

# Надежные вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 850 нм для оптической передачи данных на скорости 25 Гбит/с

© С.А. Блохин<sup>\*+,</sup> Л.Я. Карачинский<sup>\*+,</sup> И.И. Новиков<sup>\*+,</sup> А.С. Паюсов<sup>\*</sup>, А.М. Надточий<sup>\*</sup>, М.А. Бобров<sup>\*+,</sup> А.Г. Кузьменков<sup>\*+,</sup> Н.А. Малеев<sup>\*+,</sup> Н.Н. Леденцов<sup>\*•,</sup> В.М. Устинов<sup>\*</sup>, Д. Бимберг<sup>≠</sup>

<sup>\*</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> ООО „Коннектор Оптик“,

194292 Санкт-Петербург, Россия

<sup>•</sup> VI Systems GmbH,

D-10623 Berlin, Germany

<sup>≠</sup> Technische Universität Berlin,

D-10623 Berlin, Germany

(Получена 1 июня 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

Созданы и исследованы эффективные быстродействующие вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм, перспективные для создания оптических межсоединений со скоростью передачи данных 25 Гбит/с на канал. Лазеры с диаметром селективно-окисленной токовой апертуры 6 мкм демонстрируют многомодовую генерацию с квантовой эффективностью 35–45% и пороговым током 0.5–0.7 мА в диапазоне температур 20–85°C. Согласно малосигнальному частотному анализу, максимальная частота модуляции лазеров превышает 17 ГГц при скорости нарастания с током более 9 ГГц/мА<sup>1/2</sup>, что позволяет обеспечить функционирование ВИЛ со скоростью 25 Гбит/с во всем рабочем диапазоне температур. По результатам 3000 ч ресурсных испытаний внезапной деградации вертикально-излучающих лазеров не выявлено. Изменение величины оптической мощности в рабочей точке и порогового тока вертикально-излучающих лазеров относительно момента начала испытаний не превысило 5 и 10% соответственно.

## 1. Введение

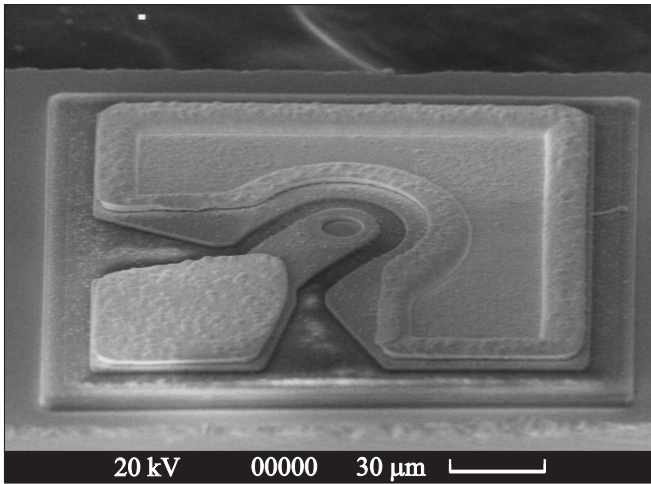
Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSEL) спектрального диапазона 850 нм являются ключевыми компонентами для создания современных сетей оптической передачи данных на расстоянии до 300 м. В настоящее время коммерчески доступные ВИЛ обеспечивают скорость передачи данных 10–14 Гбит/с [1]. Однако, согласно прогнозу Cisco, к 2014 году объем глобального интернет-трафика вырастет более чем в 4 раза, а суммарная скорость обмена информацией в системах обработки данных (серверы, маршрутизаторы и т.д.) превысит 1 Тбит/с, что в свою очередь потребует повышения скорости передачи. Так, в новых разрабатываемых межсистемных стандартах Infiniband и FC32G скорость будет увеличена до 25–32 Гбит/с на канал. Все это стимулирует поиск путей повышения быстродействия ВИЛ начиная от разработки новых материалов для активной области и заканчивая оптимизацией планарной технологии изготовления ВИЛ. Недавно показана принципиальная возможность достижения скорости передачи данных до 40 Гбит/с при комнатной температуре в режиме прямой модуляции, однако вопрос о надежности данных приборов не был изучен [2,3].

В данной работе рассмотрены особенности разработки быстродействующих ВИЛ спектрального диапазона 850 нм. Исследованы статические и динамические характеристики лазеров, а также рассмотрены механизмы,

лимитирующие быстродействие ВИЛ. Проведен анализ возможности реализации оптической линии связи на основе разработанных лазеров и продемонстрированы первые результаты их ресурсных испытаний.

## 2. Конструкция

Эпитаксиальная структура исследуемых ВИЛ спектрального диапазона 850 нм состоит из верхнего  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  распределенного брэгговского отражателя (РБО) *p*-типа, апертурных слоев  $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  *p*-типа, 1λ-микрорезонатора на основе  $\text{AlGaAs}$  с активной областью на основе напряженных квантово-размерных  $\text{InGaAlAs}$  гетероструктур; нижнего  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  РБО *n*-типа, контактного слоя  $\text{GaAs}$  *n*-типа, нелегированной подложки  $\text{GaAs}$ . В общем виде частотные характеристики ВИЛ, работающего выше порога генерации в режиме прямой токовой модуляции, определяются как внутренними свойствами источника лазерного излучения, так и внешними конструктивными параметрами, определяющими величины паразитных элементов электрической эквивалентной схемы прибора. Согласно стандартной динамической модели инжекционного лазера [4], для достижения высокого быстродействия ВИЛ необходимо повысить резонансную частоту и скорость ее нарастания с током (так называемый *D*-фактор), а также увеличить паразитную частоту отсечки фильтра низких частот, об-



**Рис. 1.** Изображение кристалла ВИЛ, изготовленного в высокочастотной геометрии, полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

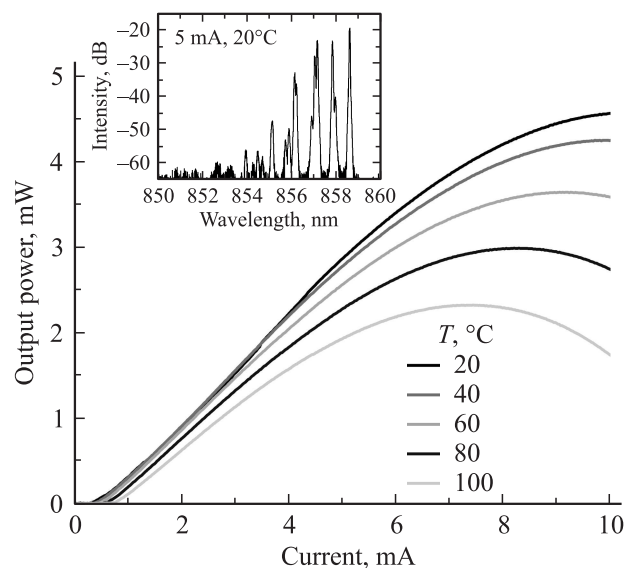
разованного паразитными элементами электрической эквивалентной схемы. Решение первой проблемы связано с повышением дифференциального усиления активной области за счет внедрения напряжений в GaAs/AlGaAs квантовую яму [5–6] и уменьшением времени жизни фотонов в резонаторе за счет оптимизации коэффициента отражения выводного РБО [7,8]. Для решения второй проблемы необходимо минимизировать приборную емкость путем эффективного увеличения толщины оксидной апертуры [9,10], а также обеспечить низкое электрическое сопротивление лазера при относительно небольших размерах токовой апертуры за счет применения градиентных интерфейсов на гетерограницах и модулированного профиля легирования для сохранения низких внутренних оптических потерь [11]. Указанные выше подходы были апробированы в эпитаксиальной структуре и приборной конструкции ВИЛ.

На рис. 1 приведено изображение общего вида кристалла ВИЛ, полученное с помощью растрового электронного микроскопа. Приборы реализованы в высокочастотной геометрии с конфигурацией контактных площадок типа земля-источник (GS-геометрия). В технологическом процессе изготовления ВИЛ использовались стандартная контактная фотолитография, плазмохимическое травление мезаструктуры и селективное окисление апертурных слоев AlGaAs. Для уменьшения эффекта саморазогрева лазера использовалась двойная мезаструктура. Омические контакты *n*- и *p*-типа формировались напылением и вжиганием слоев металлизации Ni/AuGe/Au и Ti/Pt/Au соответственно. С целью уменьшения паразитной емкости контактных площадок и планаризации использовался материал с низкой диэлектрической проницаемостью — бензоциклобутен (bisbenzocyclobutene, BCB).

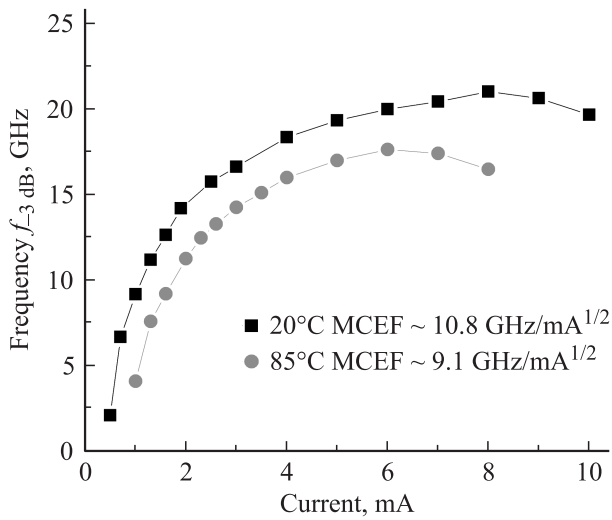
### 3. Статические и динамические характеристики

На рис. 2, а приведены типичные статические характеристики изготовленных ВИЛ с оксидной токовой апертурой диаметром  $\sim 6$  мкм. Приборы демонстрируют многомодовую лазерную генерацию с квантовой эффективностью более 45% и пороговым током менее 0.5 мА в непрерывном режиме генерации с пиком излучения вблизи длины волны 860 нм при температуре 20°C. Для ВИЛ характерен относительно малый объем активной области, в которой рекомбинируют носители, поэтому крайне важным является анализ саморазогрева лазеров с током. С увеличением температуры наблюдается монотонное увеличение порогового тока и падение эффективности до 0.7 мА и 35% при температуре 90°C соответственно. В целом разработанные ВИЛ спектрального диапазона 850 нм обладают субмиллиамперными пороговыми токами и дифференциальной эффективностью более 0.5 Вт/А во всем рабочем диапазоне температур, что важно для достижения высокого быстродействия приемопередающих модулей на их основе.

Для эффективной работы ВИЛ при скоростях передачи данных более 5 Гбит/с необходимо без потерь и искажений передать высокочастотную токовую модуляцию от источника сигнала в активную область для последующего электрооптического преобразования. Для оценки высокочастотных свойств исследуемых приборов был проведен малосигнальный частотный анализ на основе результатов измерений в диапазоне частот от 50 МГц до 30 ГГц. На рис. 3 показана эволюция частоты эффективной модуляции  $f_{-3dB}$  (по уровню спада амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на



**Рис. 2.** Зависимости выходной оптической мощности от тока накачки ВИЛ с апертурой диаметром 6 мкм в широком диапазоне температур. На вставке — спектр лазерного излучения при токе 5 мА и температуре 20°C.



**Рис. 3.** Частота эффективной модуляции  $f_{-3\text{дБ}}$  как функция управляющего тока для ВИЛ с апертурой диаметром 6 мкм при температурах 20 и 85°C.

–3 дБ) с увеличением постоянного тока в рабочей точке при разных температурах для ВИЛ с апертурой диаметром 6 мкм. Следует отметить, что все модельные аппроксимации АЧХ показывают хорошее совпадение с экспериментальными кривыми. Максимальная частота эффективной модуляции  $f_{-3\text{дБ}}$  для представленного лазера достигает 21 ГГц при температуре 20°C и 17.5 ГГц при температуре 85°C. Согласно эмпирической зависимости, скорости передачи данных от полосы модуляции лазера в режиме прямой модуляции  $F \approx 1.55f_{-3\text{дБ}}$  [12], это обеспечит функционирование лазера на скоростях не менее 28 Гбит/с в требуемом рабочем диапазоне температур. Следует отметить, что частота эффективной модуляции  $f_{-3\text{дБ}}$  быстро растет с током (так называемый МСЕФ-фактор  $\sim 10.8 \text{ ГГц/мА}^{1/2}$ ) и достигает значения  $\sim 16 \text{ ГГц}$  уже при токе 2.5–3 мА при температуре 20°C. При повышенной температуре падение усиления активной области и рост порогового тока приводят к уменьшению МСЕФ-фактора до уровня  $9.1 \text{ ГГц/мА}^{1/2}$  и, как результат, для достижения той же частоты требуются более высокие рабочие токи  $\sim 4 \text{ мА}$ .

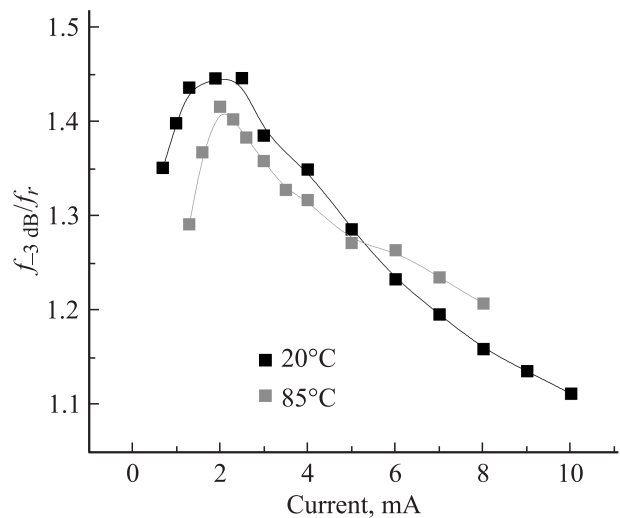
В общем случае на динамические характеристики инжекционного лазера (в режиме прямой модуляции) влияют три фактора: демпфирование, тепловые эффекты и паразитная частота отсечки, а амплитудно-частотная характеристика лазера (АЧХ) определяется передаточной функцией [4]

$$H_i(f) = \text{const} \frac{f_r^2}{[f_r^2 - f^2 + j\gamma(f/2\pi)][1 + j(f/f_p)]},$$

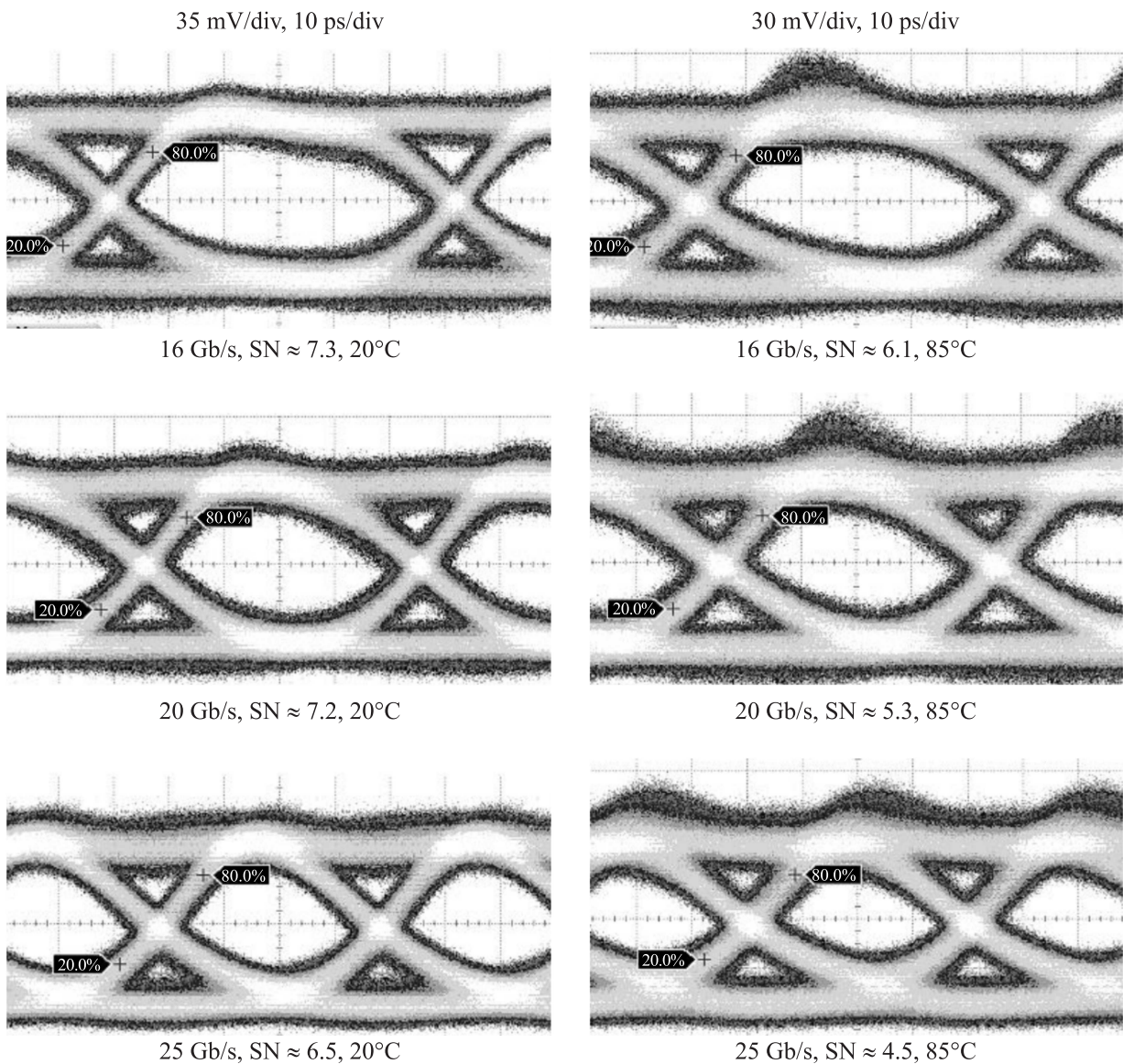
где  $f_r$  — резонансная частота системы,  $\gamma$  — коэффициент затухания,  $f_p$  — паразитная частота отсечки. Поскольку аппроксимация экспериментальной АЧХ в рамках данной модели не всегда корректна в силу боль-

шого количества варьируемых переменных, паразитная частота отсечки определялась путем экстраполяции частотной зависимости коэффициента отражения входного СВЧ сигнала с использованием эквивалентной электрической схемы ВИЛ, а затем проводилась аппроксимация экспериментальной АЧХ по трем параметрам.

По результатам измерения коэффициента отражения СВЧ сигнала, паразитные элементы конструкции лазера слабо влияют на высокочастотные свойства ВИЛ в диапазоне скоростей передачи данных до 25 Гбит/с, поскольку паразитная частота отсечки  $f_p$  превышает 20 ГГц. Максимальная частота эффективной модуляции зависит от резонансной частоты, коэффициента затухания и соотношения между ними (так называемого  $K$ -фактора) [4]. Чтобы установить, какой механизм лимитирует быстродействие исследуемого лазера, были построены отношения частоты эффективной модуляции к резонансной частоте в зависимости от тока накачки (см. рис. 4). При малых токах данное отношение лежит в диапазоне 1.35–1.45, что близко к теоретическому пределу 1.55, когда максимальная частота модуляции в основном ограничена тепловыми эффектами и определяется лишь частотой релаксационных колебаний [4]. С ростом тока наблюдается монотонное падение отношения максимальной частоты модуляции к резонансной частоте до 1.1, что коррелирует с ростом коэффициента затухания. При повышенной температуре начальный участок зависимости отношения максимальной частоты модуляции к резонансной частоте от тока не так сильно выражен, но тенденция сохраняется. В то же время, оценка  $K$ -фактора в диапазоне токов со слабым эффектом саморазогрева дает величину  $\sim 0.3 \text{ нс}$ , что соответствует теоретической предельной частоте модуляции  $\sim 30 \text{ ГГц}$ . Однако эффекты саморазогрева лазера и компрессии усиления, а также изменения



**Рис. 4.** Зависимости отношения ширины полосы пропускания  $f_{-3\text{дБ}}$  к резонансной частоте  $f_r$  для ВИЛ с апертурой диаметром 6 мкм при температурах 20 и 85°C.

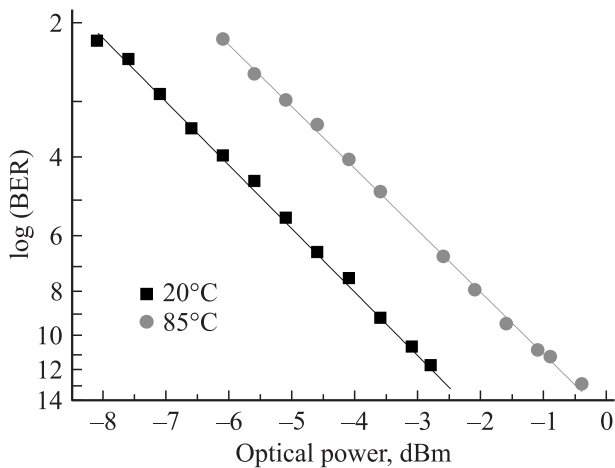


**Рис. 5.** Глаз-диаграммы на скорости 16, 20 и 25 Гбит/с для ВИЛ с диаметром апертуры 6 мкм при температуре 20 и 85°C. Рабочий ток 5 мА, NRZ-формат модуляции, PRBS-последовательность длиной  $2^7 - 1$  битов.

спектрального согласования резонансной длины волны и максимума спектра усиления активной области (так называемый детюнинг) ведут к преждевременному падению дифференциального усиления и сублинейному росту коэффициента затухания, что приводит к насыщению зависимости частоты модуляции от тока. Таким образом, быстродействие данного лазера лимитировано комбинацией двух механизмов: тепловые эффекты и демпфирование.

Для оценки принципиальной возможности применения разработанных ВИЛ в цифровой оптической технологии передачи данных были проведены исследования глаз-диаграмм в режиме прямой токовой модуляции по амплитудному формату без возвращения к нулю (non-return to zero, NRZ) с использованием псевдослу-

чайной последовательности битов (pseudorandom binary sequence, PRBS) длиной  $2^7 - 1$ . Согласно результатам малосигнального частотного анализа, для обеспечения высокого быстродействия в требуемом температурном диапазоне без перестройки рабочей точки и амплитуды модуляции оптимален ток накачки 5 мА. На рис. 5 приведены глаз-диаграммы ВИЛ с апертурой диаметром 6 мкм при температурах 20 и 85°C. С одной стороны, с повышением скорости передачи данных с 16 до 25 Гбит/с в глаз-диаграмме область устойчивого разделения нуля и единицы несколько сужается, что ведет к небольшому падению отношения сигнал/шум с 7.3 до 6.5. С другой стороны, увеличение температуры приводит лишь к ухудшению соотношения сигнал-шум (с 6.7 до 4.5) и падению оптической амплитуды модуляции



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента ошибок BER от регистрируемой оптической мощности при скорости передачи данных 25 Гбит/с для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 6 мкм при температуре 20 и 85°C.

(на 20–30%) без существенных изменений в форме глаз-диаграммы, что обусловлено падением квантовой эффективности ВИЛ с температурой и скоростью нарастания резонансной частоты. Следует отметить, что отношение сигнал/шум в существенной степени лимитировано шумами регистрирующей оптической системы (внешние широкополосные усилители, несогласованность линий).

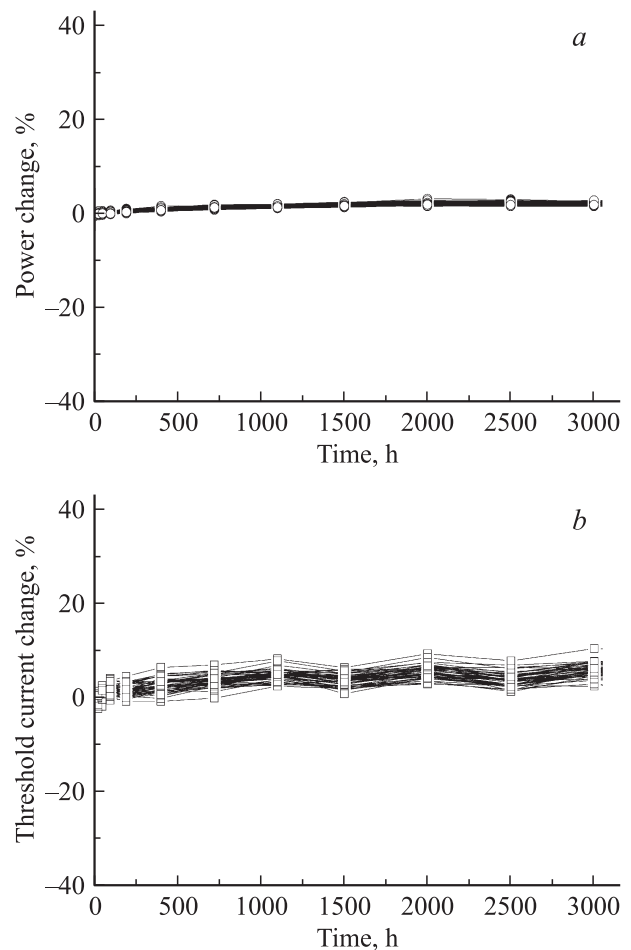
На рис. 6 представлена вероятность появления ошибок в оптическом канале длиной 3 м в зависимости от уровня регистрируемой мощности при скорости передачи данных 25 Гб/с и температурах 20 и 85°C. Очевидно, что при средней оптической мощности –2.5 дБм оптический канал связи обеспечивает безошибочную передачу данных (вероятность появления ошибок BER < 10<sup>-12</sup>), а зависимость вероятности появления ошибок от уровня оптической мощности хорошо аппроксимируется прямой, что исключает занижение вероятности ошибок из-за кросстока передающего и приемного каналов тестирующей системы. При повышенной температуре безошибочная передача данных со скоростью 25 Гбит/с реализуется при большей мощности (на 2 дБм) вследствие падения соотношения сигнал-шум и оптической амплитуды модуляции. Таким образом, уменьшение шумов широкополосного усилителя за счет интеграции фотодетектора с усилителем и применение предварительной коррекции модуляционного тока лазера позволят радикально снизить мощности, необходимые для реализации оптической линии связи.

#### 4. Ресурсные испытания

Для достижения высокого быстродействия ВИЛ потребовалось увеличить толщину оксида и поднять плотность рабочего тока до 15–20 кА/см<sup>2</sup>. Однако селектив-

ное окисление слоев AlGaAs приводит к возникновению напряжений растяжения [13], что часто становится причиной появления дефектов темных линий, приводящих к деградации лазеров [14,15], к тому же проблема механической надежности ВИЛ при эффективном увеличении толщины оксида до конца не решена. Более того, увеличение плотности рабочего тока с 10 до 20 кА/см<sup>2</sup> может уменьшить ресурс лазера в 60 раз [16], в связи с чем вопрос надежности ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с быстродействием более 14 Гбит/с пока остается открытым. В этой связи крайне актуально изучить временную деградацию характеристик разработанных ВИЛ, способных функционировать со скоростью передачи данных 25 Гбит/с.

Для определения надежности высокоскоростных ВИЛ были начаты испытания по ускоренному старению в условиях повышенных температур и тока накачки 5 мА, соответствующем скорости передачи данных 25 Гбит/с во всем рабочем диапазоне температур. Контакты к индивидуальным чипам ВИЛ формировались с помощью ультразвуковой микросварки проволочных выводов по



**Рис. 7.** Изменение оптической мощности в рабочей точке (5 мА) и порогового тока для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 6 мкм в ходе ресурсных испытаний при температуре 95°C.

методу шарик-клин (ball-wedge). В силу малых размеров апертур ВИЛ крайне чувствительны к электростатическому разряду, поэтому после монтажа была проведена проверка токов утечки лазеров. С целью стабилизации параметров лазера и учета отказа приборов на начальном этапе службы (так называемой „детской смертности“) в оценке ресурса лазеров были проведены кратковременные испытания (так называемое прожигание) при повышенных токах и температуре. ВИЛ типично работают в режиме автоматической стабилизации по току, поэтому контролируемые параметрами являются зависимости порогового тока и оптической мощности в рабочей точке от времени. Критерием деградации ВИЛ обычно является изменение контрольного параметра более чем на 2дБ. На рис. 7 представлены результаты испытаний при температуре 95°C для группы из 50 лазеров. После 3000 ч испытаний внезапной деградации выявлено не было. Изменения в величине оптической мощности в рабочей точке и порогового тока ВИЛ относительно момента начала испытаний не превысили 5 и 10% соответственно.

## 5. Заключение

В работе рассмотрены проблемы обеспечения высокого быстродействия ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с оксидной токовой апертурой. Реализованы многомодовые температуростабильные лазеры, обладающие дифференциальной эффективностью более 0.5 Вт/А и субмиллиамперными пороговыми токами в диапазоне температур 20–85°C. Предельная частота эффективной модуляции разработанных ВИЛ превышает 18 ГГц при величине МСЕФ-фактора  $\sim 9 \text{ ГГц/мА}^{1/2}$  во всем рабочем диапазоне температур. Быстродействие лазеров лимитировано комбинацией двух механизмов: тепловые эффекты и демпфирование. Тем не менее разработанные ВИЛ позволяют реализовать оптическую передачу данных по амплитудному формату NRZ на скорости 25 Гбит/с в требуемом диапазоне температур. После 3000 ч испытаний внезапной деградации, а также существенных изменений (более 10%) в величине оптической мощности в рабочей точке и порогового тока ВИЛ относительно момента начала испытаний не выявлено. Полученные результаты позволяют использовать созданные ВИЛ для реализации оптических межсоединений для применения в высокопроизводительных вычислительных системах и высокоскоростных дата-центрах.

Авторы выражают благодарность А. Мутигу, Г. Фиолу и Дж. Лотту за помощь в выполнении исследований и плодотворные дискуссии, способствовавшие написанию этой статьи.

Работа выполнялась при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-02-12239-офи\_м), программы № 24 президиума РАН.

## Список литературы

- [1] R. King, S. Intemann, S. Wabra. Proc. SPIE, **8276**, 82760G (2012).
- [2] S.A. Blokhin, J.A. Lott, A. Mutig, G. Fiol, N.N. Ledentsov, M.V. Maximiv, A.M. Nadtochiy, V.A. Shchukin, D. Bimberg. Electron. Lett., **45**, 501 (2009).
- [3] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, B. Kögel, E. Haglund, A. Larsson, A. Mutig, A. Nadtochiy, D. Bimberg, A. Joel. Electron. Lett., **46**, 1014 (2009).
- [4] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (N.Y., Wiley, 1995).
- [5] А.М. Надточий, С.А. Блохин, А. Мутиг, Дж. Лотт, Н.Н. Леденцов, Л.Я. Карачинский, М.В. Максимов, В.М. Устинов, Д. Бимберг. ФТП, **45**, 688 (2011).
- [6] S.B. Healy, E.P. O'Reilly, J.S. Gustavsson, P. Westbergh, A. Haglund, A. Larsson, A. Joel. IEEE J. Quant. Electron., **46**, 504 (2010).
- [7] С.А. Блохин, М.А. Бобров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, В.В. Стеценко, М.М. Павлов, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Ю.М. Задиранов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. ФТП, **47**, 913 (2013).
- [8] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, B. Kogel, A. Haglund, A. Larsson, A. Joel. Proc. SPIE, **7952**, 79520K (2011).
- [9] А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, С.И. Трошков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А. Mutig, D. Bimberg. Письма ЖТФ, **38**, 10 (2012).
- [10] Y.-C. Chang, C.S. Wang, L.A. Johansson, L.A. Coldren. Electron. Lett., **42**, 1281 (2006).
- [11] Y.-C. Chang, L.A. Coldren. IEEE J. Select Topics Quant. Electron., **15**, 704 (2009).
- [12] G.P. Agrawal. *Fiber optic communication systems* (John Wiley&Sons Inc., 1997).
- [13] С.А. Блохин, А.Н. Смирнов, А.В. Сахаров, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, Д.А. Бедарев, Е.В. Никитина, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. ФТП, **39**, 782 (2005).
- [14] C. Helms, I. Aeby, W. Luo, R.W. Herrick, A. Yuen. Proc. SPIE, **5364**, 183 (2004).
- [15] S. Xie, R. Herrick, G. De Brabander, W. Widjaja, U. Koelle, A.-N. Cheng, L. Giovane, F. Hu, M. Keever, T. Osentowski, S. McHugo, M. Mayonte, S. Kim, D. Chamberlin, S.J. Rosner, G. Girolami. Proc. SPIE, **4994**, 173 (2003).
- [16] В.М. Hawkins, R.A. Hawthorne, J.K. Guenter, J.A. Tatum, J.R. Biard. Proc. 52nd Conf. on Electronic Components and Technology (San Diego, CA, USA, May 2002) p. 540.

Редактор Т.А. Полянская

## Degradation-robust 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for 25 Gb/s optical data transmission

*S.A. Blokhin*<sup>\*,+</sup>, *L.Ya. Karachinsky*<sup>\*,+</sup>, *I.I. Novikov*<sup>\*,+</sup>,  
*A.S. Payusov*<sup>\*</sup>, *A.M. Nadtochiy*<sup>\*</sup>, *M.A. Bobrov*<sup>\*,+</sup>,  
*A.G. Kuzmenkov*<sup>\*,+</sup>, *N.A. Maleev*<sup>\*,+</sup>, *N.N. Ledetsov*<sup>\*,•</sup>,  
*V.M. Ustinov*<sup>\*</sup>, *D. Bimberg*<sup>≠</sup>

\* Ioffe Physicotechnical Institute  
Russian Academy of Science,  
194021 St. Petersburg, Russia

+ Connector Optics LLC,  
194292 St. Petersburg, Russia

• VI Systems GmbH,  
D-10623 Berlin, Germany

≠ Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

**Abstract** 850 nm vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) for optical interconnects with the data transmission speed of 25 Gb/s per channel were developed and studied. VCSELs with the oxide aperture diameter of  $6\ \mu\text{m}$  show multimode lasing with the slope efficiency 35–45% and threshold current 0.5–0.7 mA at 20–85°C. Small signal modulation experiments show maximal modulation bandwidth  $> 17\ \text{GHz}$ , increasing of the modulation bandwidth with increasing pump current is  $> 9\ \text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$ . These results indicate the possibility of 25 Gb/s operation of the developed VCSELs within the operation temperature range of 20–85°C. After 3000 h of the reliability study at 5 mA pump current and 95°C the change less than 5% in the output optical power and 10% of the threshold current with ageing time was observed.