

07.3

## Вклад связанных волноводов в сопротивление гетероструктуры мощных торцевых лазеров InGaAs/GaAs/AlGaAs

© А.С. Паюсов<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, А.Е. Жуков<sup>3</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: plusov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 20 октября 2023 г.

Принято к публикации 22 октября 2023 г.

Представлены результаты моделирования зонных диаграмм и вольт-амперных характеристик полосковых лазеров, в которых для подавления паразитных оптических мод расширенного волновода используются два дополнительных волновода, расположенные с  $n$ -стороны гетероструктуры. Показано, что в рассмотренной конструкции возможно реализовать предельное смещение активной области к  $p$ -эмиттеру при сохранении лазерной генерации на фундаментальной моде. Вклад дополнительных волноводов в удельное последовательное сопротивление лазерной гетероструктуры составляет  $1.9 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , что не превышает 5% от общего удельного последовательного сопротивления типичного мощного лазера InGaAs/GaAs/AlGaAs.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, оптический волновод, последовательное электрическое сопротивление.

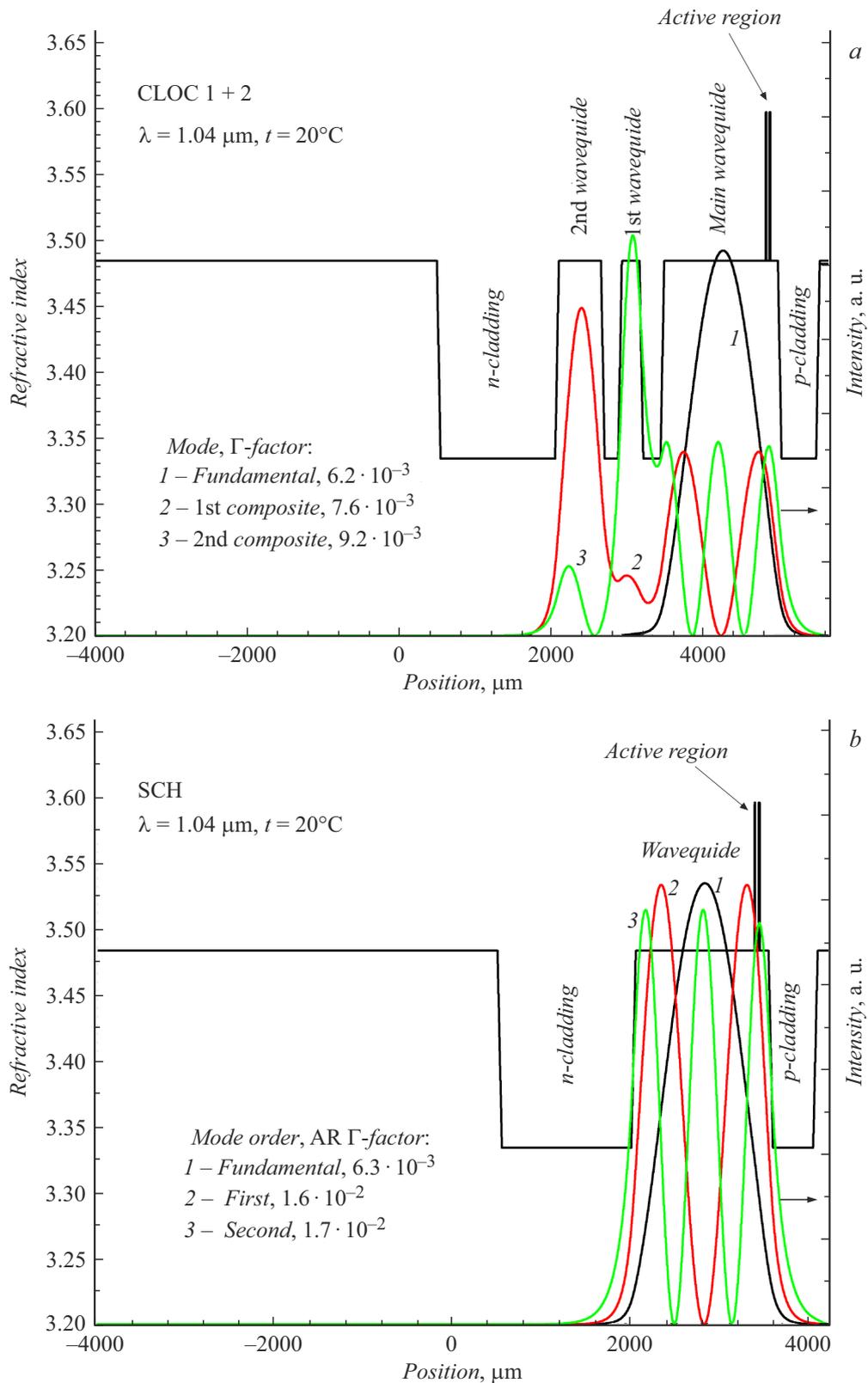
DOI: 10.61011/PJTF.2024.02.56978.19734

В последние годы за счет совершенствования конструкций лазерных гетероструктур был достигнут значительный прогресс в увеличении эффективности преобразования электрической мощности в оптическую (КПД) полупроводниковых торцевых лазеров InGaAs/GaAs/AlGaAs с широким контактом [1]. Для высокого КПД важно обеспечить низкие внутренние оптические потери ( $\alpha_i$ ) и минимизировать падение напряжения на лазере. Напряжение, падающее непосредственно на  $p$ - $n$ -переходе, при токах накачки значительно выше порогового перестает меняться, и прирост напряжения с током определяется последовательным сопротивлением лазера ( $R_s$ ), которое включает в себя сопротивления контактов и материалов гетероструктуры, а также сопротивление гетеропереходов. Последнее может составлять до 75% от общего сопротивления гетероструктуры [2].

Одним из подходов, обеспечивающих работу лазера на фундаментальной вертикальной моде расширенного волновода с низкими внутренними оптическими потерями, является резонансное подавление паразитных мод за счет дополнительных волноводов в структуре CLOC (coupled large optical cavity) [3]. Поскольку фундаментальная мода сильнее других локализована в основном волноводе, небольшие изменения показателей преломления при работе лазера при высокой накачке не ухудшают диаграмму направленности. Чтобы повысить внутренние оптические потери для паразитных мод, а также уменьшить последовательное сопротивление, дополнительные волноводы легируют. CLOC-лазеры с одним дополнительным волноводом со стороны  $n$ -эмиттера и экстремально смещенной к  $p$ -эмиттеру активной обла-

стью (расстояние от гетерограницы волновод–эмиттер около  $0.3 \mu\text{m}$ ) продемонстрировали низкие оптические потери, низкие электрическое и тепловое сопротивления, что позволило увеличить КПД до 57% и получить мощность более 12 W в непрерывном режиме работы, ограниченную катастрофическим разрушением лазерных зеркал [4]. Для подавления нескольких паразитных мод в структуре CLOC используют соответствующее количество дополнительных волноводов [5]. Однако на гетерограницах слоев, формирующих дополнительные волноводы в гетероструктуре CLOC, может возникать нежелательное падение напряжения. Для надежной экспериментальной проверки вклада дополнительных волноводов в  $R_s$  необходимо провести предварительные количественные оценки. Целью настоящей работы является исследование с помощью численного моделирования влияния дополнительных волноводов на сопротивление гетероструктуры мощных CLOC-лазеров.

Расчеты проводились в программе SiLENSe, входящей в пакет моделирования SimuLED Laser Edition (STR/Софт-Импакт) [6]. Для расчетов была разработана гетероструктура InGaAs/GaAs/AlGaAs с двумя дополнительными волноводами, настроенными на подавление первой и второй оптических мод основного волновода (CLOC 1+2, рис. 1,  $a$ ). Оба дополнительных волновода из GaAs расположены с  $n$ -стороны гетероструктуры. Толщина основного волновода из GaAs составляет  $1.55 \mu\text{m}$ , дополнительных —  $0.6$  и  $0.28 \mu\text{m}$ . Эмиттерные слои и  $0.25 \mu\text{m}$  прослойки между волноводами сделаны из  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  со степенью легирования  $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , дополнительные волноводы имеют такой же уровень



**Рис. 1.** Профиль показателя преломления и распределение интенсивности оптических мод для структур CLOC (a) и SCH (b). В легенде указаны  $\Gamma$ -факторы для волноводных мод.

легирования. В расчетах использовались экспериментально измеренные на тестовых образцах значения подвижности для электронов 2000 и 600  $\text{V}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  в GaAs и  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  соответственно. Толщина  $n$ -эмиттера составляет 1.5  $\mu\text{m}$ ,  $p$ -эмиттера — 0.5  $\mu\text{m}$ . Контактный слой  $p$ -GaAs толщиной 0.15  $\mu\text{m}$  легирован до  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Для уменьшения потерь на свободных носителях фундаментальной моды степень легирования в прилегающих к волноводу слоях толщиной 150 nm уменьшена до  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Активная область состоит из двух квантовых ям InGaAs, разделенных 40 nm GaAs, и максимально сдвинута к  $p$ -эмиттеру. Энергия основного перехода обеих квантовых ям соответствует длине волны  $\lambda = 1.04 \mu\text{m}$ . Глубина залегания активной области от поверхности структуры составляет 0.75  $\mu\text{m}$ . Для уменьшения сопротивления гетерограниц используются градиентные по составу слои GaAs– $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  толщиной 50 nm. Чтобы приблизить расчеты к реальным гетероструктурам, на границах легирования задавались линейные градиенты концентрации легирующих примесей. Для примеси  $n$ -типа толщина градиентного слоя составляла 50 nm, для примеси  $p$ -типа — 100 nm. В референсной структуре, представляющей собой лазер с прямоугольным волноводом (separate confinement heterostructure, SCH) (рис. 1, *b*), дополнительные волноводы отсутствуют, а по всем остальным параметрам она аналогична структуре CLOC 1+2.

Из-за сильного смещения активной области фактор оптического ограничения ( $\Gamma$ -фактор) для фундаментальной моды в исследуемой структуре CLOC 1+2 несколько ниже (0.62%), чем для композитных мод (0.76 и 0.92%) (рис. 1, *a*). При этом стабильная работа на фундаментальной вертикальной моде обеспечивается за счет высоких внутренних оптических потерь для первой и второй оптических мод. Используя данные о сечении поглощения и рассчитанные профили оптических мод, мы оценили внутренние потери на поглощение на свободных носителях [7]. Они составили 0.25, 4.6 и 4.7  $\text{cm}^{-1}$  для фундаментальной, первой и второй композитных мод соответственно.

В референсной структуре  $\Gamma$ -фактор для фундаментальной моды имеет практически то же значение (0.63%), что и в CLOC 1+2, поскольку на характер пространственного распределения фундаментальной моды дополнительные волноводы практически не влияют.  $\Gamma$ -факторы в структуре SCH для паразитных мод оказываются примерно в 2 раза больше, чем в CLOC 1+2 (рис. 1, *b*). Это приведет к тому, что лазерная генерация в SCH начнется на первой или второй моде. Однако в расчетах в обоих лазерах учитывалась только фундаментальная мода. Эти данные подчеркивают эффективность применения дополнительных оптически связанных волноводов для подавления генерации мод высоких порядков.

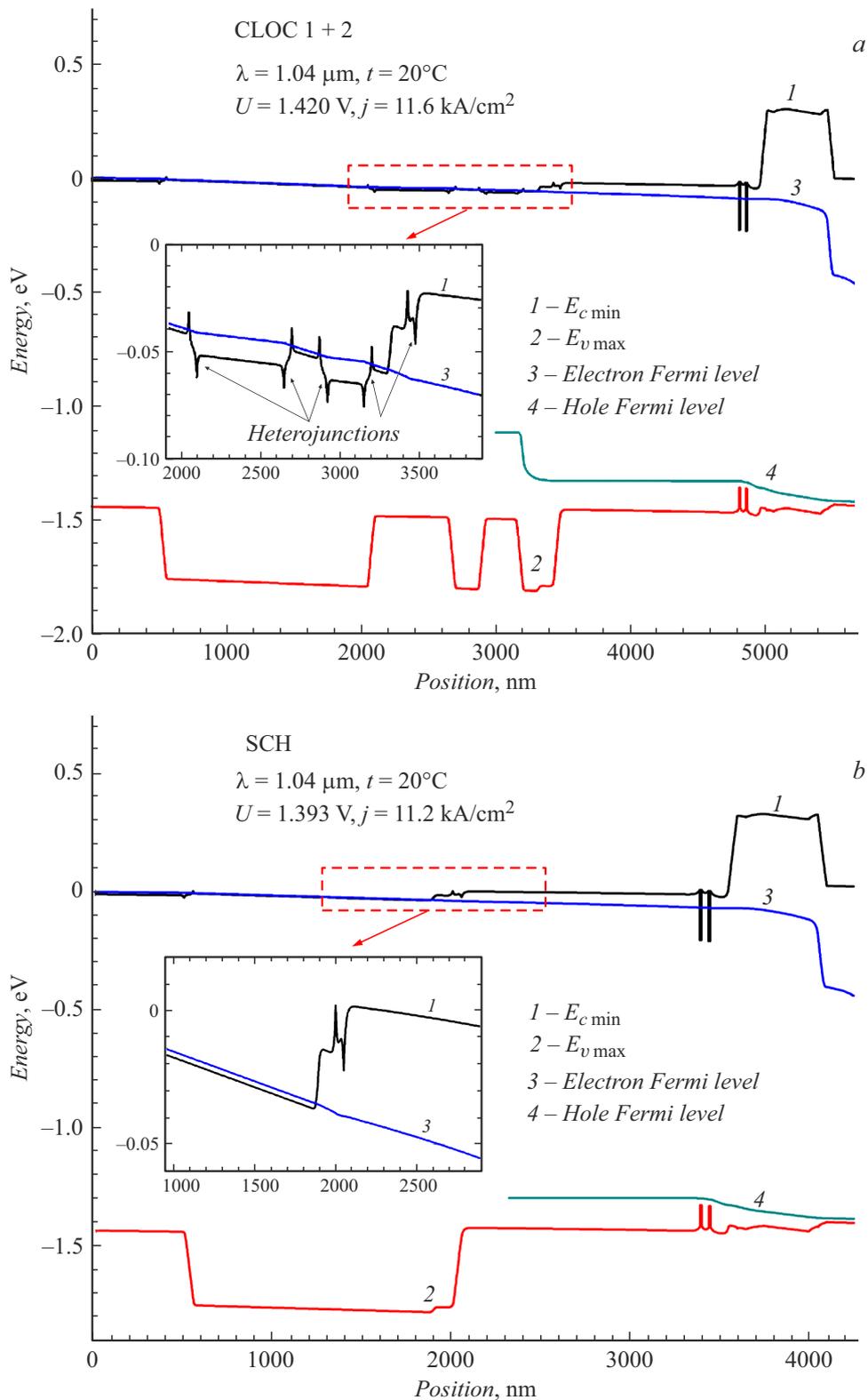
При расчетах вольт-амперной характеристики ширина полоскового контакта была принята равной 100  $\mu\text{m}$ , а длина резонатора — 4 mm. Сопротивления подложки и металлических контактов не учитывались, поскольку

они вносят одинаковый вклад во всех случаях. Температура для всех расчетов составляла 20°C. Плотность порогового тока при работе обоих лазеров на фундаментальной моде составила 390  $\text{A}/\text{cm}^2$ , длина волны лазерной генерации — 1.04  $\mu\text{m}$ .

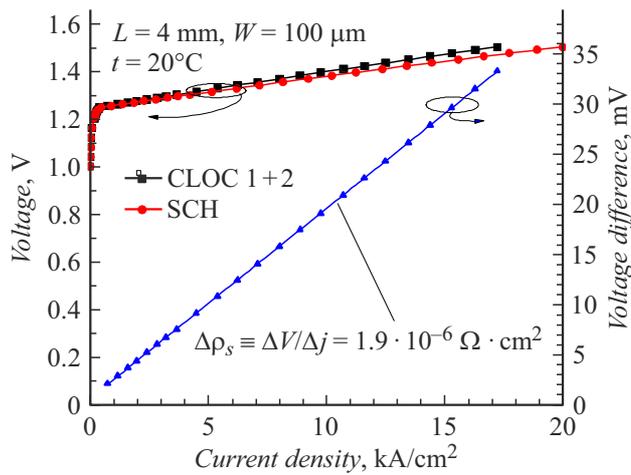
Наибольший интерес представляют зонные диаграммы лазеров при прямом смещении. Сравнивая их для структур CLOC 1+2 и SCH (рис. 2, *a* и *b* соответственно), можно видеть, что слои дополнительных волноводов формируют мелкую потенциальную яму для электронов (вставки на рис. 2, *a* и *b*). Высота потенциального барьера на границе  $n$ -эмиттер–волновод в обеих структурах одинакова. Благодаря уменьшению степени легирования в  $n$ -эмиттере вблизи волновода потенциальный барьер для электронов на входе в волновод имеет ступенчатую форму.

Увеличение толщины структуры и добавление двух потенциальных барьеров для электронов высотой около 15 meV приводят к тому, что при одной и той же плотности тока на гетероструктуре CLOC 1+2 падает большее напряжение, чем на референсной (рис. 3). Из наклона токовой зависимости разницы падений напряжения можно определить удельное последовательное сопротивление, которое составило  $1.9 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . При этом расчетное удельное последовательное сопротивление всей гетероструктуры SCH, определенное на линейном участке вольт-амперной характеристики, составило  $1.2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . В реальном лазере к сопротивлению собственно гетероструктуры добавляется последовательное сопротивление подложки, металлических контактов, а также лазерного теплоотвода, так что суммарное удельное последовательное сопротивление, как правило, составляет  $(5-9) \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Сопоставляя полученное значение  $\rho_s$  дополнительных волноводов с экспериментально измеренными значениями  $\rho_s$  лазеров с различными конструкциями волноводов (см. таблицу), можно увидеть, что их вклад не превышает 5%. За счет повышения структурного качества, оптимизации профилей легирования и градиентных слоев можно снизить  $\rho_s$  лазера на величину порядка  $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  [8]. Удельное последовательное сопротивление металлических контактов, согласно данным [9], имеет такой же порядок.

Таким образом, последовательное сопротивление гетероструктуры CLOC-лазера с двумя дополнительными волноводами, расположенными с  $n$ -стороны, незначительно отличается от такового для современных асимметричных конструкций гетероструктур мощных лазеров. Уменьшение сопротивления металлических контактов и оптимизация профилей легирования гетероструктуры позволяют снизить последовательное сопротивление на величину, многократно превышающую вклад дополнительных волноводов. Естественное изменение этих параметров в процессе изготовления и монтажа лазеров приведет к разбросу последовательного сопротивления приборов из одной партии и значительно затруднит экспериментальное исследование разницы сопротивлений гетероструктур CLOC и SCH. Отметим также,



**Рис. 2.** Зонные диаграммы лазеров CLOC 1+2 (a) и SCH (b) при прямом смещении  $p$ – $n$ -перехода.  $E_c$  и  $E_v$  — энергии дна зоны проводимости и валентной зоны соответственно. На вставках в увеличенном масштабе показаны энергия дна зоны проводимости и квазиуровень Ферми для электронов для выделенных штриховыми линиями областей.



**Рис. 3.** Рассчитанные вольт-амперные характеристики лазеров CLOC 1+2 и SCH, а также зависимость вольт-добавки в CLOC-гетероструктуре от плотности тока.  $\Delta\rho_s$  — приращение удельного последовательного сопротивления, обусловленное добавлением связанных волноводов в гетероструктуру,  $\Delta V$  — приращение разницы падений напряжения,  $\Delta j$  — приращение плотности тока.

что применение более двух дополнительных волноводов для создания мощных лазеров представляется нецелесообразным, поскольку уже в конструкции CLOC 1+2 можно расширить основной волновод до  $4.8\ \mu\text{m}$  [5], а для волновода умеренной толщины нет необходимости в подавлении более двух оптических мод.

В заключение отметим, что впервые проведено численное исследование вклада дополнительных волноводов в последовательное сопротивление гетероструктуры CLOC InGaAs/GaAs/AlGaAs с двумя дополнительными волноводами и предельно возможным смещением активной области к  $p$ -контакту. Показано, что прирост удельного последовательного сопротивления на  $1.9 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}^2$  за счет увеличения толщины гетероструктуры и создания потенциальных барьеров на гетерограницах на порядок меньше экспериментально полученных значений последовательного сопротивления мощных современных лазеров.

Экспериментально измеренное последовательное электрическое сопротивление мощных торцевых полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме работы

Тип структуры	$R_s$ , mΩ	$L$ , mm	$W$ , μm	$\rho_s$ , Ω · cm <sup>2</sup>	$\lambda$ , μm
PLD [8]	13	4	100	$5.2 \cdot 10^{-5}$	0.98
LOC [9]	20	4	90	$7.2 \cdot 10^{-5}$	0.91
EDAS [9]	16	4	90	$5.8 \cdot 10^{-5}$	0.91
EDAS [1]	5	4	300	$6.0 \cdot 10^{-5}$	0.98
CLOC [4]	22	4	100	$8.8 \cdot 10^{-5}$	1.03

Примечание. PLD — pump laser diode, LOC — large optical cavity, EDAS — extremely double asymmetric structure, CLOC — coupled large optical cavity.

## Благодарности

Авторы благодарны НИУ ВШЭ-СПб за предоставление лицензионного программного обеспечения.

## Финансирование работы

Работа А.С. Паюсова и Г.О. Корнышова выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00557).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] L. Wang, H. Qu, A. Qi, X. Zhou, W. Zheng, *Opt. Lett.*, **47** (13), 3231 (2022). DOI: 10.1364/OL.452048
- [2] D. Ban, E.H. Sargent, St.J. Dixon-Warren, K. Hinzer, J.K. White, A.J. SpringThorpe, *IEEE J. Quantum Electron.*, **40** (6), 651 (2004). DOI: 10.1109/JQE.2004.828262
- [3] N.Yu. Gordeev, A.S. Payusov, Y.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.M. Kulagina, M.V. Maximov, *Opt. Lett.*, **40** (9), 2150 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.002150
- [4] А.Е. Жуков, Н.Ю. Гордеев, Ю.М. Шерняков, А.С. Паюсов, А.А. Серин, М.М. Кулагина, С.А. Мингаиров, Н.А. Калюжный, М.В. Максимов, *Письма в ЖТФ*, **44** (15), 46 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46439.17345 [A.E. Zhukov, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, A.A. Serin, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyi, M.V. Maksimov, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (8), 675 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018080151].
- [5] A. Serin, N. Gordeev, A. Payusov, Y. Shernyakov, Y. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, M. Maximov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **929** (1), 012077 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/929/1/012077
- [6] *STR soft* [Электронный ресурс]. <https://str-soft.com/devices/silense/>
- [7] Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, *ФТП*, **38** (3), 374 (2004). [N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, I.S. Tarasov, *Semiconductors*, **38** (3), 360 (2004). DOI: 10.1134/1.1682615].
- [8] V. Gapontsev, N. Moshegov, I. Berezin, A. Komissarov, P. Trubenko, D. Miftakhutdinov, I. Berishev, V. Chuyanov, O. Raisky, A. Ovtchinnikov, *Proc. SPIE*, **10086**, 1008604 (2017). DOI: 10.1117/12.2250634
- [9] K.H. Hasler, H. Wenzel, P. Crump, S. Knigge, A. Maasdorf, R. Platz, R. Staske, G. Erbert, *Semicond. Sci. Technol.*, **29** (4), 045010 (2014). DOI: 10.1088/0268-1242/29/4/045010