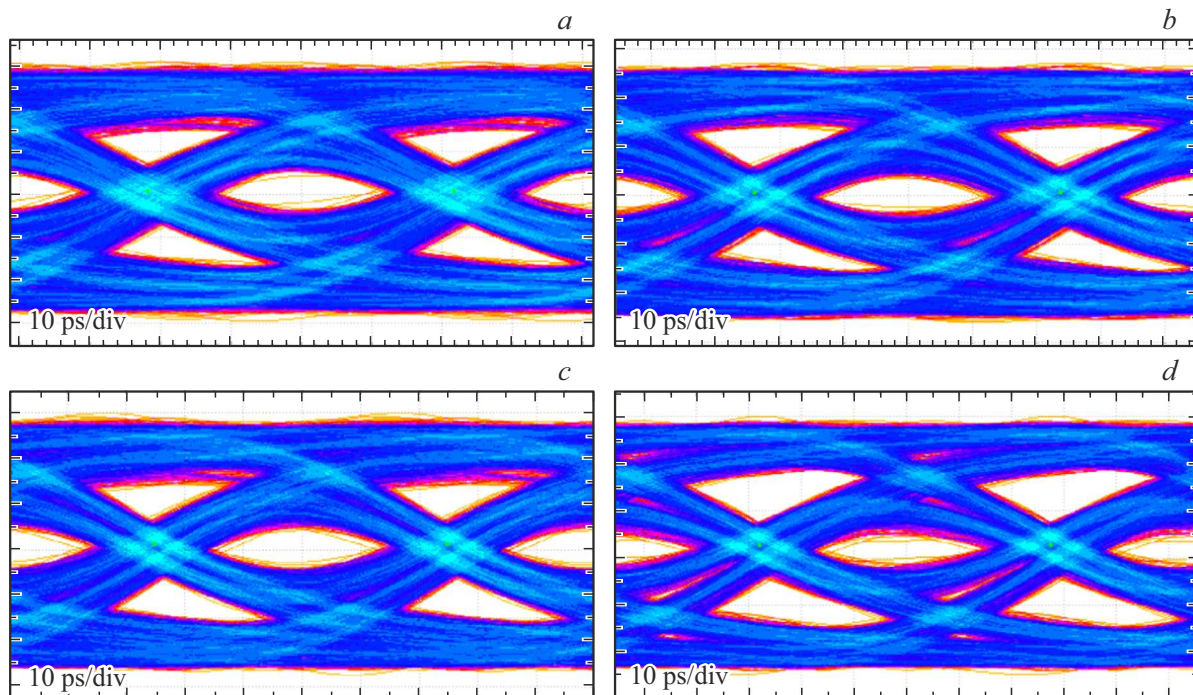


Рис. 5. Глазковые диаграммы СП-ВИЛ с диаметром ЗТП 6 мкм при прямой токовой модуляции в NRZ-режиме для различной протяженности оптоволоконной линии: а) 23 Гб/с — передача данных в конфигурации ВТВ, б) 21 Гб/с — передача данных на 500 м, в) 20 Гб/с — передача данных на 1000 м, д) 18 Гб/с — передача данных на 2000 м. Рабочий ток — 16 мА, модулирующее напряжение — 300 мВ. Температура измерений — 20°C.

тивной модуляции определяется скоростью нарастания коэффициента затухания с квадратом резонансной частоты, так называемый K -фактор, и, согласно выражению $f_{-3\text{ dB, damping}} = 2\pi\sqrt{2}/K$, превышает 20 ГГц при умеренных плотностях фотонов (соответствующее значение $K \sim 0.45$ нс). Таким образом, комбинация двух последних механизмов ведет к резкому уменьшению амплитуды резонансного пика при относительно небольших токах накачки.

Следует отметить, что основной вклад в величину паразитной частоты отсечки дает паразитная емкость области обратно смещенного p^+n -перехода (вне области ЗТП), поэтому с увеличением размера мезы ЗТП наблюдается некоторый рост частоты f_p . Однако увеличение объема моды с ростом площади мезы ЗТП ведет к падению D -фактора и $MSEF$ -фактора (до $\sim 2.8\text{--}3.0$ ГГц/мА^{0.5} и $\sim 3.0\text{--}3.2$ ГГц/мА^{0.5} при диаметре мезы ЗТП 8 мкм соответственно). В результате существенного улучшения модуляционных характеристик исследуемых СП-ВИЛ с ростом размера мезы ЗТП не наблюдается.

Принимая во внимание переключение в многомодовый режим генерации при диаметре ЗТП > 8 мкм и падение $MSEF$ -фактора с увеличением размера мезы ЗТП, наибольший интерес с практической точки зрения представляют одномодовые лазеры с диаметром ЗТП 6 мкм. Для них проведен анализ скорости и дальности передачи данных исследуемых ВИЛ в режиме прямой токовой модуляции при кодировании по амплитудному форма-

ту в NRZ-режиме с использованием псевдослучайной последовательности битов (англ. pseudorandom binary sequence, PRBS) длиной $(2^7 - 1)$ при температуре 20°C. Измерения проводились непосредственно на пластине СП-ВИЛ без разделения ее на индивидуальные чипы и их монтажа в СВЧ-корпуса. Исходный модулирующий сигнал формировался с помощью генератора битовых комбинаций SHF 12105A, а его амплитуда контролировалась с помощью усилителей и аттенюаторов. Используя тройник смещения, модулирующий сигнал складывался с постоянной составляющей, задающей рабочую точку по току, и затем подводился к лазеру с помощью СВЧ-зонда. Излучение СП-ВИЛ вводилось в одномодовое волокно SMF-28. Для подавления переотражений использовался оптический изолятор. Оптический датчик Tektronix DPO70E1 с полосой пропускания 33 ГГц использовался для преобразования оптического сигнала в электрический, который затем регистрировался осциллографом реального времени Tektronix DPO75902SX с аналоговой полосой пропускания 59 ГГц.

На рис. 5 представлены глазковые диаграммы для различной протяженности оптоволоконной линии связи. Рабочий ток и напряжение модулирующего цифрового сигнала были выбраны так, чтобы обеспечить максимально высокую частоту эффективной модуляции в широком диапазоне токов (т.е. одновременно увеличить скорость передачи данных и высоту раскрытия глазковой диаграммы), и составили ~ 16 мА и 300 мВ соответственно. Максимальная скорость передачи в NRZ-режиме для

конфигурации ВТВ достигает 23 Гб/с. В области перехода между двумя соседними тактовыми интервалами, соответствующей пересечению нарастающих и спадающих фронтов двух глазковых диаграмм, отчетливо прослеживаются две отдельные группы линий фронтов и спадов, что свидетельствует о наличии в оптическом канале детерминированного шума. При этом размытость линий в каждой группе указывает на присутствие случайного шума.

Мы полагаем, что источник детерминированного шума связан с межсимвольной интерференцией (англ. *inter-symbol interference*), возникающей в случае ограничения пропускной способности любого компонента реализованной оптической линии связи (передатчик, приемник, физическая среда передачи) и (или) отражения электрического сигнала при неоптимальном согласовании импеданса лазера с генератором сигнала (рассогласование конструкции СВЧ-зонда с топологией контактных площадок, частота отсечки эквивалентной схемы лазера и т.д.). Следует отметить, что последний механизм сложно локализовать и интерпретировать, однако если в оптической линии связи присутствует проблема отражения электрического сигнала, то, как правило, есть и проблема пропускной способности. Принимая во внимание результаты малосигнального частотного анализа, ключевой причиной появления межсимвольной интерференции является относительно низкая паразитная частота отсечки исследуемых СП-ВИЛ, в конечном счете ведущая к вариации амплитуды оптического сигнала на больших скоростях передачи данных в зависимости от длины повторяющихся битов и предыдущих битовых состояний. В результате несовпадения времени нарастания и спада в области перехода глазковой диаграммы общий джиттер (англ. *jitter*), включающий детерминированную и случайную компоненты, достигает 23 пс, что соответствует 53% от тактового сигнала ($\sim 0.31 UI$). По мере увеличения длины одномодового волокна наблюдается дальнейшее увеличение джиттера и уменьшение ширины раскрытия глазковой диаграммы из-за дисперсии волокна, что в конечном счете ведет к падению высоты раскрытия глазковой диаграммы. В результате описанный эффект ограничивал максимальную скорость оптической передачи данных по одномодовому волокну на уровне 21, 20 и 18 Гб/с для протяженности линии 500, 1000 и 2000 метров соответственно.

4. Заключение

Представлены результаты комплексных исследований СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 нм с композитным ЗТП $n^+-InGaAs/p^+-InGaAs/p^+-InAlGaAs$ и активной областью на основе напряженных КЯ $InGaAs/InGaAlAs$. Продемонстрирована принципиальная возможность получения лазерной генерации в непрерывном режиме генерации при 20°C с пороговыми токами < 2 мА и дифференциальной эффективностью > 0.4 Вт/А. Максимальная выходная оптическая мощность в одномодовом

режиме генерации с фактором подавления боковых мод > 40 дБ превышает 4.5 мВт при 20°C. Согласно малосигнальному частотному анализу, быстродействие лазеров преимущественно ограничено низкой паразитной частотой отсечки, что в условиях заметного дампинга ведет к резкому уменьшению амплитуды резонансного пика при умеренных токах накачки. В результате эффективная частота модуляции ограничена 8 ГГц при 20 °С.

Проведен анализ скорости и дальности передачи данных по одномодовому волокну в режиме прямой токовой модуляции для реализованных СП-ВИЛ с размером ЗТП 6 мкм при кодировании по амплитудному формату без возвращения к нулю. С ростом скорости передачи данных наблюдается увеличение детерминированного джиттера, преимущественно из-за межсимвольной интерференции, что ограничивает раскрытие глазковой диаграммы. По мере увеличения протяженности оптической линии связи дисперсия волокна ведет к усилению этого негативного эффекта. В результате максимальная скорость передачи данных по короткой оптической линии связи составила 23 Гб/с, а при увеличении протяженности оптической линии связи до 2000 м падает до 18 Гбит/с.

Дальнейшее улучшение рабочих характеристик СП-ВИЛ сопряжено с повышением температурной стабильности и эффективной частоты модуляции. Для решения первой проблемы необходимо не только подавить термический выброс носителей из КЯ за счет применения более широкозонных барьеров, но и подавить эффект насыщающегося поглотителя путем оптимизации глубины травления композитного ТП (необходим компромисс с высокой выходной оптической мощностью) и (или) увеличения спектрального рассогласования спектра усиления активной области относительно резонансной длины волны (необходим компромисс с низким пороговым током и температурной стабильностью лазера). Решение второй проблемы связано не только с уменьшением паразитной емкости обратного смещенного p^+n -перехода путем снижения уровня легирования зарастивающего слоя n -InP (необходим компромисс с относительно низким сопротивлением лазера) и минимизации размеров приборной топологии (необходим компромисс с эффективным отводом тепла), но и за счет уменьшения объема моды (необходим компромисс с высокой выходной оптической мощностью), оптимизации времени жизни фотонов (необходим компромисс с низким пороговым током) и увеличения дифференциального усиления активной области (необходим компромисс с термическим выбросом носителей).

Финансирование работы

Работа авторов из Университета ИТМО выполнена при финансовой поддержке программы „Приоритет 2030“ в части исследований ряда динамических характеристик, а также при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019–1442 в части ряда исследований статических характеристик.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *VCSEL Industry: Communication and Sensing, The ComSoc Guides to Communications Technologies*, ed. by B.D. Padullaparthi, J. Tatum, K. Iga (Wiley-IEEE Press, Piscataway, N.J., USA, 2022). ISBN: 978-1-119-78221-6
- [2] L. Zhang, J. Chen, E. Agrell, R. Lin, L. Wosinska. *J. Lightwave Technol.*, **38** (1), 18 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2019.2941765
- [3] A. Larsson, P. Westbergh, J.S. Gustavsson, E. Haglund, E.P. Haglund. In: Proc. SPIE OPTO (San Francisco, CA, USA, Mar. 2015) v. 9381, p. 93810D-1. DOI: 10.1117/12.2082614
- [4] L. Zhang, J. Van Kerrebrouck, R. Lin, X. Pang, A. Udalcovs, O. Ozolins, S. Spiga, M.-C. Amann, G. VanSteenberge, L. Gan, M. Tang, S. Fu, R. Schatz, S. Popov, D. Liu, W. Tong, S. Xiao, G. Torfs, J. Chen, J. Bauwelinck, X. Yin. *J. Lightwave Technol.*, **37** (2), 380 (2019). DOI: 10.1109/JLT.2018.2851746
- [5] M.-R. Park, O.-K. Kwon, W.-S. Han, K.-H. Lee, S.-J. Park, B.-S. Yoo. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **18** (16), 1717 (2006). DOI: 10.1109/LPT.2006.879940
- [6] W. Hofmann, M. Müller, A. Nadtochiy, C. Meltzer, A. Mutig, G. Böhm, J. Roskopf, D. Bimberg, M.-C. Amann, C. Chang-Hasnain. *Opt. Express*, **17** (20), 17547 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.017547
- [7] W. Hofmann. *IEEE Photonics J.*, **2** (5), 802 (2010). DOI: 10.1109/JPHOT.2010.2055554
- [8] S. Spiga, W. Soenen, A. Andrejew, D.M. Schoke, X. Yin, J. Bauwelinck, G. Boehm, M.-C. Amann. *J. Lightwave Technol.*, **35** (4), 727 (2017). DOI: 10.1109/JLT.2016.2597870
- [9] S. Spiga, D. Schoke, A. Andrejew, G. Boehm, M.-C. Amann. *J. Lightwave Technol.*, **35** (15), 3130 (2017). DOI: 10.1109/jlt.2017.2660444
- [10] A. Caliman, A. Mereuta, G. Suruceanu, V. Iakovlev, A. Sirbu, E. Kapon. *Opt. Express*, **19** (18), 16996 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.016996
- [11] A.V. Babichev, L.Y. Karachinsky, I.I. Novikov, A.G. Gladyshev, S.A. Blokhin, S. Mikhailov, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Stepniak, L. Chorchos, J.P. Turkiewicz, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, M. Agustin, N.N. Ledentsov, A.Y. Egorov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **53** (6), 1 (2017). DOI: 10.1109/JQE.2017.2752700
- [12] T. Grundl, P. Debernardi, M. Muller, C. Grasse, P. Ebert, K. Geiger, M. Ortsiefer, G. Bohm, R. Meyer, M.-C. Amann. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **19** (4), 1700913. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2244572
- [13] A. Sirbu, G. Suruceanu, V. Iakovlev, A. Mereuta, Z. Mickovic, A. Caliman, E. Kapon. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **25** (16), 1555 (2013). DOI: 10.1109/LPT.2013.2271041
- [14] D. Ellafi, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Suruceanu, Z. Mickovic, A. Caliman, A. Mereuta, E. Kapon. *Opt. Express*, **22** (26), 32180 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.032180
- [15] Е.С. Колодезний, С.С. Рочас, А.С. Курочкин, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, Ю.К. Бобрецова, А.А. Климов, С.А. Блохин, К.О. Воропаев, А.С. Ионоу. *Опт. и спектр.*, **125** (2), 229 (2018). [E.S. Kolodeznyi, S.S. Rochas, A.S. Kurochkin, A.V. Babichev, I.I. Novikov, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinskii, D.V. Denisov, Yu.K. Bobretsova, A.A. Klimov, S.A. Blokhin, K.O. Voropaev, A.S. Ionov. *Opt. Spectr.*, **125**, 238 (2018)]. DOI: 10.1134/S0030400X18080143]
- [16] C.A. Wang, B. Schwarz, D.F. Siriani, L.J. Missaggia, M.K. Connors, T.S. Mansuripur, D.R. Calawa, D. McNulty, M. Nickerson, J.P. Donnelly, K. Creedon, F. Capasso. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **23** (6), Art no. 1200413 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2677899
- [17] С.А.Блохин, М.А.Бобров, Н.А. Малеев, А.А.Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, С.С. Рочас, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионоу, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *Письма ЖТФ*, **46** (17), 21 (2020). [S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, A.A. Blokhin, A.G. Kuz'menkov, A.P. Vasil'ev, S.S. Rochas, A.G. Gladyshev, A.V. Babichev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov. *Techn. Phys. Lett.*, **46** (17), 854 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020090023]
- [18] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, S.S. Rochas, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, N.N. Ledentsov, A.Yu. Egorov. *Electron. Lett.*, **57** (18), 697 (2021). DOI: 10.1049/ell2.12232
- [19] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, I.O. Zhumaeva, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **58** (2), Art № 2400115 (2022). DOI: 10.1109/JQE.2022.3141418
- [20] С.А. Блохин, В.Н. Неведомский, М.А.Бобров, Н.А. Малеев, А.А.Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, С.С. Рочас, А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионоу, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *ФТП*, **54** (10), 1088 (2020). [S.A. Blokhin, V.N. Nevedomsky, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, A.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, S.S. Rohas, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov. *Semiconductors*, **54** (10), 1276 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620100048]
- [21] M. Ortsiefer, R. Shau, G. Böhm, F. Köhler. M.-C. Amann. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (16), 2179 (2000). DOI: 10.1063/1.126290
- [22] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, С.С. Рочас, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *Письма ЖТФ*, **47** (22), 3 (2021).
- [23] К.О. Воропаев, В.И. Seleznev, A.Yu. Prokhorov, A.S. Ionov, S.A. Blokhin. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1658**, 012069 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012069
- [24] J. Bengtsson, J. Gustavsson, Å. Haglund, A. Larsson, A. Bachmann, K. Kashani-Shirazi, V.-C. Amann. *Opt. Express*, **16** (25), 20789 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.020789
- [25] С.А.Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, Н.А. Малеев, С.С. Рочас, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионоу, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *Письма ЖТФ* **46** (24), 49 (2020).
- [26] V.V. Lysak, K.S. Chang, Y.T. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (23), Art. № 231118 (2003). DOI: 10.1063/1.2140886
- [27] *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Springer Series in Optical Sciences, ed. by R. Michalzik (Springer, Berlin—Heidelberg, 2013). DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0

Редактор Г.А. Оганесян

1550 nm range high-speed single-mode wafer-fused vertical-cavity surface-emitting lasers

S.A. Blokhin¹, A.V. Babichev², L.Ya. Karachinsky²,
I.I. Novikov², A.A. Blokhin¹, A.G. Kuzmenkov¹,
M.A. Bobrov¹, N.A. Maleev¹, V.V. Andryushkin²,
V.E. Bougrov², A.G. Gladyshev³, D.V. Denisov⁴,
K.O. Voropaev⁵, I.O. Zhumaeva⁵, V.M. Ustinov⁶,
H. Li⁷, S.C. Tian^{8,9}, S.Y. Han^{8,9}, G.A. Sapunov^{8,9},
A.Yu. Egorov^{3,10}, D. Bimberg^{8,9}

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

³ Connector Optics LLC,
194292 St. Petersburg, Russia

⁴ St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

⁵ JSC OKB-Planeta,
173004 Veliky Novgorod, Russia

⁶ Submicron Heterostructures for Microelectronics
Research and Engineering Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

⁷ College of Mathematical and Physical Sciences,
Qingdao University of Science and Technology,
266061 Qingdao, China

⁸ Bimberg Chinese-German Center for Green
Photonics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics (CIOMP),
Chinese Academy of Sciences (CAS),
130033 Changchun, China

⁹ Center of Nanophotonics,
Institute of Solid State Physics,
Technische Universität Berlin,
10623 Berlin, Germany

¹⁰ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of complex studies of static and dynamic performance of 1550 nm-range VCSELs, which were created by direct bonding (wafer fusion technique) InAlGaAs/InP optical cavity wafers with AlGaAs/GaAs distributed reflector wafers grown by molecular beam epitaxy, are presented. The VCSELs with a buried tunnel junction diameter less than $7\ \mu\text{m}$ demonstrated a single-mode lasing with a side-mode suppression ratio more than 40 dB; however, at diameters less than $5\ \mu\text{m}$, a sharp increase in the threshold current is observed. It is associated to the appearance of a saturable absorber due to penetration of optical mode into the non-pumped regions of the active region. The maximum single-mode output optical power and the $-3\ \text{dB}$ modulation bandwidth reached 4.5 mW and 8 GHz, respectively, at 20°C . The maximum data rate at 20°C under non-return-to-zero on-off keying modulation was 23 Gbit/s for a short-reach link based on single-mode fiber SMF-28. As the length of the optical link increased up to 2000 m, the maximum data rate dropped to 18 GB/s. The main factors affecting the high-speed operation and data transmission range are defined and discussed, and the further ways to overcome them are proposed.