

Энергоэффективность оптоволоконной линии связи на основе вертикально-излучающих лазеров с-диапазона, реализованных методом спекания пластин и молекулярно-пучковой эпитаксией

© Я.Н. Ковач^{1,2}, С.А. Блохин², М.А. Бобров², А.А. Блохин², Н.А. Малеев², П.Е. Копытов¹, Д.С. Папылев¹, В.В. Андрюшкин¹, Е.С. Колодезный¹, А.В. Бабичев¹, А.Г. Гладышев¹, И.И. Новиков¹, Л.Я. Карачинский¹, А.Ю. Егоров¹, Г.А. Сапунов³, Si-Cong Tian^{3,4}, Dieter Bimberg^{3,4}

¹ Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

³ Китайско-немецкий центр зелёной фотоники, Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики,
Чанчунь, Китай

⁴ Центр нанофотоники, Институт физики твёрдого тела, Технический университет Берлина,
Берлин, Германия

e-mail: j-n-kovach@itmo.ru

Поступила в редакцию 16.02.2026 г.

В окончательной редакции 16.04.2026 г.

Принята к публикации 21.04.2026 г.

Приведены результаты исследований энергоэффективности оптоволоконных линий связи на основе стандартного одномодового оптического волокна ITU-T G.652.D и вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1550 nm, реализованных методом спекания пластин и молекулярно-пучковой эпитаксией. Показана принципиальная возможность снижения затрачиваемой энергии на передачу одного бита информации (энергоэффективности), приведенную к протяженности линии связи, ниже 100 fJ/(bit·km) при передаче данных на скорости 10 Gbps по оптоволоконной линии длиной 10 km. Дальнейшее улучшение энергоэффективности ограничено полосой пропускания оптоволоконного канала связи, накладываемой взаимодействием дисперсии оптического волокна и динамического уширения спектральной линии излучения вертикально-излучающего лазера.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, энергоэффективность, волоконно-оптические линии связи.

DOI: 10.61011/OS.2026.05.63352.9073-25

Введение

Для реализации передачи информации между соседними серверными стойками, устанавливаемыми в центрах обработки данных и вычислительных кластерах, повсеместно используются волоконные передатчики на основе многомодовых коротковолновых вертикально-излучающих лазеров (далее ВИЛ) спектрального диапазона 850 nm. Такие устройства позволяют реализовать высокоскоростную передачу данных по многомодовому оптическому волокну OM4/OM5 протяженностью до 100 m на скорости передачи данных 25 Gbps и 400 m на скорости передачи данных 10 Gbps, что идеально подходит для малых и средних вычислительных кластеров [1]. Однако для дальнейшего масштабирования и организации энергоэффективных межсоединений требуется использовать одномодовые приборы для снижения влияния межмодовой дисперсии волокна. Так, для коротковолновых одномодовых ВИЛ принципиально продемонстрирована возможность передачи данных на расстояние до 2 km при скорости передачи данных 25 Gbps [2]. В результате удалось

снизить затрачиваемую на передачу одного бита информации энергию, приведенную к протяженности линии связи (energy-distance-data ratio, EDDR), до уровня 100 fJ/(bit·km) [3].

Дальнейшее увеличение дальности оптической передачи данных по оптоволоконным линиям связи возможно только при использовании одномодового волокна и лазерных излучателей O- или C-спектральных диапазонов, для которых реализуются наилучшие условия распространения излучения: околонулевая хроматическая дисперсия или затухание менее 0.2 dB/km соответственно [4]. В связи с этим применение длинноволновых ВИЛ O- или C-спектральных диапазонов для реализации протяженных оптоволоконных линий связи является перспективным с точки зрения их компактности, стоимости и энергоэффективности относительно решений на основе одночастотных лазеров полосковой геометрии с распределенной обратной связью и внешней модуляцией. Более того, возможность реализации компактных матриц ВИЛ с индивидуальной адресацией открывает новые перспективы в области увеличения пропускной

способности линий связи в рамках технологии пространственного мультиплексирования каналов [5].

К сожалению, создание длинноволновых ВИЛ затруднено рядом фундаментальных ограничений, присущих системам материалов InAlGaAs/GaAs и InAlGaAsP/InP. Для их преодоления были предложены и успешно апробированы: конструкция вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей через внутриврезонаторные контакты для снижения оптических потерь на свободных носителях заряда; концепция заращенного туннельного перехода для реализации эффективных токового и оптического ограничений; гибридная интеграция высокоэффективных распределенных брэгговских отражателей (РБО) с активной областью на основе системы материалов InAlGaAsP/InP для решения проблемы низкой теплопроводности [6]. К числу наиболее перспективных подходов можно отнести ВИЛ с гибридными металл-диэлектрическими зеркалами (далее ГИ-ВИЛ) [7,8], а также ВИЛ с полупроводниковыми РБО GaAs/AlGaAs, которые были интегрированы с активной областью методом спекания пластин (далее СП-ВИЛ) [9]. Указанные подходы позволяют реализовать надежные длинноволновые ВИЛ с частотой эффективной модуляции по уровню -6 dB до 15 GHz [7,9,10]. Следует отметить, что хотя большая частота модуляции (до 25 GHz по уровню -6 dB) и может быть получена в рамках концепции короткого резонатора с двумя высококонтрастными металл-диэлектрическими зеркалами (далее ГИ-КР-ВИЛ) [8], однако до настоящего времени для таких устройств не была продемонстрирована надежность согласно ITU-Telcordia.

Благодаря низкой дисперсии волокна в телекоммуникационном О-диапазоне была продемонстрирована принципиальная возможность передачи данных по оптоволоконной линии связи протяженностью 10 km при скорости 12.5 Gbps для ГИ-ВИЛ [11], до 10 km при скорости 35 Gbps для СП-ВИЛ [12] и до 25 km при скорости 28 Gbps для ГИ-КР-ВИЛ [13]. Интеграция с лазерным драйвером и применение техники предискажения входного сигнала (*feed forward equalization*, FFE) позволили увеличить дальность передачи данных до 25 km при скорости 20 Gbps и до 4.5 km при скорости 40 Gbps для ГИ-КР-ВИЛ [14].

Скорость передачи данных с помощью длинноволновых ВИЛ С-диапазона в значительной степени ограничена дисперсией волокна. Так, для телекоммуникационного С-диапазона была продемонстрирована принципиальная возможность передачи данных по оптоволоконной линии связи протяженностью до 2 km при скорости 21 Gbps для СП-ВИЛ [15] и до 2 km при скорости 28 Gbps для ГИ-КР-ВИЛ [16]. Применение техники предискажения входного сигнала позволило увеличить скорость передачи данных до 27 Gbps при протяженности линии 2 km для СП-ВИЛ [15]. Дополнительное применение методов прямого исправления ошибок (*hard-decision forward error correction*, HD-FEC) и цифровой обработки сигналов (*digital signal processing*, DSP) позволяет увеличить

дальность передачи данных до 10 km при скорости 28 Gbps для ГИ-КР-ВИЛ [16].

В качестве альтернативы методам цифровой обработки сигнала был предложен подход, основанный на компенсации положительной дисперсии стандартного одномодового волокна длиной 80 km при помощи дополнительного волокна длиной 20 km с отрицательной дисперсией (*dispersion compensation fiber*, DCF), который позволил успешно реализовать передачу данных на расстояние в 100 km на скорости 10 Gbps [17]. Такое решение подходит для реализации и более протяженных линий связи, однако главным ограничением подхода является высокая стоимость DCF волокна.

Предметом настоящего исследования являются СП-ВИЛ спектрального диапазона 1550 nm (С-диапазон), реализованные комбинированным методом молекулярно-пучковой эпитаксии и спекания полупроводниковых пластин. Исследования посвящены изучению влияния протяженности оптоволоконной линии связи на дальность передачи данных и анализу затрачиваемой энергии на передачу одного бита информации с учетом протяженности оптоволоконной линии связи на основе одномодового волокна ITU-T G.652.D. Отметим, что в настоящем исследовании использовалась амплитудно-импульсная модуляция без применения техник предискажения сигнала или постобработки, использование которых приводит к большему энергопотреблению.

Объекты исследования

Конструкция исследованных лазеров представляет собой гибридный вертикальный 3λ -микрорезонатор с инжекцией носителей заряда через внутриврезонаторные контакты и выводом излучения в верхнюю полусферу, сформированный методом спекания пластин полупроводниковых РБО на основе системы материалов AlGaAs/GaAs и пластины активной области на основе системы материалов InAlGaAs/InP (рис. 1). В качестве активной области лазера использовались напряженные ($\sim 1.4\%$) квантовые ямы InGaAs/InAlGaAs. Верхний и нижний РБО исследуемого СП-ВИЛ содержали соответственно 22.5 и 35.5 пар нелегированных четверть-волновых слоев AlGaAs/GaAs. Заращенный туннельный переход диаметром $7\mu\text{m}$ использовался для создания токового и оптического ограничений. Все процессы по выращиванию исходных гетероструктур и заращиванию туннельного перехода были выполнены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Более детальное описание приборной конструкции СП-ВИЛ приведено в работе [18].

На рис. 2 приведены статические характеристики исследуемого лазера. Пороговый ток устройства составил 1.25 mA, последовательное сопротивление составило порядка 115 Ω . При рабочих токах более 2.5 mA наблюдается одномодовый режим генерации с коэффициентом подавления боковых мод (*side mode suppression ratio*,

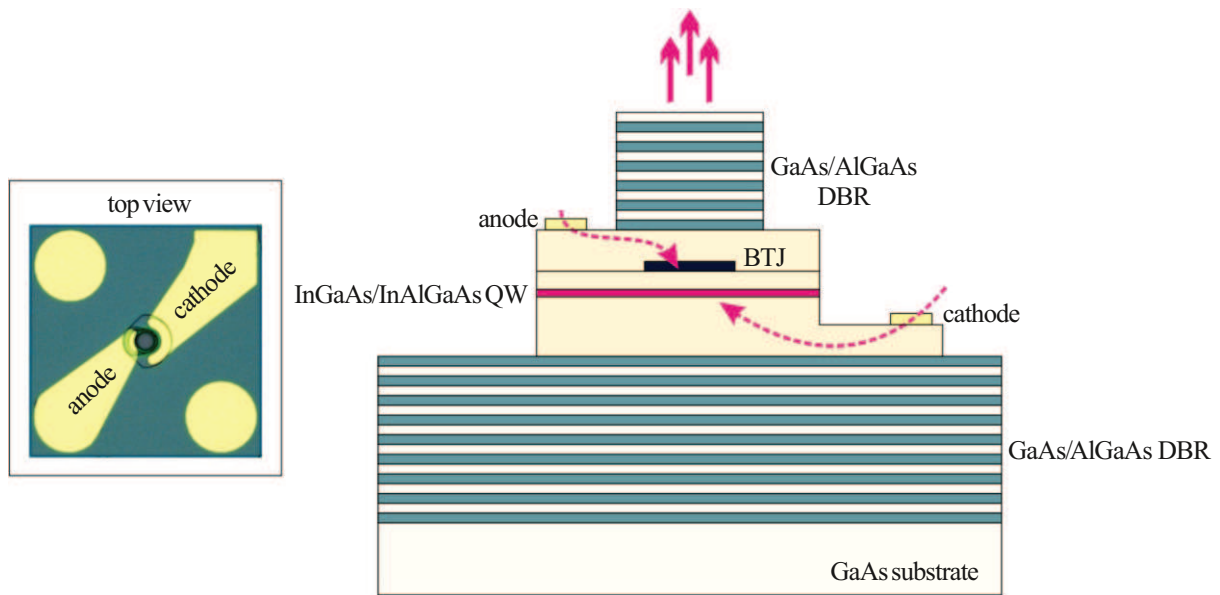


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции СП-ВИЛ с зарытым туннельным переходом (анг. buried tunnel junction, BTJ) и внутрирезонаторной инжекцией носителей заряда. На вставке слева представлено изображение СП-ВИЛ, полученное с помощью оптического микроскопа.

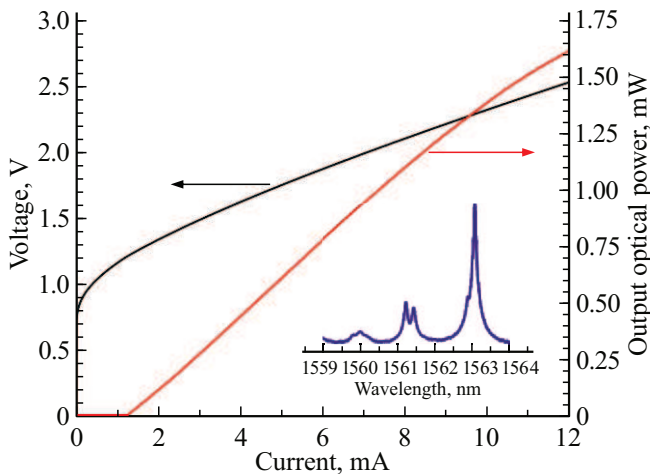


Рис. 2. Вольт- и ватт-амперные характеристики СП-ВИЛ, на вставке представлен оптический спектр излучения лазера при рабочем токе 12 мА.

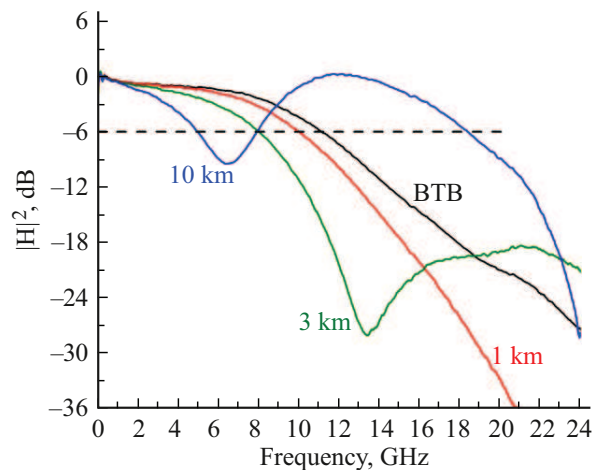


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика линии связи на основе СП-ВИЛ и одномодового волокна различной протяженности. Рабочий ток СП-ВИЛ 12 мА.

SMSR) более 30 dB. Уровень измеряемой выходной оптической мощности в одномодовом волокне составил не более 1.8 mW, что обусловлено относительно невысокой эффективностью ввода излучения лазера в волокно на уровне 30–40%.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния длины стандартного одномодового волокна ITU-T G.652.D на полосу пропускания оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ были исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ)

методом малосигнального частотного анализа. Так, АЧХ оптоволоконной линии связи были измерены при помощи векторного анализатора цепей Rohde-Swartz ZVA40 и быстродействующего фотодетектора Alphalas UPD-15-IR2, результаты измерений представлены на рис. 3. Для ультракороткой линии связи (конфигурация back-to-back, BTB) оптическая полоса пропускания f_{-3dB_0} (соответствует электрической полосе f_{-6dB_e} по уровню спада -6 dB, измеряемого векторным анализатором цепей) задается частотой эффективной модуляции лазера и достигает 11.1 GHz. Следует отметить, что оптическая полоса эффективной модуляции СП-ВИЛ преимуще-

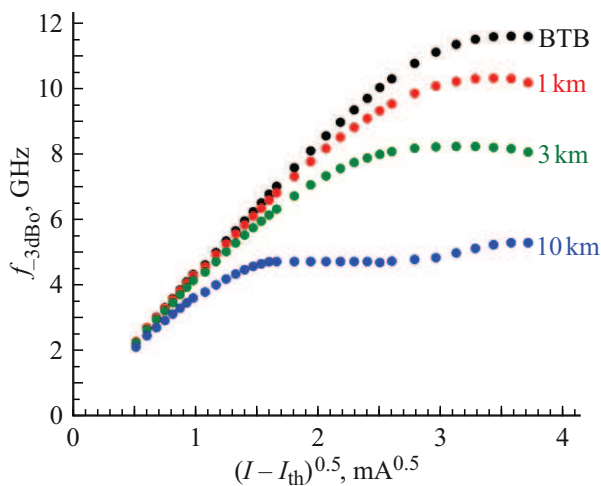


Рис. 4. Зависимость оптической полосы пропускания линии связи на основе одномодового волокна различной протяженности от приведенного рабочего тока СП-ВИЛ.

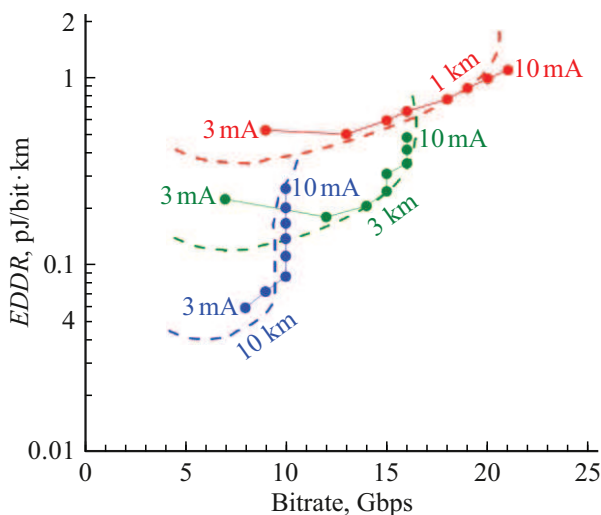


Рис. 5. Теоретически оцененная энергоэффективность (отмечена штриховыми линиями) и экспериментально определенная наименьшая энергоэффективность (отмечена точками) оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ при различной скорости передачи данных. Экспериментальные оценки выполнены для рабочих токов лазера от 3 до 10 мА с шагом 1 мА.

ственно ограничена двумя факторами: паразитной емкостью и объемом моды [15,19]. В самом деле, паразитная частота исследуемого СП-ВИЛ не превышает 10 GHz несмотря на оптимизацию уровня легирования слоев в микрорезонаторе. Относительно большая глубина проникновения электромагнитного поля моды в полупроводниковые РБО и необходимость использования относительно толстых внутрирезонаторных контактных слоев ограничивает максимальную скорость нарастания резонансной частоты и, следовательно, частоты эффективной модуляции с током. В результате даже при повышении паразитной частоты до предельных значений

более 13 GHz за счет оптимизации топологии мезы предельная частота эффективной модуляции остается ограниченной на уровне 15 GHz по уровню -3 dB.

По мере увеличения протяженности волокна в АЧХ появляются локальные резонансные провалы (их количество зависит от частотного диапазона и протяженности волокна), которые также сдвигаются в сторону меньших частот с увеличением длины оптоволоконной линии связи. Данный факт обусловлен взаимодействием положительной дисперсии стандартного одномодового волокна и динамического уширения спектральной линии СП-ВИЛ (оцененное ранее значение α -фактора составило $\sim 5-9$ для разных мод прибора [18]).

Результаты детального анализа АЧХ оптоволоконной линии связи в зависимости от рабочего тока лазера и протяженности линии связи приведены на рис. 4. При малых рабочих токах (до ~ 3 мА) выраженный резонансный пик на частоте релаксационных колебаний СП-ВИЛ частично компенсирует негативный эффект резонансного затухания в волокне. Увеличение протяженности линии связи ведет к снижению скорости нарастания оптической полосы пропускания f_{-3dB0} и более раннему насыщению зависимости f_{-3dB0} от тока накачки, результатом чего является более чем двукратное снижение оптической полосы пропускания линии связи на основе СП-ВИЛ и стандартного одномодового волокна длиной 10 km относительно конфигурации ВТВ.

Величина энергоэффективности оптоволоконной линии связи EDDR может быть оценена согласно выражению $EDDR = P_{el}/(BR \cdot L)$, где P_{el} — электрическая мощность, потребляемая лазером; BR — достигнутая скорость передачи данных; L — протяженность волокна [3]. Предельно-возможный уровень EDDR можно оценить из данных малосигнального частотного анализа, используя выражение для скорости передачи данных в виде $BR = M \cdot f_{-3dB0}$, где M — спектральная эффективность. Актуальное значение M зависит от характеристик оборудования, используемого для анализа цифровой оптической передачи данных, варианта корпусирования лазера, а также от применения предсказаний входного электрического сигнала и может варьироваться в довольно широком диапазоне. Поэтому было решено воспользоваться теоремой Шеннона–Хартли для случая зашумленной линии связи с параметром качества передачи сигнала (Q -фактор) не хуже 3 и зафиксировать значение спектральной эффективности на уровне 2 (bit/s)/Hz [20].

На рис. 5 приведены результаты экспериментальных оценок энергоэффективности оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ. Применялась амплитудно-импульсная модуляция лазера в формате без возвращения к нулю без применения техник предсказания сигнала (*feed forward equalization*, FFE), прямого исправления ошибок (HD-FEC) и/или цифровой обработки сигналов (DSP). Для формирования входного модулирующего сигнала использовался генератор Keysight M8195A, а оптические глазковые диаграммы регистрировались с помощью осциллографа Keysight UXR0204A.

Очевидно, что для достижения высокой энергоэффективности EDDR необходимо не только повышать быстродействие, но и снижать энергопотребление лазера.

Согласно результатам теоретического расчета, представленным на рис. 5, наименьшее значение энергоэффективности EDDR реализуется при промежуточных скоростях передачи данных (5–9 Gbps), что обусловлено различием в скорости нарастания частоты эффективной модуляции и энергопотребления лазера по мере роста рабочего тока. Хотя увеличение протяженности линии связи ведет к уменьшению ее полосы пропускания, наблюдается существенное снижение минимально достижимой величины EDDR. Максимальная скорость передачи данных в конфигурации ВТВ превышает 30 Gbps, что соответствует энергоэффективности выше 1.2 pJ/bit, а снижение рабочего тока в 1.5 раза ведет к уменьшению значения до уровня 0.83 pJ/bit [21]. Однако здесь необходимо учитывать степень подавления релаксационных колебаний, поскольку ярко выраженные резонансные пики будут приводить к межсимвольной интерференции и ограничивать возможности по передаче данных без использования техник предсказания сигнала. Так, негативное влияние релаксационных колебаний для исследуемого канала связи было подавлено при рабочих токах СП-ВИЛ более 4 мА. Для оптоволоконной линии связи длиной 1 км наилучшая энергоэффективность EDDR достигает значения 500 fJ/(bit·km) при скорости передачи данных 13 bps, что хорошо соответствует результатам теоретических оценок (рис. 5). Необходимо отметить, что для фиксированного рабочего тока лазера при увеличении волоконной линии наблюдалось ограничение предельно-достижимой скорости передачи данных. Увеличение протяженности волоконной линии до 10 км ограничивает скорость передачи данных на уровне 10 Gbps, но позволяет снизить затраты энергии на передачу бита информации до 100 fJ/(bit·km).

Полученные значения энергоэффективности оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ спектрального С-диапазона сравнимы с энергоэффективностью линии связи на основе ГИ-КР-ВИЛ [16], для которой без использования HD-FEC и DSP была продемонстрирована возможность передачи данных на скорости 28 Gbps по волоконной линии длиной 2 км и EDDR равной ~ 280 fJ/(bit·km). Также полученное значение энергоэффективности оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ спектрального С-диапазона сопоставима с результатами предыдущих исследований EDDR оптоволоконной линии связи длиной 2 км на основе СП-ВИЛ, где были продемонстрированы значения затрачиваемой энергии на передачу одного бита ~ 600 fJ/(bit·km) [15]. Как было указано выше, дальнейшее снижение величины EDDR возможно в рамках концепции компенсации дисперсии волокна по аналогии с работой [17].

Заключение

Таким образом, в настоящей работе выполнен анализ влияния длины оптоволоконных линий связи на максимальную скорость передачи данных и энергоэффективность оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ спектрального С-диапазона. Продемонстрировано ограничение оптической полосы пропускания линии связи из-за взаимодействия положительной дисперсии стандартного одномодового волокна и динамического уширения спектральной линии СП-ВИЛ. Оцененные значения энергоэффективности оптоволоконной линии связи на основе СП-ВИЛ спектрального С-диапазона сравнимы с результатами, достигнутыми ранее для альтернативной конструкции длинноволновых ГИ-ВИЛ. Продемонстрированные характеристики СП-ВИЛ свидетельствуют о значительных перспективах для реализации энергоэффективных трансиверов на их основе, рассчитанных на высокоскоростную передачу данных по волоконным линиям связи протяженностью до 10 км.

Финансирование работы

Работа авторов из Университета ИТМО по реализации экспериментов по передаче данных поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSER-2025-0025).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B.D. Padullaparthi, J. Tatum, I. Kenichi. *VCSEL Industry: Communication and Sensing*, (John Wiley & Sons, 2021).
- [2] N. Ledentsov, M. Agustin, L. Chorchos, N.N. Ledentsov, J.P. Turkiewicz. *Electron. Lett.* **54** (12), 774–775 (2018). DOI: 10.1049/el.2018.0720
- [3] P. Moser, J.A. Lott, P. Wolf, G. Larisch, A. Payusov, N.N. Ledentsov, W. Hofmann, D. Bimberg. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **24** (1), 19–21 (2012). DOI: 10.1109/LPT.2011.2171938
- [4] Corning: SMF-28 Ultra Optical Fiber [Электронный ресурс]. URL: www.corning.com/opticalfiber
- [5] L. Zhang, J. Chen, E. Agrell, R. Lin, L. Wosinska. *J. Light Technol.*, **38** (1), 18–30 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2019.2941765
- [6] A.V. Babichev, Ya.N. Kovach, S.A. Blokhin, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.Y. Egorov, S.-C. Tian, D. Bimberg. *J. Phys. Photonics.*, **7** (3), 032001 (2025). DOI: 10.1088/2515-7647/ade5de
- [7] W. Hofmann. *Photonics J.*, **2** (5), 802–815 (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. Light Technol.*, **35** (4), 727–733 (2017), DOI: 10.1109/JLT.2016.2597870

- [9] A. Sirbu, G. Suruceanu, V. Iakovlev, A. Mereuta, Z. Mickovic, A. Caliman, E. Kapon. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **25** (16), 1555–1558 (2013). DOI: 10.1109/LPT.2013.2271041
- [10] A.V. Babichev, L.Ya. 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.Yu. Egorov. *J. Quantum Electron.*, **53** (6), 1–8 (2017). DOI: 10.1109/JQE.2017.2752700
- [11] A. Gatto, A. Boletti, P. Boffi, C. Neumeyr, M. Ortsiefer, E. Ronneberg, M. Martinelli. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **21** (12), 778–780 (2009). DOI: 10.1109/LPT.2009.2016434
- [12] A. Caliman, A. Mereuta, P. Wolf, A. Sirbu, V. Iakovlev, D. Bimberg, E. Kapon. *Opt. Express.*, **24** (15), 16329 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.016329
- [13] A. Malacarne, C. Neumeyr, W. Soenen, F. Falconi, C. Porzi, T. Aalto, J. Roskopf, J. Bauwelinck, A. Bogoni. *J. Light. Technol.*, **36** (9), 1527–1536 (2018). DOI: 10.1109/JLT.2017.2782882
- [14] M. Müller, P. Wolf, C. Grasse, M.P.I. Dias, M. Ortsiefer, G. Böhm, E. Wong, W. Hofmann, D. Bimberg, M.-C. Amann. *Electron. Lett.*, **48** (23), 1487 (2012). DOI: 10.1049/el.2012.3355
- [15] G. Sapunov, I. Derebezov, S. Blokhin, I. Kovach, S.-C. Tian, M.A. Maricar, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Babichev, A. Gladyshev, A. Egorov, D. Bimberg. *J. Phys. Photonics.*, **7** (3), 035032 (2025). DOI: 10.1088/2515-7647/ade20
- [16] F. Karinou, N. Stojanovic, A. Daly, C. Neumeyr, M. Ortsiefer. *J. Light. Technol.*, **34** (12), 2897–2904 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2015.2505359
- [17] Y. Rao, C. Chase, M.C.Y. Huang, S. Khaleghi, M.R. Chitgarha, M. Ziyadi, D.P. Worland, A.E. Willner, C.J. Chang-Hasnain. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics* (Optica Publishing Group, 2012), p. CTh5C.3. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2012.CTh5C.3
- [18] С.А. Блохин, Я.Н. Ковач, М.А. Бобров, А.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Е.С. Колодезный, К.О. Воропаев, А.В. Куликов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *Опт. и спектр.*, **131** (8), 1095–1100 (2023), DOI: 10.61011/OS.2023.08.56301.5369-23 [S.A. Blokhin, J.N. Kovach, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.V. Babichev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, E.S. Kolodeznyi, K.O. Voropaev, A.V. Kulikov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov. *Opto Spectros.*, **131** (8) 1038–1043. DOI: 10.61011/EOS.2023.08.57287.5369-23].
- [19] A. Babichev, S. Blokhin, A. Gladyshev, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Blokhin, M. Bobrov, N. Maleev, V. Andryushkin, E. Kolodeznyi, D. Denisov, N. Kryzhanovskaya, K. Voropaev, V. Ustinov, A. Egorov, H. Li, S.-C. Tian, H. Saiyi, G. Sapunov, D. Bimberg. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **35**(6), 297–300 (2023). DOI: 10.1109/LPT.2023.3241001
- [20] J.R. Pierce *An Introduction to Information Theory: Symbols, Signals and Noise*, 2nd ed. (Courier Dover Publications, 1980).
- [21] С.А. Блохин, Я.Н. Ковач, М.А. Бобров, А.А. Блохин, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.Г. Гладышев, П.Е. Копытов, Д.С. Папылев, К.О. Воропаев, А.Ю. Егоров, С. Тиэн, Д. Бимберг. *Оптический журнал*, **91** (12), 35–45 (2024). DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-12-35-45 [S.A. Blokhin, Ya.N. Kovach, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, A.V. Babichev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.G. Gladyshev, P.E. Kopytov, D.S. Papylev, K.O. Voropaev, A.Yu. Egorov, S. Tian, D. Bimberg. *J. Optical Technology*. **91** (12), 796–802 (2024). DOI: 10.1364/JOT.91.000796].