

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-61-69

УДК 621.373.826

Оптический передатчик спектрального диапазона 1,55 мкм на основе вертикально-излучающего лазера

СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ БЛОХИН¹✉, АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ БАБИЧЕВ²,
ЛЕОНИД ЯКОВЛЕВИЧ КАРАЧИНСКИЙ³, ИННОКЕНТИЙ ИГОРЕВИЧ НОВИКОВ⁴,
АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ БЛОХИН⁵, МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОБРОВ⁶,
ЯКОВ НИКОЛАЕВИЧ КОВАЧ⁷, НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ МАЛЕЕВ⁸,
АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КУЛИКОВ⁹, ВЛАДИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ БУГРОВ¹⁰,
СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ВАРЖЕЛЬ¹¹, КИРИЛЛ ОЛЕГОВИЧ ВОРОПАЕВ¹²,
ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ УСТИНОВ¹³, АНТОН ЮРЬЕВИЧ ЕГОРОВ¹⁴

^{1, 5, 6, 8}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

^{2, 3, 4, 7, 9, 10, 11}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹²Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

¹³Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹⁴ООО Коннектор Оптикс, Санкт-Петербург, Россия

¹blokh@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>

²andrey.babichev@connector-optics.com

<https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>

³leonid.karachinsky@connector-optics.com

<https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>

⁴innokenty.novikov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

⁵bloalex91@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3449-8711>

⁶bobrov.mikh@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>

⁷j-n-kovach@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>

⁸maleev@beam.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>

⁹avkulikov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>

¹⁰vladislav.bougrov@niuitmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

¹¹svvarzhel@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

¹²kirill.voropaev@novsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>

¹³vmust@beam.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>

¹⁴anton.egorov@connector-optics.com

<https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>

Аннотация

Предмет исследования. Высокоскоростной волоконно-оптический передатчик спектрального диапазона 1,55 мкм на основе вертикально-излучающего лазера, изготовленного с применением технологии спекания пластин. **Цель работы.** Комплексное исследование характеристик оптического передатчика спектрального диапазона 1,55 мкм на основе вертикально-излучающего лазера при комнатной температуре. **Метод.** Гетероструктура вертикально-излучающего лазера изготовлена с использованием методов молекулярно-пучковой эпитаксии и технологии спекания пластин. Исследования характеристик передатчика проведены при токовой модуляции большим сигналом по формату без возвращения к нулю. **Основные результаты.** При температуре 20 °С передатчик продемонстрировал максимальную выходную оптическую мощность более 1 мВт на выходе из волокна в одномодовом режиме генерации. Предельная скорость передачи данных по короткой линии связи на основе волокна SMF-28 при токовой модуляции по амплитудному формату

без возвращения к нулю достигла 30 Гбит/с и была ограничена частотой эффективной модуляции лазера, достигающей значения порядка 12 ГГц (по уровню -3 дБ). По мере увеличения протяженности оптоволоконной линии связи хроматическая дисперсия волокна и чирп-эффект лазера усиливают межсимвольную интерференцию, что, в конечном счете, ограничивает скорость и дальность оптической передачи данных. **Практическая значимость.** Исследованные волоконно-оптические передатчики перспективны не только для цифровой, но и для аналоговой передачи высокочастотного оптического сигнала по оптоволоконным линиям связи.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, спекание пластин, одномодовый режим, амплитудная модуляция, оптическая передача данных

Благодарность: 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.

Ссылка для цитирования: Блохин С.А., Бабичев А.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Блохин А.А., Бобров М.А., Ковач Я.Н., Малеев Н.А., Куликов А.В., Бугров В.Е., Варжель С.В., Воропаев К.О., Устинов В.М., Егоров А.Ю. Оптический передатчик спектрального диапазона 1,55 мкм на основе вертикально-излучающего лазера // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 61–69. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-61-69

Коды OCIS: 140.5960, 250.5960, 140.7260, 250.7260, 160.6000, 060.4080, 060.4510

ВВЕДЕНИЕ

Требования по объему хранения и передачи данных, предъявляемые к центрам обработки данных, непрерывно возрастают, что способствует расширению применения оптических каналов передачи данных на основе многомодовых и одномодовых оптических волокон. Одним из перспективных подходов для создания современных крупномасштабных центров обработки данных [1] является использование длинноволновых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ), обеспечивающих существенное увеличение дальности передачи и широкие перспективы в области оптических межсоединений с пространственным мультиплексированием [2].

В отличие от ВИЛ ближнего инфракрасного диапазона на основе системы InAlGaAs/GaAs разработка ВИЛ спектрального диапазона 1,3–1,55 мкм на основе системы InAlGaAs/GaAs или InAlGaAsP/InP сопряжена с рядом фундаментальных и технологических проблем [3]. Наиболее перспективным решением является комбинация эффективной активной области на основе системы материалов InAlGaAsP/InP с распределенными брэгговскими отражателями на основе систем, обладающих высокими контрастом показателей преломления и теплопроводностью. В настоящее время можно выделить два основных подхода: гибридная интеграция оптическо-

го резонатора на основе системы материалов InAlGaAs/InP с высококонтрастными диэлектрическими и металл-диэлектрическими зеркалами на основе гетероструктур CaF_2/ZnS или AlF_3/ZnS [4, 5] (далее ГИ-ВИЛ) и технология спекания пластины оптического резонатора на основе системы InAlGaAsP/InP с пластинами полупроводниковых распределенных брэгговских отражателей на основе системы AlGaAs/GaAs [6–8] (далее СП-ВИЛ). Каждый подход имеет свои собственные преимущества и недостатки: ГИ-ВИЛ демонстрируют более высокое быстродействие (частота эффективной модуляции до 22 ГГц) благодаря минимизации эффективной длины оптического микрорезонатора [4], тогда как для СП-ВИЛ характерна более высокая выходная оптическая мощность (более 4 мВт) благодаря лучшему отводу тепла от активной области [6, 8, 9]. Сравнительно недавно авторами настоящей работы была показана принципиальная возможность увеличения частоты эффективной модуляции СП-ВИЛ за счет применения сильнонапряженных квантовых ям (КЯ) InGaAs [10].

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование приборных характеристик волоконно-оптического передатчика на основе ВИЛ спектрального диапазона 1,55 мкм, реализованных в рамках технологии спекания пластин.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптический передатчик спектрального диапазона 1,55 мкм представляет собой индивидуальный кристалл СП-ВИЛ в сверхвысоко-частотном (СВЧ) корпусе с разъемом *Anritsu* V103F и оптоволоконным выходом с коннектором типа FC/APC (далее СП-ВИЛ-передатчик). В качестве базовой конструкции СП-ВИЛ выбрана геометрия вертикального микрорезонатора InAlGaAsP/InP , ограниченного распределенными брэгговскими отражателями AlGaAs/GaAs , с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контакты $n\text{-InP}$ (с сильнолегированными контактными слоями $n\text{-InGaAsP}$) и туннельный переход $n^{++}\text{-InAlGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$. Активная область реализована на базе семи КЯ InGaAs , разделенных между собой решеточно-согласованными барьерными слоями InAlGaAs . Для формирования токового и оптического ограничений применена технология заращенного туннельного перехода [11]. Детали конструкции гетероструктуры СП-ВИЛ и ее создания приведены в работах [8, 10, 12]. Приборная конструкция кристалла СП-ВИЛ представляет собой тройную меза-структуру, обеспечивающую вскрытие поверхностей верхнего и нижнего сильнолегированных контактных слоев $n\text{-InGaAsP}$ для формирования омических контактов и контактных площадок на основе металлизации Ti/Pt/Au , а также электрическую изоляцию отдельных кристаллов лазеров. Подробности технологического маршрута изготовления кристаллов СП-ВИЛ приведены в работе [13].

После формирования кристалла на поверхности гетероструктуры проводились операции утонения подложки GaAs , монтажа на ленточный носитель и сквозная резка алмазным диском для разделения на индивидуальные кристаллы. После предварительной отбраковки индивидуальные кристаллы СП-ВИЛ с диаметром мезы заращенного туннельного перехода 7 мкм монтировались в СВЧ корпус максимально близко к СВЧ разъему для минимизации длины проводочных соединений. Стыковка лазера с одномодовым волокном SMF-28 осуществлялась с помощью конической микролинзы, сформированной на торце волокна [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены статические и спектральные характеристики СП-ВИЛ-передатчика,

измеренные при температуре 20 °С. Приборы демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током около 1,4 мА через фундаментальную моду (так называемый одномодовый режим) с фактором подавления боковых мод более 50 дБ во всем диапазоне рабочих токов. Максимальная выходная оптическая мощность на выходе волокна СП-ВИЛ-передатчика превышает 1,4 мВт. Следует отметить, что сравнительно низкая (порядка 0,15 Вт/А) дифференциальная эффективность по сравнению с опубликованными данными измерений кристаллов СП-ВИЛ непосредственно на пластине [8] обусловлена особенностями стыковки лазера с оптоволоконном, которые, в конечном счете, ограничили эффективность ввода излучения в одномодовое волокно на уровне 30%.

На рис. 2 представлены результаты исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ, S_{21} -параметр) методом малосигнального частотного на базе векторного анализатора цепей *Keysight Technologies* PNA-L N5234B. Для преобразования оптического сигнала в электрический использовался широкополосный фотодетектор *New Focus* 1434. Частота эффективной модуляции $f_{-3\text{dB}}$, определенная по уровню спада АЧХ на 3 дБ, растет с током выше порога генерации I_{th} со скоростью примерно 3,8 ГГц/мА^{0,5} ($\text{MCEF}^1 = f_{-3\text{dB}}/(I - I_{\text{th}})^{0,5}$) и достигает 11 ГГц при 10 мА, однако при более высоких токах быстро насыщается на уровне 11,5–12 ГГц. Повышенные значения $f_{-3\text{dB}}$ для СП-ВИЛ-передатчика по сравнению с аналогичными данными, полученными для кристаллов СП-ВИЛ [8], обусловлены тем фактом, что конструкция корпуса и особенности сборки обеспечили улучшение электрического согласования кристалла СП-ВИЛ с источником СВЧ сигнала в диапазоне частот 6–10 ГГц.

Были проведены исследования характеристик СП-ВИЛ-передатчика при токовой модуляции большим сигналом по формату без возвращения к нулю (NRZ²). С помощью тройника смещения цифровой модулирующей сигнал накладывался на постоянную компоненту (определяющую рабочую точку лазера по току) и непосредственно подавался на исследуемый СП-ВИЛ-передатчик. Генератор битовых комбинаций *Tektronix* PGG3202

¹ Modulation current efficiency factor — MCEF

² Non return to zero — NRZ

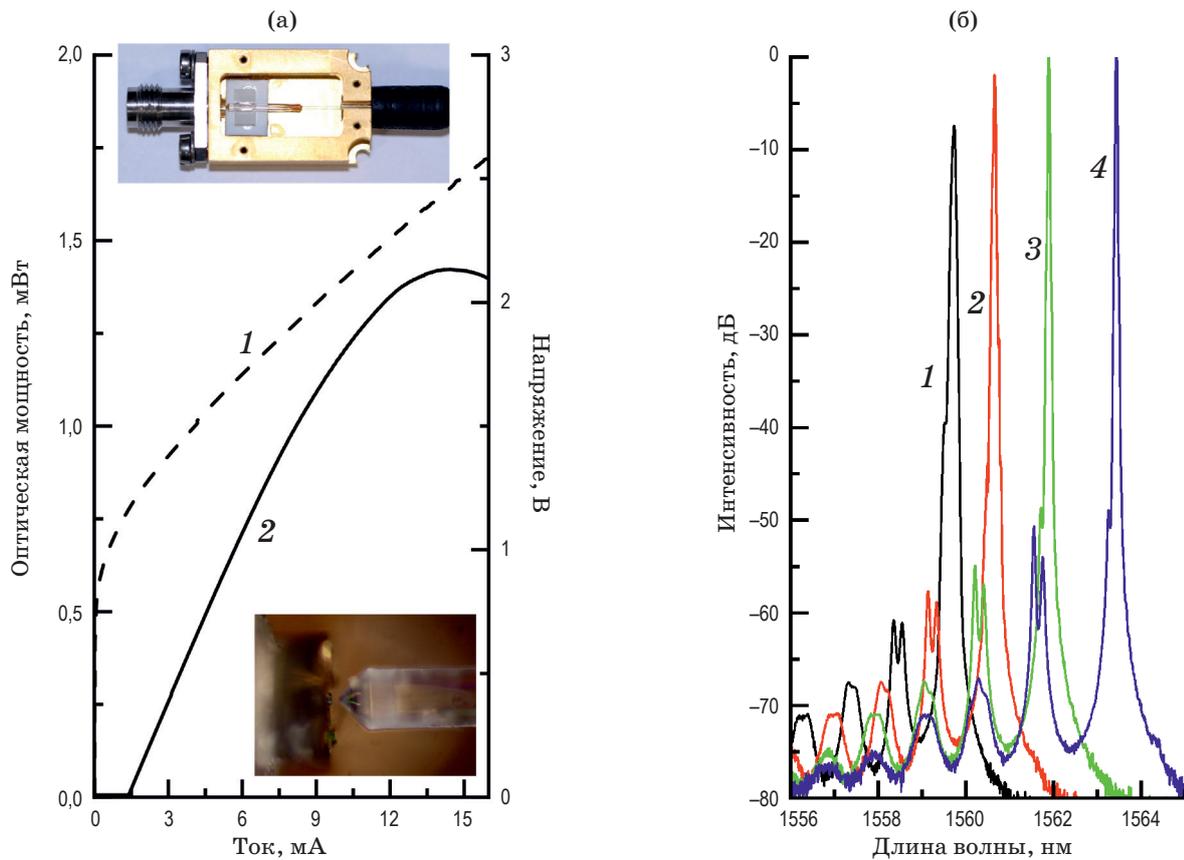


Рис. 1. Статические (а) и спектральные (б) характеристики СП-ВИЛ-передатчика при температуре 20 °С. Характеристики вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) — (а), спектры лазерной генерации при токах 4 (1), 7 (2), 10 (3) и 13 (4) мА — (б). На вставках рис. 1а приведены изображения реализации монтажа кристалла СП-ВИЛ и его стыковки с оптическим волокном

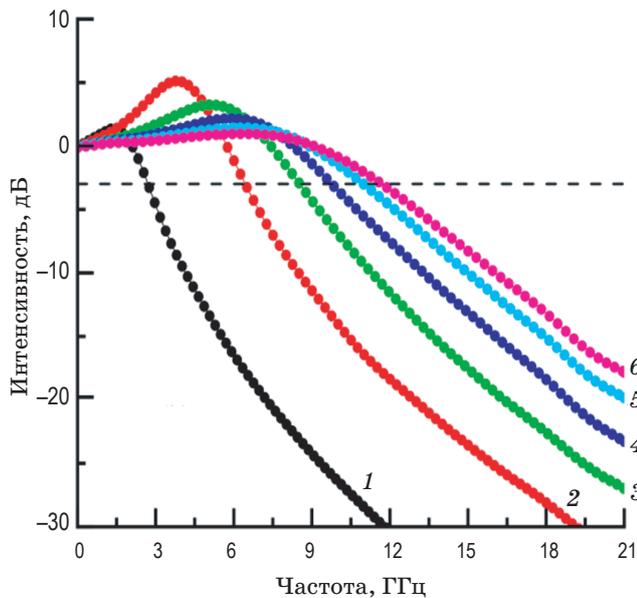


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики СП-ВИЛ-передатчика при токах 2 (1), 4 (2), 6 (3), 8 (4), 10 (5) и 12 (6) мА и температуре 20 °С

использовался для формирования псевдослучайной последовательности битов³ длиной (2^7-1) . Двухуровневые глазковые диаграммы регистрировались стробоскопическим осциллографом *Tektronix DSA8300*, оснащенный оптическим модулем 80C15 и синхронизованным с PRBS-генератором. На рис. 3а, в, д приведены глазковые диаграммы при различной скорости модуляции СП-ВИЛ-передатчика, полученные для короткой оптоволоконной линии связи при температуре 20 °С. Рабочий ток и амплитуда модулирующего напряжения выбраны так, чтобы одновременно обеспечить высокую частоту эффективной модуляции и увеличить высоту раскрытия глазковой диаграммы. При скоростях передачи данных более 25 Гбит/с в глазковых диаграммах можно выделить отдельные группы линий с различными временами нарастания/спада сигнала,

³ Pseudorandom binary sequence, PRBS

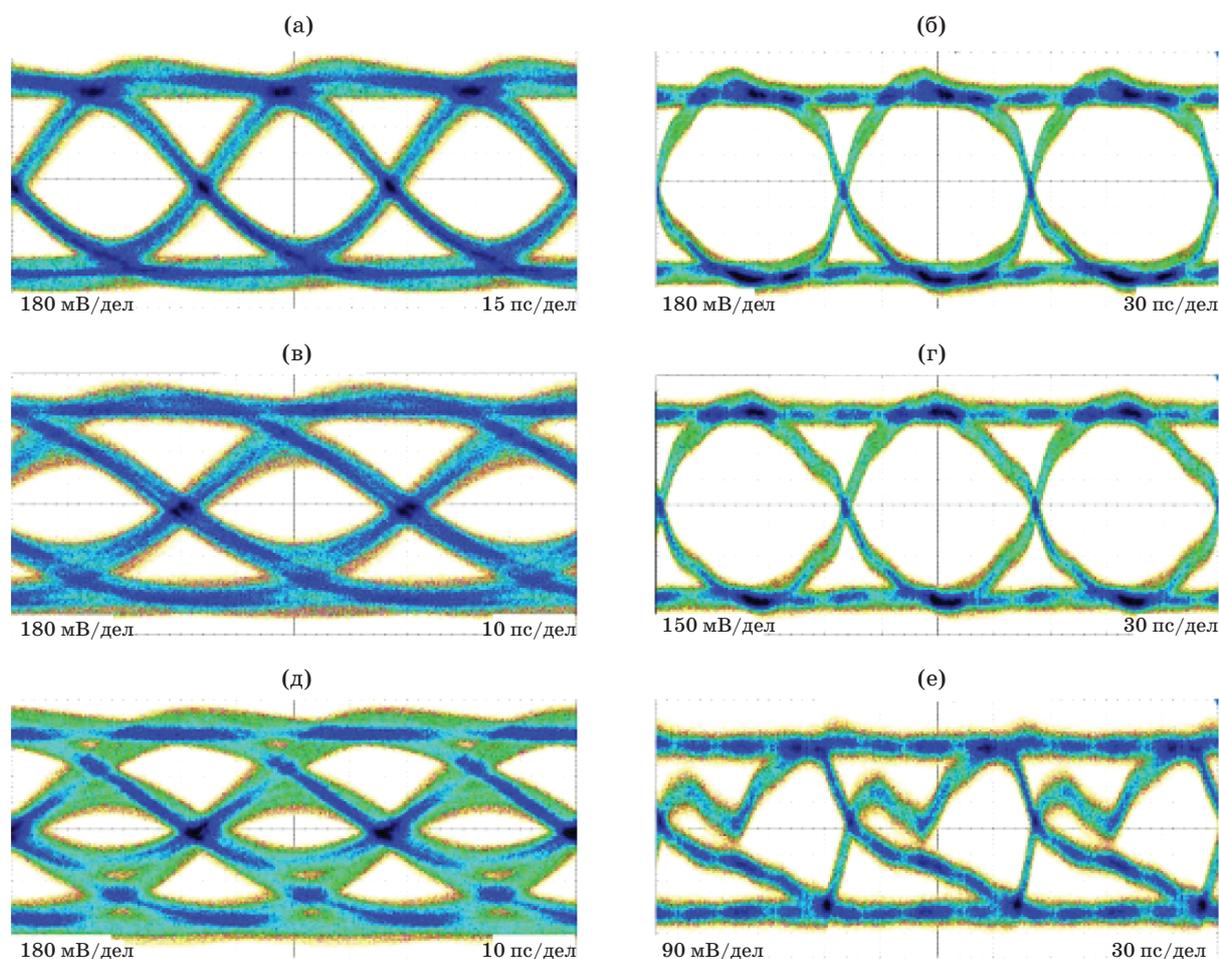


Рис. 3. Глазковые диаграммы СП-ВИЛ-передатчика при токовой модуляции в формате NRZ для короткой оптоволоконной линии (1 м) при различных скоростях передачи данных (а — 20, в — 25, д — 30 Гбит/с) при различных протяженностях оптоволоконной линии на скорости передачи данных 10 Гбит/с (б — 1 м, г — 2 км, е — 10 км). Рабочий ток 13 мА, амплитуда модулирующего напряжения 0,5 В, температура измерений 20 °С

что связано с конечной частотой эффективной модуляции СП-ВИЛ-передатчика. С увеличением скорости передачи данных межсимвольная интерференция быстрых и медленных компонент оптического сигнала ведет к уширению временной области перехода на глазковой диаграмме (так называемый джиттер) и уменьшению высоты раскрытия глазковой диаграммы, несмотря на относительно высокую амплитуду оптической модуляции, что и ограничивает максимальную скорость передачи данных СП-ВИЛ-передатчика на уровне 30 Гбит/с.

На рис. 4 представлены результаты исследования спектров излучения СП-ВИЛ-передатчика при амплитудной модуляции. По сравнению с непрерывным режимом работы

токовая модуляция интенсивности излучения лазера ведет к паразитной частотной модуляции (так называемый чирпинг-эффект [15]) и динамическому уширению спектра излучения лазера [16]. Такое поведение обусловлено флуктуацией материальных параметров резонатора лазера и активной области за счет модуляции внутренней температуры кристалла лазера на частотах ниже 10–100 МГц или модуляцией плотности носителей заряда при частотах выше 1 ГГц [17]. При амплитудной модуляции последовательностью чередующихся битов 0–1 (т.е. цифровой сигнал представляет собой меандр) с уменьшением частоты модуляции (увеличением длительности импульса) наблюдается сдвиг спектра излучения лазера в длинноволновую область (поло-

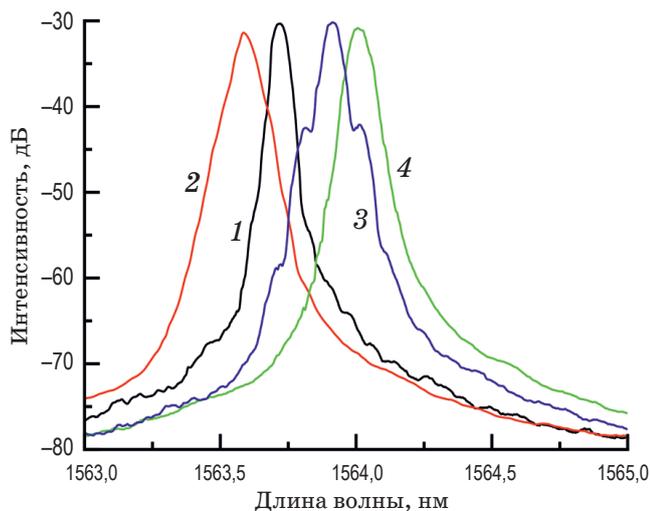


Рис. 4. Спектры лазерной генерации СП-ВИЛ-передатчика при непрерывном режиме работы (1), передаче псевдослучайной последовательности битов на скорости 25 Гбит/с (2), передаче последовательности битов 01010 на скорости 2,5 Гбит/с (3) и передаче последовательности битов 01010 на скорости 25 Гбит/с (4). Рабочий ток 13 мА, амплитуда модулирующего напряжения 0,5 В, протяженность оптической линии 1 м, температура измерений 20 °С

жительный чирпинг-эффект). Таким образом, можно предположить, что наиболее быстрая компонента глазковой диаграммы, соответствующая последовательности битов 01010, смещена в коротковолновую область спектра по сравнению с более медленными компонентами глазковой диаграммы, представляющими собой длинные последовательности идентичных битов.

На рис. 3б, г, е представлены глазковые диаграммы при скорости модуляции 10 Гбит/с, полученные для различной протяженности оптической линии связи на основе одномодового оптоволокна SMF-28. Положительный чирпинг оптических импульсов на входе в волокно и положительная хроматическая дисперсия волокна SMF-28 в спектральном диапазоне 1,55 мкм ведут к различным условиям распространения оптических импульсов, соответствующих быстрым и медленным компонентам глазковой диаграммы. С увеличением протяженности оптоволоконной линии наблюдается усиление искажений глазковой диаграммы из-за перекрестных помех между различными компонентами глазковой диаграммы, что, в конечном счете, и лимитиру-

ет дальность передачи данных. Следует отметить, что полученные результаты коррелируют с данными, полученными для ВИЛ спектрального диапазона 1,55 мкм, изготовленных по альтернативной технологии [18]. Дальнейшее повышение дальности передачи данных может быть связано с переходом к оптическим волокнам со смещенной дисперсией или с компенсацией дисперсии в спектральном диапазоне 1,55 мкм [19], а также с применением спектральных фильтров для ослабления чирп-эффекта [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований характеристик оптического передатчика спектрального диапазона 1,55 мкм на основе СП-ВИЛ при комнатной температуре. Продемонстрирован одномодовый режим лазерной генерации с фактором подавления боковых мод более 50 дБ и максимальной оптической мощностью на выходе волокна более 1,4 мВт. Выше порогового тока 1,4 мА частота эффективной модуляции растет с током со скоростью порядка 3,8 ГГц/мА^{0,5} и достигает значений около 12 ГГц.

При токовой модуляции по амплитудному формату без возвращения к нулю максимальная скорость передачи данных исследуемого передатчика на базе кристалла СП-ВИЛ достигает 30 Гбит/с в случае короткой линии связи на основе волокна SMF-28. При более протяженных оптоволоконных линиях связи чирпинг-эффект лазера и хроматическая дисперсия волокна ограничивают предельную скорость передачи данных. Положительный чирпинг-эффект при высокочастотной токовой модуляции и хроматическая дисперсия волокна ограничивают предельную дальность передачи данных. Частичное решение проблемы связано с применением специальных волокон для компенсации дисперсии или спектральных фильтров для ослабления чирп-эффекта.

В целом, продемонстрированные приборные характеристики передатчика на основе СП-ВИЛ свидетельствуют о хороших перспективах для его практического применения при создании быстродействующих устройств цифровой и аналоговой передачи оптического сигнала по оптоволоконным линиям связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Padullaparthi B.D., Tatum J., Iga K. VCSEL Industry: Communication and sensing. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2021. P. 352.
2. Zhang L., Van Kerrebrouck J., Lin R., et al. Nonlinearity tolerant high-speed DMT transmission with 1.5- μm single-mode VCSEL and multi-core fibers for optical interconnects // *J. Lightwave Technol.* 2019. V. 37. № 2. P. 380–388. DOI: 10.1109/JLT.2018.2851746
3. Michalzik R. VCSELs: Fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers. Berlin: Springer, 2013. P. 471.
4. Spiga S., Soenen W., Andrejew A., et al. Single-mode high-speed 1.5- μm VCSELs // *J. Lightwave Technol.* 2017. V. 35. № 4. P. 727–733. DOI: 10.1109/JLT.2016.2597870
5. Mueller M., Hofmann W., Gruendl T., et al. 1550-nm high-speed short-cavity VCSELs // *Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. V. 17. № 5. P. 1158–1166. DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2109700
6. Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A., et al. Control of cavity lifetime of 1.5 μm wafer-fused VCSELs by digital mirror trimming // *Opt. Exp.* 2014. V. 22. P. 32180–32187. DOI: 10.1364/OE.22.032180
7. Sirbu A., Iakovlev V., Mereuta A., et al. Wafer-fused heterostructures: Application to vertical cavity surface-emitting lasers emitting in the 1310 nm band // *Semiconductor Sci. and Technol.* 2011. V. 26. № 1. P. 014016. DOI: 10.1088/0268-1242/26/1/014016
8. Babichev A.V., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., et al. 6-mW single-mode high-speed 1550-nm wafer-fused VCSELs for DWDM application // *IEEE J. Quantum Electronics*. 2017. V. 53. № 6. P. 1–8. DOI: 10.1109/JQE.2017.2752700
9. Caliman A., Mereuta A., Suruceanu G., et al. 8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. № 18. P. 16996–17001. DOI: 10.1364/OE.19.016996
10. Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А. и др. Анализ внутренних оптических потерь вертикально-излучающего лазера спектрального диапазона 1.55 мкм, сформированного методом спекания пластин // *Опт. и спектр.* 2019. Т. 127. № 1. С. 145–149. DOI: 10.21883/OS.2019.07.47941.296-18
Blokhin S.A., Bobrov M.A., Blokhin A.A., et al. Analysis of the internal optical losses of the vertical-cavity surface-emitting laser of the spectral range of 1.55 μm formed by a plate sintering technique // *Optics and Spectroscopy*. 2019. V. 127. № 1. P. 140–144. DOI: 10.1134/S0030400X1907004X
11. Ortsiefer M., Shau R., Böhm G., et al. Low-resistance InGa(Al)As tunnel junctions for long wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers // *Japanese J. Appl. Phys.* 2000. V. 39. P. 1727. DOI: 10.1143/JJAP.39.1727
12. Блохин С.А., Неведомский В.Н., Бобров М.А. и др. Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленные по технологии спекания гетероструктур, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксией из твердотельных источников // *Физика и техника полупроводников*. 2020. Т. 54. № 10. С. 1088–1096. DOI: 10.21883/FTP.2020.10.49947.9463
Blokhin S.A., Nevedomsky S.N., Bobrov M.A., et al. 1.55- μm -range vertical-cavity surface-emitting lasers, manufactured by wafer fusion of heterostructures grown by solid-source molecular-beam epitaxy // *Semiconductors*. 2020. V. 54. P. 1276–1283. DOI: 10.1134/S1063782620100048
13. Voropaev K.O., Seleznev B.I., Prokhorov A.Yu., et al. The fabrication technology of VCSELs emitting in the 1.55- μm waveband // *J. Phys.: Conf. Series*. 2020. V. 1658. № 1. P. 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012069
14. Липницкая С.Н., Романов А.Е., Бугров В.Е., Бауман Д.А. Расчет и оптимизация оптической системы ввода излучения в одномодовое оптическое волокно // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 5. С. 17–22. DOI: 10.17586/1023-5086-2019-86-05-17-22
Lipnitskaya S.N., Romanov A.E., Bugrov V.E., Bauman D.A. Calculation and optimization of an optical system for radiation coupling into a single-mode optical fiber // *JOT*. 2019. V. 86. № 5. P. 273–277. DOI: 10.1364/JOT.86.000273
15. Tucker R. High-speed modulation of semiconductor lasers // *J. Lightwave Technol.* 1985. V. 3. № 6. P. 1180–1192. DOI: 10.1109/JLT.1985.1074340
16. Gibbon T.B., Prince K., Pham T.T., et al. VCSEL transmission at 10 Gb/s for 20 km single mode fiber WDM-PON without dispersion compensation or injection locking // *Optical Fiber Technol.* 2011. V. 17. № 1. P. 41–45. DOI: 10.1016/j.yofte.2010.10.003

17. Kobayashi S., Yamamoto Y., Ito M., Kimura T. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers // *IEEE J. Quantum Electronics*. 1982. V. 18. № 4. P. 582–595. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071603
18. Hofmann W., Zhu N.H., Ortsiefer M., et al. 10-Gb/s data transmission using BCB passivated 1.55- μm InGaAlAs-InP VCSELs // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2005. V. 18. № 2. P. 424–426. DOI: 10.1109/LPT.2005.863184
19. Kuchta D.M., Huynh T.N., Doany F.E., et al. Error-free 56 Gb/s NRZ modulation of a 1530-nm VCSEL link // *J. Lightwave Technol.* 2016. V. 34. № 14. P. 3275–3282. DOI: 10.1109/JLT.2016.2552220

АВТОРЫ

Сергей Анатольевич Блохин — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 6701373717; <https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>; blokh@mail.ioffe.ru

Андрей Владимирович Бабичев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 56819964000; <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>; a.babichev@itmo.ru

Леонид Яковлевич Карачинский — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 6603558355; <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>; lkarachinsky@itmo.ru

Инокентий Игоревич Новиков — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 7202658480; <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>; innokenty.novikov@itmo.ru

Алексей Анатольевич Блохин — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 57215015016; <https://orcid.org/0000-0002-3449-8711>; Aleksey.Blokhin@mail.ioffe.ru

Михаил Александрович Бобров — младший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 40461011800; <https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>; bobrov.mikh@gmail.com

Яков Николаевич Ковач — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 57444534900; <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>; j-n-kovach@itmo.ru

Николай Анатольевич Малеев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 7007028437; <https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>; maleev.beam@mail.ioffe.ru

Андрей Владимирович Куликов — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет

AUTHORS

Sergei A. Blokhin — PhD, Senior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 6701373717; <https://orcid.org/0000-0002-5962-5529>; blokh@mail.ioffe.ru

Andrey V. Babichev — PhD, Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 56819964000; <https://orcid.org/0000-0002-3463-4744>; a.babichev@itmo.ru

Leonid Ya. Karachinsky — Doctor of Science, Leading Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 6603558355; <https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>; lkarachinsky@itmo.ru

Innokenty I. Novikov — PhD, Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 7202658480; <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>; innokenty.novikov@itmo.ru

Alexey A. Blokhin — Junior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 57215015016; <https://orcid.org/0000-0002-3449-8711>; Aleksey.Blokhin@mail.ioffe.ru

Mikhail A. Bobrov — Junior Researcher, Ioffe Institute, 194021, Russia; Scopus ID 40461011800; <https://orcid.org/0000-0001-7271-5644>; bobrov.mikh@gmail.com

Yakov N. Kovach — PhD Student, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 57444534900; <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>; j-n-kovach@itmo.ru

Nikolai A. Maleev — PhD, Senior Researcher, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 7007028437 <https://orcid.org/0000-0003-2500-1715>; maleev.beam@mail.ioffe.ru

Andrey V. Kulikov — PhD, Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID

ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 7103154362; <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>; avkulikov@itmo.ru

Владислав Евгеньевич Бугров — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 8321276100; <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>; vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Сергей Владимирович Варжель — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Кирилл Олегович Воропаев — доцент, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, 173003, Россия; Scopus ID 57193830839; <https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>; kirill.voropaev@novsu.ru

Виктор Михайлович Устинов — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID 35393681800; <https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>; vmust@beam.ioffe.ru

Антон Юрьевич Егоров — доктор физико-математических наук, Технический директор, ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, 194292, Россия; Scopus ID 7202362169; <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>; anton.egorov@connector-optics.com

7103154362; <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>; avkulikov@itmo.ru

Vladislav E. Bougrov — Doctor of Science, Chief Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 8321276100; <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>; vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Sergei V. Varzhel — PhD, Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Kirill O. Voropaev — Docent, NovSU, Veliky Novgorod, 173003, Russia; Scopus ID 57193830839; <https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>; kirill.voropaev@novsu.ru

Victor M. Ustinov — Doctor of Science, Head of laboratory, Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID 35393681800; <https://orcid.org/0000-0002-6401-5522>; vmust@beam.ioffe.ru

Anton Yu. Egorov — Doctor of Science, Technical Director, Connector Optics LLC, St. Petersburg, 194292, Russia; Scopus ID 7202362169; <https://orcid.org/0000-0002-0789-4241>; anton.egorov@connector-optics.com

