

Влияние оптических потерь на динамические характеристики линейных матричных излучателей на основе вертикально-излучающих лазеров ближнего инфракрасного диапазона

© 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^{*}

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[•] ООО „Коннектор Оптикс“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 ноября 2012 г. Принята к печати 12 ноября 2012 г.)

Исследовано влияние уровня внутренних и внешних оптических потерь на динамические характеристики вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм. Показано, что увеличение внутренних потерь ведет к падению быстродействия лазера и преобладанию тепловых эффектов, тогда как уменьшение потерь на вывод излучения ведет к повышению быстродействия лазера и доминированию демпфирования эффективной частоты модуляции. Созданы и исследованы линейные матричные излучатели формата 1×4 на основе быстродействующих ВИЛ с индивидуальной адресацией элементов. Индивидуальные лазерные излучатели с диаметром токовой апертуры 5–7 мкм демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре в диапазоне 850 нм с пороговыми токами не более 0.5 мА, дифференциальной эффективностью не менее 0.6 Вт/А, полосой модуляции до 20 ГГц и MCEF-фактором $\sim 10 \text{ ГГц/мА}^{1/2}$.

1. Введение

В настоящее время вертикально излучающие лазеры (ВИЛ) ближнего инфракрасного (ИК) диапазона находят все более широкое применение в оптоволоконных системах связи на короткие расстояния (до 300 м) и высокопроизводительных компьютерных системах [1]. Однако гигантский рост суммарного трафика (удвоение каждый год) и производительности современных CMOS процессоров (удвоение каждые 2 года) требует дальнейшего повышения пропускной способности оптических каналов внутри- и межсистемного информационного обмена (устройства ввода/вывода). Наиболее перспективное решение связано с увеличением скорости приемопередающих модулей и применением параллельных шин передачи данных. В последние годы были предложены различные способы повышения быстродействия ВИЛ в режиме прямой токовой модуляции начиная от уменьшения паразитной емкости лазера и заканчивая увеличением дифференциального усиления активной области [2–6,7], что в конечном счете позволило достичь скоростей передачи данных более 35 Гбит/с на 1 канал [7–10]. Дальнейшее развитие оптических межсоединений связано с апробацией предложенных подходов для разработки технологии быстродействующих линейных матричных излучателей с индивидуальной адресацией отдельных ВИЛ.

В данной работе исследовано влияние внутренних и внешних оптических потерь на статические и динамические характеристики InAlGaAs ВИЛ спектрального диапазона 850 нм, а также показана важность минимизации порогового тока для обеспечения высокого быстродействия индивидуальных излучателей, что в конечном счете позволило реализовать быстродействующие линейные матричные излучатели на основе ВИЛ.

2. Конструкция

На рис. 1 представлено схематическое изображение конструкции InAlGaAs ВИЛ спектрального диапазона 850 нм. Эпитаксиальная структура 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 AlGaAs со сложным профилем состава по содержанию Al; 1λ -микрорезонатора с напряженной квантово-размерной InGaAs активной областью в широкозонной матрице AlGaAs для подавления термической эмиссии носителей заряда; нижнего $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ РБО n -типа и скрытого контактного слоя n -GaAs, примыкающего к нелегированной подложке GaAs. В качестве легирующих примесей p - и n -типа использовались углерод и кремний соответственно. Модулированный профиль легирования и градиентные интерфейсы обеспечивают малые значения последовательного сопротивления и падения напряжения на РБО при сохранении низких

¶ E-mail: blokh@gmail.ioffe.ru

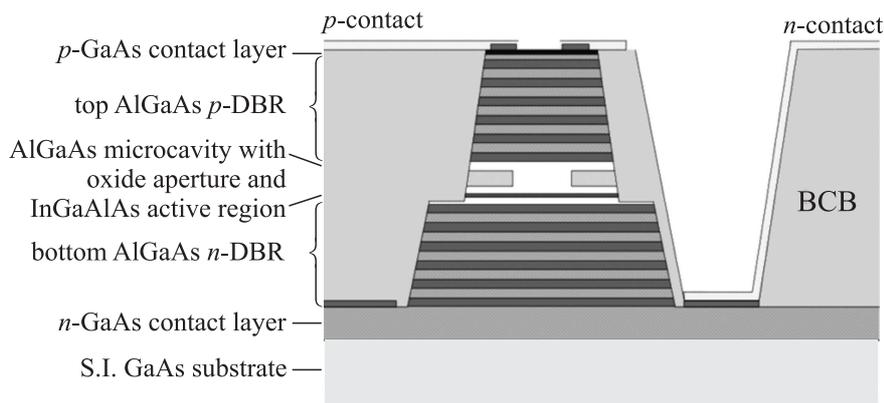


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение конструкции индивидуальной структуры вертикально излучающего лазера диапазона 850 нм с легированными полупроводниковыми РБО.

внутренних оптических потерь. Для снижения паразитной емкости ВИЛ использовался метод эффективного увеличения толщины оксидной апертуры [4,7]. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения резонансной длины волны 855 нм.

Для создания линейных массивов излучателей с индивидуально-адресуемыми ВИЛ в геометрии 1×4 , 1×8 , 1×12 , характерной для активных оптических кабелей (АОК) стандартов Infiniband, Fiber Channel (FC) и др., конструкция излучателя и топология контактных площадок были выбраны так, чтобы обеспечить плотное расположение индивидуальных излучателей в ряд с шагом 250 мкм. С целью уменьшения эффекта саморазогрева лазера использовалась двойная мезаструктура. Использование планаризации обеспечивает размещение анодных и катодных контактных площадок на одном уровне. Основные этапы технологического процесса изготовления быстродействующих ВИЛ с легированными зеркалами включают: нанесение слоев металлизации Ti/Pt/Au для *p*-контакта, травление первой мезы до нижнего РБО, травление второй мезы до скрытого контактного слоя *n*-типа, нанесение слоев металлизации AuGe/Ni/Au для *n*-контакта, селективное окисление апертурного слоя для ограничения области протекания тока в латеральном направлении, изоляция отдельных лазеров за счет травления третьей мезы до полуизолирующей подложки, планаризация прибора диэлектриком с низкой диэлектрической проницаемостью (bisbenzocyclobutene, BCB) и формирование металлизации контактных площадок в высокочастотной геометрии (земля-сигнал) методом гальванического осаждения.

3. Результаты и обсуждение

Высокое быстродействие ВИЛ требует не только обеспечения высокого уровня дифференциального усиления активной области и минимизации паразитной емкости лазеров, но и уменьшения модового объема и повышения плотности фотонов в резонаторе за счет умень-

шения размера токовой апертуры [7,11,12]. Учитывая проблемы, присущие традиционным одномодовым ВИЛ, для достижения быстродействия на уровне 25 Гбит/с оптимальным диапазоном токовых апертур для ВИЛ в предложенной конструкции является 5–7 мкм [13,14].

Важным моментом при создании быстродействующих матричных излучателей является анализ влияния разброса статических характеристик ВИЛ в пределах массива на динамические свойства индивидуальных лазеров. Высокая чувствительность ВИЛ к уровню внутренних оптических потерь и потерь на вывод излучения (при фиксированном размере токовой апертуры) позволяют выделить два механизма разброса параметров ВИЛ: наличие дефектов (ростовые дефекты/дислокации; дефекты, возникшие в процессе изготовления прибора) и нежелательная модификация поверхности выводного РБО из-за особенностей планарной технологии изготовления высокоскоростных ВИЛ (например, присутствие остаточного фоторезиста/диэлектрика на поверхности излучающей зоны, разброс толщин защитных диэлектрических слоев).

На рис. 2 представлены зависимости выходной оптической мощности от тока накачки одиночных лазеров с идентичным размером апертуры, но различным уровнем внутренних и внешних оптических потерь. Прибор ВИЛ № 1 демонстрирует лазерную генерацию с пороговым током 0.95 мА и дифференциальной эффективностью ~ 0.64 Вт/А. Увеличение уровня внутренних оптических потерь (из-за ростовых/постростовых дефектов) ведет к 2-кратному росту порогового тока при незначительном изменении дифференциальной эффективности (ВИЛ № 2). При этом уменьшение потерь на вывод излучения (за счет модификации поверхности выводного РБО) ведет к 2-кратному падению порогового тока и уменьшению дифференциальной эффективности до 0.47 Вт/А (ВИЛ № 3). Такой характер поведения ВИЛ свидетельствует о доминировании потерь на вывод.

Для исследования динамических характеристик ВИЛ использовался метод малосигнальной частотной моду-

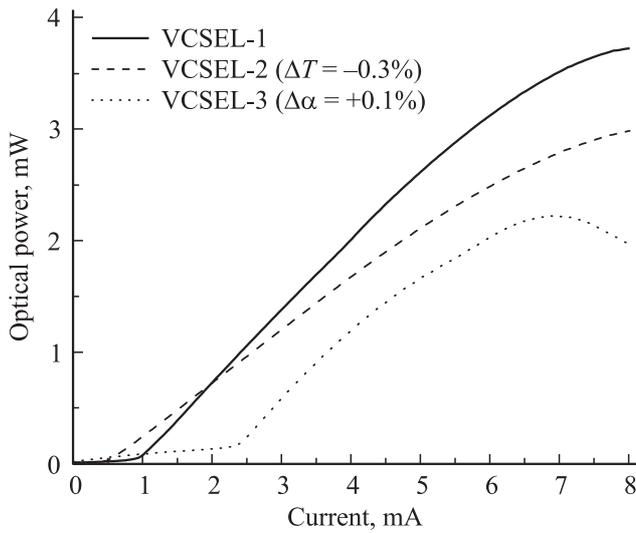


Рис. 2. Зависимости выходной оптической мощности от тока накачки ВИЛ с различным уровнем внутренних оптических потерь и потерь на вывод излучения, измеренные при 25°C. VCSEL — vertical cavity surface emitting laser.

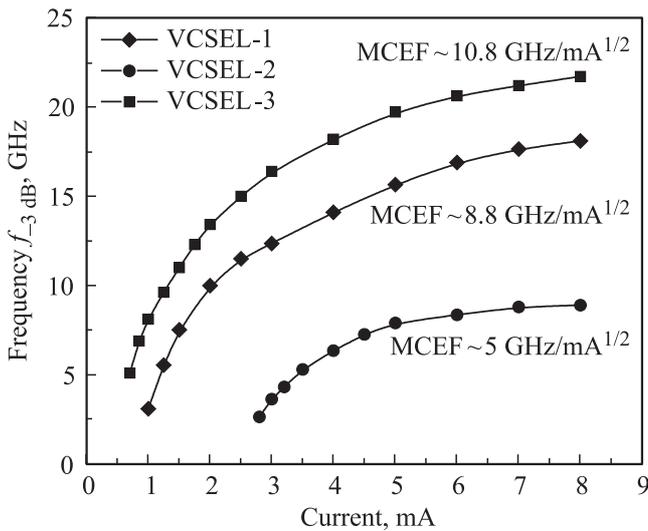


Рис. 3. Значения ширины полосы пропускания f_{-3dB} как функции тока накачки для ВИЛ с различным уровнем внутренних оптических потерь и потерь на вывод излучения, измеренные при 25°C.

ляции — анализ частотного отклика непосредственно активной среды на синусоидальную модуляцию тока накачки с некоторой частотой при постоянном токе смещения. Все измерения проводились в частотном диапазоне от 50 МГц до 25 ГГц. Затем экстраполяцией частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ сигнала (параметр S_{11}) с использованием эквивалентной электрической схемы ВИЛ определялась паразитная частота отсечки фильтра низких частот f_p , образованного сопротивлениями и емкостями реального прибора. Максимальная частота эффективной модуляции (так называ-

емая полоса модуляции) f_{-3dB} , резонансная частота f_r и коэффициент затухания γ были получены путем аппроксимации экспериментальной амплитудно-частотной характеристики (параметр S_{21}) в рамках стандартной модели частотного отклика [7,15], где передаточная функция H_i определяется следующим соотношением:

$$H_i(f) = \text{const} \frac{f_r^3}{[f_r^2 - f^2 + j\gamma(f/2\pi)][1 + j(f/f_p)]}$$

Согласно результатам малосигнального частотного анализа (см. рис. 3), максимальная частота эффективной модуляции f_{-3dB} для лазера ВИЛ № 1 достигает величины 18 ГГц со скоростью нарастания частоты f_{-3dB} с током (так называемый МСЕФ-фактор) $\sim 8.8 \text{ ГГц}/\text{mA}^{1/2}$, что, согласно эмпирической зависимости скорости передачи данных от полосы модуляции лазера в режиме прямой модуляции $F \approx 1.55 f_{-3dB}$ [16], обеспечит функционирование лазера на скоростях не менее 28 Гбит/с. С одной стороны, падение потерь на вывод излучения (ВИЛ № 2) ведет к увеличению полосы модуляции до 21.7 ГГц и увеличению МСЕФ-фактора на 20%, что позволит достичь скоростей обмена данными более 33 Гбит/с. С другой стороны, рост уровня внутренних оптических потерь (ВИЛ № 3) приводит к более резкому падению частоты f_{-3dB} до ~ 9 ГГц и уменьшению МСЕФ-фактора на 35% и, как следствие, к падению скоростей передачи данными до 10–13 Гбит/с.

В общем случае на быстродействие лазера влияют три фактора: демпфирование, тепловые эффекты и паразитная частота отсечки [15]. По результатам измерения коэффициента отражения СВЧ сигнала, паразитные элементы конструкции лазера слабо влияют на высокочастотные свойства ВИЛ, поскольку паразитная частота отсечки для всех приборов превышает 20 ГГц. Максимальная частота эффективной модуляции зависит от резонансной частоты, коэффициента затухания и соотношения между ними (так называемого K -фактора) [15]. Чтобы установить, какой механизм лимитирует быстродействие того или иного ВИЛ, были построены отношения частоты эффективной модуляции к резонансной частоте в зависимости от тока накачки (рис. 4, а). Так, для лазера ВИЛ № 1 данное отношение слабо зависит от тока и лежит в диапазоне 1.4–1.5, что близко к идеальному значению 1.55, когда максимальная частота модуляции ограничена тепловыми эффектами (т.е. определяется лишь частотой релаксационных колебаний) [15]. В случае лазера с меньшими потерями на выход излучения (ВИЛ № 3) ситуация кардинально противоположная — отношение полосы модуляции к резонансной частоте сильно зависит от тока накачки и падает до уровня 1.3, что свидетельствует о преобладании демпфирования и хорошо коррелирует с высоким уровнем коэффициента затухания (рис. 4, б). Следует отметить, что уменьшение потерь на вывод излучения ведет к увеличению времени жизни фотонов в резонаторе и 3-кратному росту K -фактора. Лазер с большими внутренними оптическими потерями (ВИЛ № 2)

представляет промежуточный вариант между лазерами ВИЛ № 1 и ВИЛ № 3 — при относительно небольшом уровне тока накачки отношение полосы модуляции к резонансной частоте превышает величину 1.4, но при более высоком токе накачки наблюдается его падение до величины 1.3, что обусловлено сильным эффектом саморазогрева лазера. В самом деле, большие внутренние потери приводят к росту порогового тока и к необходимости больших токов накачки для достижения заданной плотности фотонов (т.е. требуемой резонансной частоты), что ведет к сильному разогреву прибора, преждевременному падению дифференциального усиления и росту коэффициента затухания.

Таким образом, для достижения высокого быстродействия ВИЛ наиболее критичным моментом является минимизация внутренних оптических потерь. В частно-

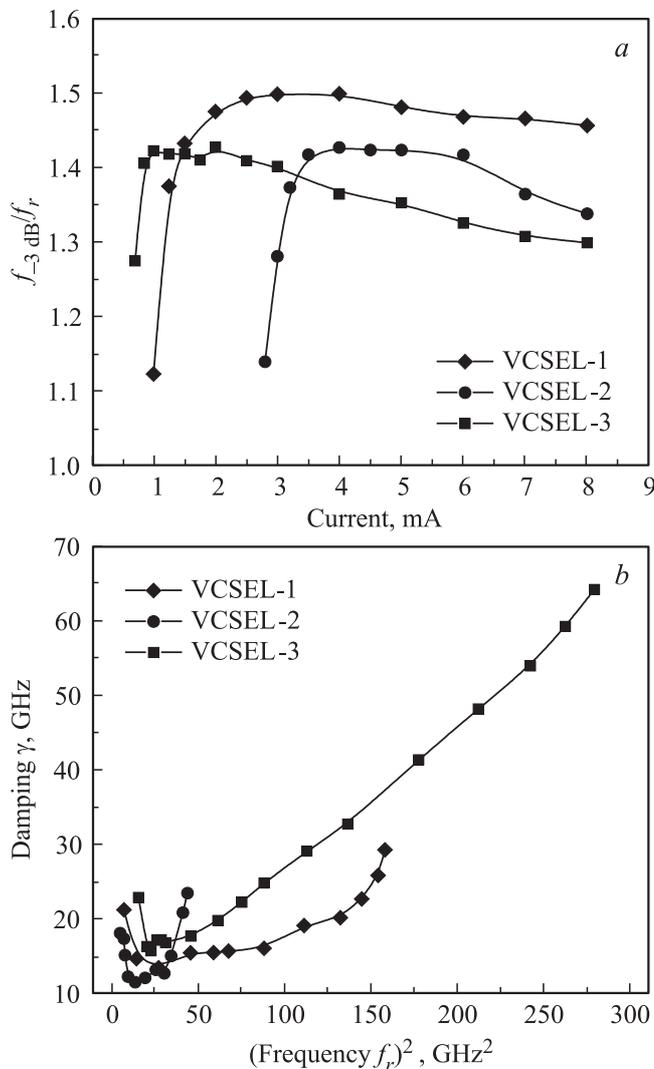


Рис. 4. ВИЛ с различным уровнем внутренних оптических потерь и потерь на вывод излучения: *a* — зависимость отношения ширины полосы пропускания $f_{-3\text{dB}}$ к резонансной частоте f_r ; *b* — коэффициент затухания как функция квадрата резонансной частоты f_r .

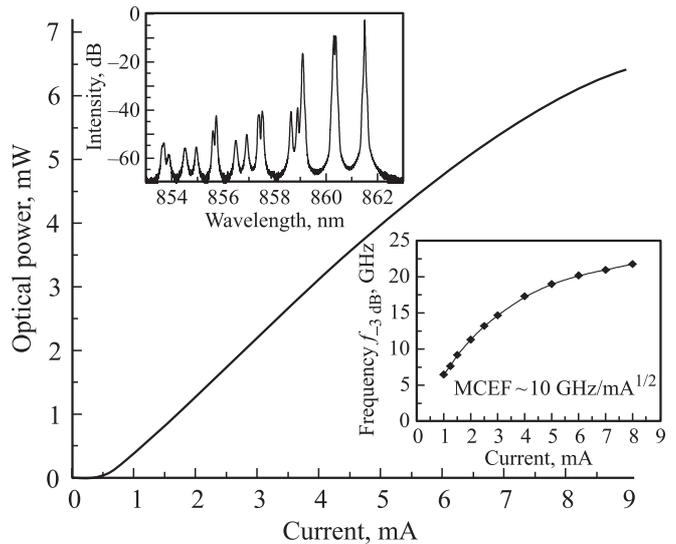


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика индивидуального ВИЛ типичного матричного излучателя. На вставках приведены типичный спектр лазерной генерации при токе 5 мА и зависимость ширины полосы модуляции от рабочего тока.

сти, для разработки линейных матричных излучателей, пригодных для работы на скоростях обмена данными ~ 25 Гбит/с, необходимо обеспечить пороговые токи менее 1 мА при размере токовых апертур 5–7 мкм. С целью уменьшения влияния модификации поверхности РБО и постростовых дефектов на характеристики лазеров была проведена дополнительная оптимизация эпитаксиальной структуры ВИЛ (увеличено количество пар в выводном зеркале, изменен профиль легирования и т.д.) и внесены корректировки в технологический маршрут (дополнительные точки контроля и операции), в результате были реализованы линейные матричные излучатели формата 1×4 на основе ВИЛ с индивидуальной адресацией. На рис. 5 представлены типичные статические и динамические характеристики индивидуальных лазеров матричных излучателей. Приборы демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами менее 0.5 мА и дифференциальной эффективностью более 0.6 Вт/А с разбросом параметров менее $\pm 1-3\%$ в пределах матричного излучателя (что на уровне погрешности измерений и анализа данных). Проведенный малосигнальный частотный анализ индивидуальных ВИЛ показал среднюю полосу модуляции до 20 ГГц с МСЕФ-фактором $\sim 10 \text{ ГГц}/\text{mA}^{1/2}$, что потенциально позволит достичь быстродействия на уровне 30 Гбит/с и более.

4. Заключение

В работе проведены исследования влияния оптических потерь на статические и динамические характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм. С одной стороны, увеличение уровня

внутренних оптических потерь ведет не только к росту порогового тока при незначительном падении дифференциальной эффективности, но и к существенному падению ширины полосы модуляции и МСЕФ-фактора лазера, вследствие меньшего усиления активной области за счет доминирования тепловых эффектов. С другой стороны, уменьшение потерь на вывод излучения ведет не только к значительному падению дифференциальной эффективности и порогового тока, но и к росту полосы модуляции и МСЕФ-фактора лазера, несмотря на демпфирование эффективной частоты модуляции из-за роста времени жизни фотонов в резонаторе. Таким образом, для повышения быстродействия и уменьшения влияния разброса статических характеристик лазеров на динамические параметры ВИЛ необходимо минимизировать пороговый ток.

В результате были созданы линейные матричные излучатели формата 1×4 на основе эффективных ВИЛ спектрального диапазона 850 нм (токовая апертура 5–7 мкм), обеспечивающих максимальную эффективную частоту модуляции до 20 ГГц с МСЕФ-фактором ~ 10 ГГц/мА^{1/2}.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Леденцову и Дж. Лотту за помощь в выполнении исследований и плодотворные дискуссии, способствовавшие написанию этой статьи.

Работа выполнялась при частичной поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, Российского фонда фундаментальных исследований, программы № 24 президиума РАН, Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] D. Collins, N. Li, D. Kuchta, F. Doany, C. Schow, C. Helms, L. Yang. Proc. SPIE, 6908–09 (2008).
- [2] A. Al-Omari, K.L. Lear. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. **12**, 1151 (2005).
- [3] Y.C. Chang, C.S. Wang, L.A. Johansson, L.A. Coldren. Electron. Lett., **42**, 1281 (2006).
- [4] 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).
- [5] F. Koyama. Proc. SPIE, **5595**, 194 (2004).
- [6] S.B. Healy, E.P. O'Reilly, J.S. Gustavsson, P. Westbergh, Å. Haglund, A. Larsson, A. Joel. IEEE J. Quant. Electron., **46**, 504 (2010).
- [7] Y.-C. Chang, L.A. Coldren. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **15**, 704 (2009).
- [8] S.A. Blokhin, J.A. Lott, A. Mutig, G. Fiol, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, V.A. Shchukin, D. Bimberg. Electron. Lett., **45**, 501 (2009).
- [9] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, B. Koegel, E. Haglund, A. Larsson, A. Mutig, A. Nadtochiy, D. Bimberg, A. Joel. Electron. Lett., **46**, 1014 (2009).
- [10] W. Hofmann, P. Moser, P. Wolf, G. Larisch, W. Unrau, D. Bimberg. Proc. SPIE, **8276**, 827 605 (2012).
- [11] 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).
- [12] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, E. Haglund, M. Skoeld, A. Joel, A. Larsson. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **15**, 694 (2009).
- [13] S.A. Blokhin, A. Mutig, A.M. Nadtochiy, G. Fiol, J.A. Lott, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Proc. 18th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“ (St. Petersburg, Russia, June 21–26, 2010).
- [14] S.A. Blokhin, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, L.Ya. Karachinsky, A.G. Kuzmenkov, I.I. Novikov, N.A. Maleev, G. Fiol, D. Bimberg. Proc. SPIE **8308**, 830 819 (2011).
- [15] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (N.Y., Wiley, 1995).
- [16] G.P. Agrawal. *Fiber optic communication systems* (John Wiley&Sons Inc., 1997).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of optical losses on dynamic characteristics of linear arrays of near infrared vertical cavity surface emitting lasers

S.A. Blokhin^{*+•}, M.A. Bobrov^{*•}, N.A. Maleev^{*•},
A.G. Kuzmenkov^{*•}, V.V. Stetsenko[•], M.M. Pavlov^{*•},
L.Ya. Karachinsky^{*+•}, I.I. Novikov^{*+•},
Yu.M. Zadiranov^{*}, A.Yu. Egorov[•], V.M. Ustinov^{*}

^{*} Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ St. Petersburg Academic University —
Nanotechnology Research and Education Centre
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
[•] Connector Optics LLC,
194292 St. Petersburg, Russia

Abstract Influence of internal and external optical losses value on dynamic characteristics of 850 nm vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) have been studied. It is shown that increasing of internal losses leads to the corresponding decreasing of high-speed performance of the laser and thermal effects predominance. Decreasing of external optical losses leads to better high-speed performance of the laser and damping predominance. 1×4 linear VCSEL arrays have been created and studied. Single VCSEL with the oxide aperture size 5–7 μm show lasing under continues wave pumping at 850 nm at room temperature with the threshold current of 0.5 mA, differential efficiency not less than 0.6 W/A, modulation bandwidth of 20 GHz and MCEF-factor ~ 10 GHz/mA^{1/2}.