

05

Ширина линии излучения одномодовых вертикально излучающих лазеров спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$, реализованных с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии и технологии спекания пластин

© Я.Н. Ковач^{1,2}, С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, А.А. Блохин¹, Н.А. Малеев¹, А.Г. Кузьменков¹,
А.В. Бабичев², И.И. Новиков², Л.Я. Карачинский², Е.С. Колодезный², К.О. Воропаев³,
А.Ю. Егоров⁴, В.М. Устинов¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

³ АО „ОКБ-Планета“,
173000 Великий Новгород, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

В окончательной редакции 21.09.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Проведено исследование статических и спектральных характеристик вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ с активной областью на основе напряженных квантовых ям InGaAs/InGaAlAs. Приборы продемонстрировали эффективную лазерную генерацию через фундаментальную моду с коэффициентом подавления боковой моды более 25 dB. Выходное излучение лазеров линейно-поляризовано вдоль длинной оси мезы выращенного туннельного перехода, при этом коэффициент подавления ортогонально-поляризованной моды превышает 20 dB. Исследования ширины линии излучения лазеров показали, что по мере увеличения выходной оптической мощности до $\sim 1\ \text{mW}$ (рабочий ток более 5 mA) спектральная линия излучения заужается до $\sim 30\text{--}35\ \text{MHz}$, а соответствующий фактор уширения спектральной линии лазера лежит в диапазоне 3.3–4.4 в зависимости от величины фактора инверсной заселенности. При выходной оптической мощности более 2.5 mW наблюдается уширение спектральной линии, обусловленное резким увеличением внутренней температуры лазера.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, поляризация, ширина линии, α -фактор.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57008.5135-23

За последнее время значительно усилился интерес к разработкам и созданию длинноволновых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ), которые могут быть применены не только для интегральной фотоники и создания нового поколения оптических межсоединений для систем хранения-обработки данных, но и для создания различных систем распознавания объектов и газовых сенсоров [1]. Одним из перспективных направлений создания ВИЛ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ является комбинация оптического микрорезонатора, содержащего активную область на основе системы материалов InAlGaAs/InP, с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), обладающими высокой отражательной способностью и теплопроводностью [2]. В рамках такого решения можно выделить два подхода, один основан на гибридной интеграции с гибридными металл-диэлектрическими РБО с высоким контрастом показателя преломления слоев (далее ГИ-ВИЛ) [3], а второй — на межмолекулярном соединении с полупро-

водниковыми AlGaAs/GaAs РБО с помощью технологии спекания пластин (далее СП-ВИЛ) [4,5]. Недавно нами была показана принципиальная возможность создания эффективных СП-ВИЛ на основе тонких напряженных InGaAs/InAlGaAs квантовых ям (КЯ), используя молекулярно-пучковую эпитаксию (МПЭ) [6]. Несмотря на то, что ширина линии излучения лазера является важным параметром для проектирования и создания волоконных систем передачи данных или газовых сенсоров, можно выделить лишь несколько работ, посвященных этой проблематике [7,8]. В настоящей работе приведены результаты исследований ширины линии излучения одномодовых СП-ВИЛ на основе InGaAs/InAlGaAs КЯ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$.

Конструкция исследованных СП-ВИЛ представляет собой вертикальный оптический микрорезонатор, заключенный между двумя AlGaAs/GaAs РБО, в котором инжекция носителей заряда происходит через внутривибраторные n-InP контакты и композитный

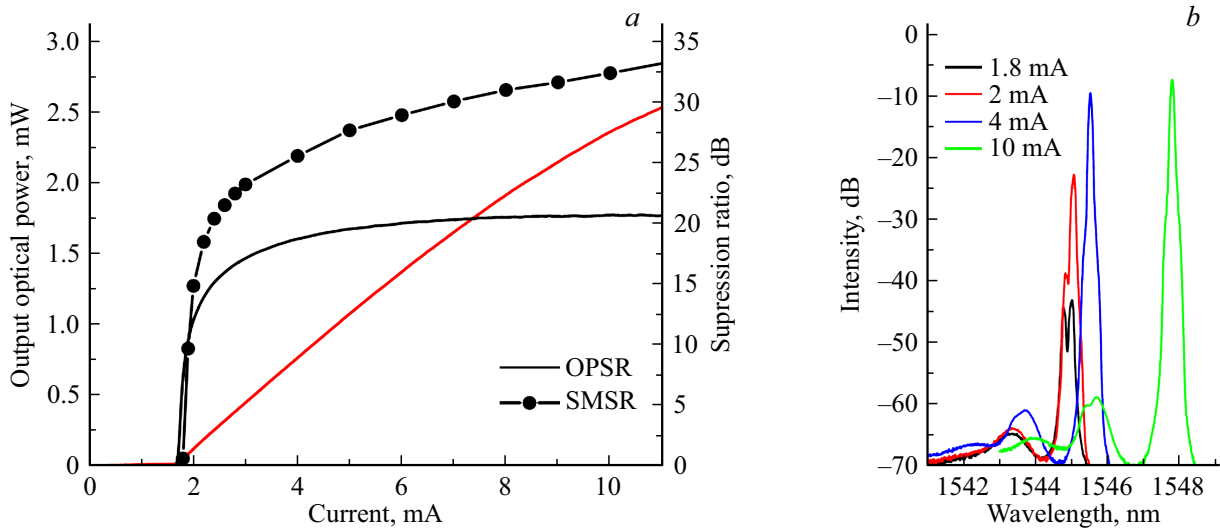


Рис. 1. СП-ВИЛ: (а) зависимости выходной оптической мощности, коэффициентов подавления ортогональной поляризации OPSR и боковой моды SMSR от тока накачки; (б) оптические спектры излучения лазера при различных токах накачки.

$n^+ - \text{InGaAs}/p^+ - \text{InGaAs}/p^+ - \text{InAlGaAs}$ туннельный переход (ТП). Активная область состоит из десяти напряженных $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ КЯ, разделенных решеточно-согласованными барьерами $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.31}\text{As}$. Токовое и оптическое ограничения реализованы в рамках концепции зарощенного туннельного перехода (ЗТП), путем формирования в слоях InGaAs ТП мез диаметром $6 \mu\text{m}$ с последующим зарощиванием слоем $n\text{-InP}$ (формируются мезы ЗТП эллиптической формы [9]). Более детальное описание конструкции и особенности технологии изготовления СП-ВИЛ приведены в работе [6].

Измеренные в непрерывном режиме работы ватт-амперные и спектральные характеристики СП-ВИЛ приведены на рис. 1. Исследуемый СП-ВИЛ продемонстрировал лазерную генерацию вблизи $1.55 \mu\text{m}$ с пороговым током 1.7mA и максимальной дифференциальной эффективностью более 0.32W/A . При рабочих токах накачки выше 10mA начинает проявляться эффект саморазогрева, ограничивающий максимальную оптическую мощность. Исследование поляризационных характеристик показало доминирование направления поляризации вдоль длинной оси мезы ЗТП во всем диапазоне токов накачки с коэффициентом подавления более 20dB . Выполненный анализ спектров лазерной генерации СП-ВИЛ выявил преобладание длинноволновой моды с коэффициентом подавления боковой моды более 20dB .

Как известно, ширина спектральной линии излучения полупроводниковых лазеров $\Delta\nu_L$ описывается модифицированным уравнением Шавлова-Таунса-Генри [10]:

$$\Delta\nu_L = \Delta\nu_0 + \frac{en_{sp}\eta_{SE}v_g^2(T_m + A_{int})^2}{4\pi P\eta_{int}}(1 + \alpha^2),$$

где $\Delta\nu_0$ — остаточная ширина линии излучения, n_{sp} — фактор инверсной заселенности, v_g — групповая ско-

рость, $h\nu$ — заряд электрона, η_{SE} — дифференциальная эффективность, η_{int} — эффективность токовой инжекции, T_m — потери на вывод, A_{int} — внутренние оптические потери, P — выходная оптическая мощность, α — фактор уширения спектральной линии.

На рис. 2 приведены результаты исследования ширины линии излучения СП-ВИЛ при комнатной температуре с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо Thorlabs SA30-144. Следует отметить, что в качестве источника питания лазера использовался химический источник питания для предотвращения нежелательного уширения линии излучения из-за шумов источника питания, а для подавления эффекта оптической обратной связи перед интерферометром был установлен оптический изолятор Thorlabs IO-2.5-1550-VLP. С ростом выходной оптической мощности спектральная линия излучения СП-ВИЛ сужается со скоростью $\sim 7.8 \text{MHz/mW}$ в соответствии с теорией Шавлова-Таунса-Генри (участок А). Однако при мощности более 1mW (рабочий ток более 5mA) наблюдается anomalous поведение: насыщение, а при мощностях более 2.5mW (рабочих токах более 10mA) уширение линии излучения с ростом выходной оптической мощности СП-ВИЛ (участок В). В результате минимальное значение ширины спектральной линии лежит в диапазоне $30\text{--}35 \text{MHz}$.

Следует отметить, что anomalous поведение ширины линии излучения ранее наблюдали как для ВИЛ ближнего ИК диапазона [11], так и для длинноволновых ГИ-ВИЛ [4]. Более того, с ростом внешней температуры данный эффект начинает проявляться при меньшей выходной мощности [7]. В этой связи нами была проведена оценка внутренней температуры ВИЛ, используя данные о температурном сдвиге длины волны $\partial\lambda/T \sim 0.09 \text{nm/K}$ и сдвиге длины волны с рассеиваемой электрической мощностью $\partial\lambda/P_{diss} \sim 0.18 \text{nm/mW}$. Как

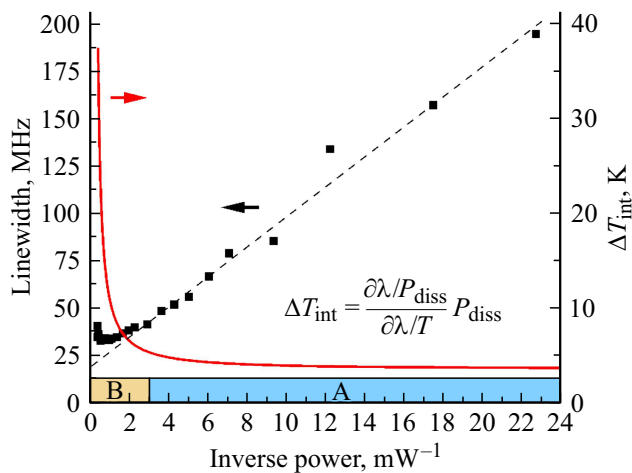


Рис. 2. Зависимость ширины линии излучения и внутренней температуры от обратной величины выходной оптической мощности. Штриховой линией обозначена аппроксимация линейного участка данной зависимости.

показано на рис. 2, на участке А можно пренебречь изменением внутренней температуры лазера и, следовательно, определить параметры $\Delta\nu_0$ и α . Внутренние оптические потери и эффективности инжекции носителей были определены в рамках метода анализа дифференциальной эффективности в зависимости от потерь на вывод по аналогии с работами [12,13]. В случае ВИЛ сложно адекватно определить фактор инверсной заселенности, поэтому α -фактор можно оценить в диапазоне ~ 3.3 – 4.4 при вариации величины n_{sp} от 2 до 1.2 [10,14]. Остаточная ширина линии излучения достигает ~ 20 MHz и, по-видимому, обусловлена конкуренцией мод (в данном случае мод с ортогональной поляризацией) или фликкер-шумом (флуктуация плотности носителей заряда) и требует дальнейших исследований [8]. На участке В внутренняя температура СП-ВИЛ начинает резко расти по мере увеличения выходной мощности (саморазогрев лазера), что ведет к падению дифференциального усиления [8] и, в совокупности с эффектом насыщения усиления с током, к росту α -фактора [15].

В целом полученные значения α -фактора и минимальной ширины спектральной линии излучения коррелируют с данными для ГИ-ВИЛ на основе InAlGaAs КЯ [4], монолитного ВИЛ на основе InAlGaAs КЯ [16] и СП-ВИЛ на основе InGaAsP КЯ [17].

Проведен комплексный анализ характеристик СП-ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ на основе напряженных InGaAs/InAlGaAs КЯ. Приборы с диаметром мезы $6 \mu\text{m}$ демонстрируют одномодовый режим генерации с фиксированным направлением поляризации излучения. По мере увеличения выходной оптической мощности наблюдается обратно-пропорциональное уменьшение ширины линии лазерного излучения. Однако рост внутренней

температуры лазера вследствие эффекта саморазогрева ограничивает минимальную ширину линии на уровне ~ 30 – 35 MHz, а при повышенных рабочих токах более 10 mA ведет к резкому уширению линии. В диапазоне рабочих токов, когда можно пренебречь эффектом саморазогрева, выполнены оценки α -фактора.

Благодарность

Работа авторов из Университета ИТМО в части исследований спектральных характеристик выполнена при поддержке федерального проекта „Передовые инженерные школы“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B.D. Padullaparthi, J.A. Tatum, K. Iga. *VCSEL Industry: Communication and Sensing* (Wiley-IEEE Press, 2021), p. 352.
- [2] A. Babichev, S. Blokhin, E. Kolodeznyi, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Egorov, S.-C. Tian, D. Bimberg. *Photonics*, **10** (3), 268 (2023). DOI: 10.3390/photonics10030268
- [3] S. Spiga, D. Schoke, A. Andrejew, G. Boehm, M.-C. Amann. *J. Light. Technol.*, **35** (15), 3130–3141 (2017). DOI: 10.1109/JLT.2017.2660444
- [4] D. Ellafi, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Suruceanu, Z. Mickovic, A. Caliman, A. Mereuta, E. Kapon. *Opt. Express*, **22** (26), 32180 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.032180
- [5] 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
- [6] 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, D. Bimberg. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **35** (6), 297–300 (2023). DOI: 10.1109/LPT.2023.3241001
- [7] R. Shau, H. Halbritter, F. Riemenschneider, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, M. Maute, P. Meissner, M.-C. Amann. *Electron. Lett.*, **39** (24), 1728 (2003). DOI: 10.1049/el:20031143
- [8] A. Bacou, A. Rissons, J.-C. Mollier, in *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XII*, ed. by C. Lei, J.K.A. Guenter (SPIE, California, 2008), 69080F. DOI: 10.1117/12.763054
- [9] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (John Wiley & Sons, 2012), p. 752.
- [10] S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, Y.M. Zadiranov, E.A. Evropeytshev, A.V. Sakharov, N.N. Ledentsov, L.Y. Karachinsky, A.M. Ospennikov, N.A. Maleev, V.M. Ustinov. *Semiconductors*, **52** (1), 93–99 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618010062
- [11] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Y. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev,

- I.O. Zhumaeva, V.M. Ustinov, A.Y. Egorov, N.N. Ledentsov. *IEEE J. Quantum Electron.*, **58** (2), 1–15 (2022). DOI: 10.1109/JQE.2022.3141418
- [12] S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, E.S. Kolodeznyi, S.S. Rochas, A.V. Babichev, I.I. Novikov, A.G. Gladyshev, L.Y. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Y. Egorov. *Opt. Spectrosc.*, **127** (1), 140–144 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X1907004X
- [13] H. Halbritter, R. Shau, F. Riemenschneider, B. Kögel, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, M. Maute, M.-C. Amann, P. Meissner. *Electron. Lett.*, **40** (20), 1266 (2004). DOI: 10.1049/el:20046457
- [14] P. Perez, A. Valle, I. Noriega, L. Pesquera. *J. Light. Technol.*, **32** (8), 1601–1607 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2308303
- [15] N.M. Margalit, J. Piprek, S. Zhang, D.I. Babic, K. Streubel, R.P. Mirin, J.R. Wesselmann, J.E. Bowers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (2), 359–365 (1997). DOI: 10.1109/2944.605679