

07.2;07.3

## Влияние латерального оптического ограничения на характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ с зарощенным туннельным переходом

© С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>2</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, С.С. Рочас<sup>3</sup>, А.В. Бабичев<sup>3</sup>, И.И. Новиков<sup>3</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>3</sup>, А.Г. Гладышев<sup>4</sup>, Д.В. Денисов<sup>5</sup>, К.О. Воропаев<sup>6</sup>, А.Ю. Егоров<sup>4</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>6</sup> АО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2021 г.

В окончательной редакции 19 июля 2021 г.

Принято к публикации 20 июля 2021 г.

Исследовано влияние латерального оптического ограничения на статические и спектральные характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона  $1.55\ \mu\text{m}$  с зарощенным туннельным переходом (ЗТП)  $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ , реализованных с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии и технологии спекания пластин. Обнаружено, что в реализованных лазерах из-за относительно слабого оптического ограничения в латеральном направлении одномодовый режим генерации поддерживается при размерах мезы ЗТП вплоть до  $8\ \mu\text{m}$ , однако при размерах мезы ЗТП менее  $7\ \mu\text{m}$  возникает эффект насыщающегося поглотителя. Рост оптического ограничения за счет увеличения глубины травления туннельного перехода ведет к подавлению эффекта насыщающегося поглотителя при размерах мезы ЗТП  $5\text{--}6\ \mu\text{m}$ , но одновременно ограничивает максимальную оптическую мощность в одномодовом режиме лазерной генерации. По результатам анализа увеличение спектрального рассогласования максимума спектра усиления активной области и резонансной длины волны лазера до уровня  $\sim 35\text{--}50\ \text{nm}$  позволит подавить нежелательный эффект насыщающегося поглотителя в широком диапазоне размеров мезы ЗТП при сохранении одномодового режима генерации.

**Ключевые слова:** вертикально-излучающий лазер, спекание пластин, молекулярно-пучковая эпитаксия, одномодовый режим, насыщающийся поглотитель.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51717.18942

Проблема получения эффективных одномодовых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting laser) спектрального диапазона  $1.55\ \mu\text{m}$  по-прежнему актуальна. Наиболее перспективным направлением является комбинация высокоэффективной активной области на основе системы материалов  $\text{InAlGaAsP}/\text{InP}$  с распределенными брэгговскими отражателями (РБО, англ. distributed Bragg reflector, DBR) на основе материалов, обладающих высоким контрастом показателей преломления и теплопроводностью. Данный подход реализован в технологии спекания пластин, объединяющей преимущества систем материалов  $\text{InAlGaAsP}/\text{InP}$  и  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  (далее СП-ВИЛ) [1–3], и в технологии гибридной интеграции с высококонтрастными диэлектрическими РБО (далее гибридный ВИЛ) [4–6].

В таких лазерах используется конструкция вертикального микрорезонатора с внутриврезонаторными контактными (ВРК) слоями и зарощенным туннельным переходом на основе слоев  $n^{++}/p^{++}\text{-In(Al)GaAs}$  (ЗТП, англ.

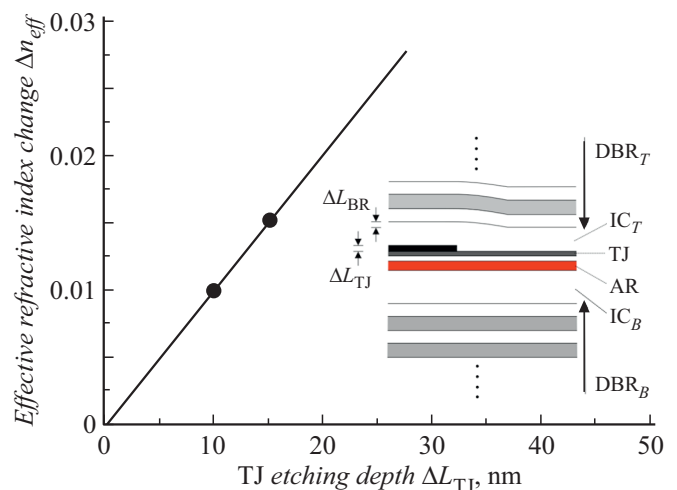
buried tunnel junction, BTJ). Для снижения оптического поглощения в длинноволновых ВИЛ преимущественно используют туннельные переходы (ТП) с оптически прозрачными слоями  $\text{InAlGaAs}$  [1,2] или ТП на основе слоев  $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$  [4,5], в которых собственным поглощением в слое  $n^{++}\text{-InGaAs}$  можно пренебречь благодаря эффекту Бурштейна–Мосса. Для технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ, англ. molecular beam epitaxy) проблематично эффективное *in situ* удаление окислов с поверхности Al-содержащих слоев при стандартных температурах. В связи с этим для зарощивания поверхностного рельефа, сформированного в ТП, применяются технологии химико-пучковой эпитаксии (ХПЭ, англ. chemical beam epitaxy) [4,7] или преимущественно газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС, англ. metalorganic chemical vapour deposition) [1,5]. Следует отметить, что выбор в пользу ТП  $n^{++}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$  в рамках технологии ГФЭ МОС дополнительно обусловлен сложностью реализации высокого уровня *p*-легирования сло-

ев  $p^{++}$ -InGaAs при использовании устойчивых к сегрегации легирующих примесей (например, углерода) [8]. В рамках концепции ЗТП латеральное оптическое ограничение, определяющее модовый состав ВИЛ, реализуется за счет перепада высот между областью ЗТП и периферийной областью обратномещенного  $p^+-n$ -перехода. Так, в случае применения ТП  $n^{++}$ -InGaAs/ $p^{++}$ -InAlGaAs (с типичной глубиной травления 20 nm) и формирования ЗТП методом ХПЭ контраст эффективного показателя преломления в конструкции гибридного ВИЛ достигает 0.03 [8], в результате чего сильный волноводный эффект ограничивает предельные размеры мезы ЗТП, при которых реализуется стабильная лазерная генерация через фундаментальную моду, на уровне 4–5  $\mu\text{m}$  [4]. При зарачивании поверхностного рельефа в ТП методом ГФЭ МОС благодаря частичной планаризации одномодовый режим генерации в гибридных ВИЛ сохраняется вплоть до размеров мезы ЗТП  $\sim 6 \mu\text{m}$  [5], что свидетельствует о снижении волноводного эффекта. Было продемонстрировано, что зарачивание методом ГФЭ МОС поверхностного рельефа, сформированного в ТП  $n^{++}/p^{++}$ -InAlGaAs (с типичной глубиной травления  $\sim 25 \text{ nm}$ ), позволяет увеличить выходную оптическую мощность СП-ВИЛ в одномодовом режиме генерации  $P_{\text{SM}}$  до уровня 6.0–6.5 mW при размере мезы ЗТП 6–7  $\mu\text{m}$  [1]. Дальнейшее расширение диапазона размеров мезы ЗТП и возможность увеличения выходной мощности  $P_{\text{SM}}$  связаны с введением дополнительного механизма потерь для мод высокого порядка за счет формирования пространственного рельефа в верхнем ВРК-слое  $n$ -InP на границе интерфейса спекания в СП-ВИЛ [9] или с подавлением эффекта пространственного выжигания дырок за счет формирования поверхностного рельефа в контактном слое InGaAs гибридных ВИЛ с коротким резонатором [6].

Недавно нами была предложена конструкция ТП на основе слоев  $n^{++}$ -InGaAs/ $p^{++}$ -InGaAs/ $p^{++}$ -InAlGaAs (далее композитный ТП), позволившая использовать метод МПЭ на всех этапах изготовления гетероструктуры СП-ВИЛ и реализовать лазеры спектрального диапазона 1.3 и 1.55  $\mu\text{m}$  с характеристиками, сравнимыми с характеристиками СП-ВИЛ на базе ТП  $n^{++}/p^{++}$ -InAlGaAs [10,11]. Отличительной особенностью метода МПЭ является сохранение перепада высот  $\Delta L_{\text{BR}}$  в морфологии зараченной поверхности (см. вставку к рис. 1), поэтому изучение волноводного эффекта в таких СП-ВИЛ представляет большой интерес.

В настоящей работе представлены результаты и анализ влияния уровня латерального оптического ограничения на модовый состав и приборные характеристики СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.55  $\mu\text{m}$  на основе ЗТП  $n^+-InGaAs/p^+-InGaAs/p^+-InAlGaAs$ , реализованных с помощью технологии МПЭ и технологии спекания пластин.

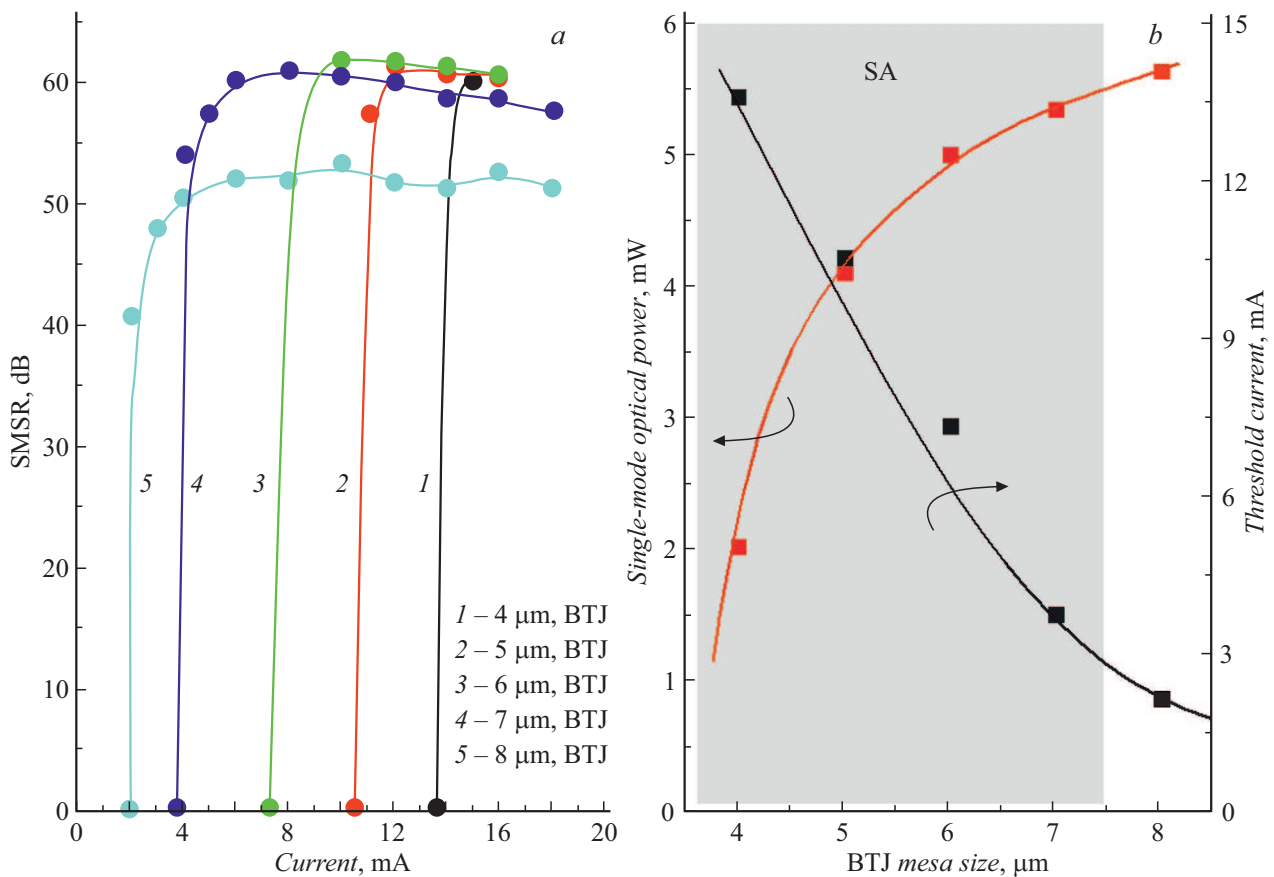
Конструкция исследуемых СП-ВИЛ включает в себя подложку GaAs, нижний РБО на основе 35.5 пар



**Рис. 1.** Результаты моделирования контраста эффективного показателя преломления  $\Delta n_{eff}$  в зависимости от минимальной глубины травления  $\Delta L_{TJ}$  композитного ТП для СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.55  $\mu\text{m}$ . Кружками отмечены данные для экспериментально реализованных лазеров. На вставке приведено схематическое изображение поперечного сечения гетероструктуры СП-ВИЛ в области микрорезонатора.  $DBR_T$  и  $DBR_B$  — верхний и нижний РБО,  $IC_T$  и  $IC_B$  — верхний и нижний ВРК-слои, AR — активная область, TJ — туннельный переход.

слоев GaAs/AlGaAs, нижний ВРК-слой  $n$ -InP с контактными слоями  $n$ -InGaAsP, активную область на основе напряженных квантовых ям InGaAs/InAlGaAs, эмиттер  $p$ -InAlAs, ЗТП  $n^{++}$ -InGaAs/ $p^{++}$ -InGaAs/ $p^{++}$ -InAlGaAs, верхний ВРК-слой  $n$ -InP с контактными слоями  $n$ -InGaAsP и верхний РБО на основе 20.5 пар слоев GaAs/AlGaAs. Слои ТП, контактные слои, а также границы спекания расположены в минимумах для продольного распределения интенсивности электромагнитного поля фундаментальной моды с целью снижения волноводного эффекта, обусловленного формированием мезы ЗТП, минимизации поглощения на свободных носителях в легированных слоях и межзонного поглощения, а также уменьшения рассеяния света на интерфейсах спекания InGaAsP–GaAs. Проектная величина спектрального рассогласования резонансной длины волны микрорезонатора СП-ВИЛ относительно пика усиления активной области (так называемая спектральная расстройка) составляет около 20 nm. В случае композитного ТП толщина слоя  $n^{++}$ -InGaAs задает минимальную глубину травления, а суммарная толщина слоев  $n^{++}$ -InGaAs и  $p^{++}$ -InGaAs — максимальную глубину травления. Поэтому конструкции исследуемых ВИЛ различались только толщиной слоя  $n^{++}$ -InGaAs, при этом толщины слоев  $p^{++}$ -InGaAs и  $p^{++}$ -InAlGaAs были зафиксированы. Детали конструкции, а также особенности изготовления лазеров приведены в работах [10,12,13].

В отличие от метода ГФЭ МОС при МПЭ-зарачивании не наблюдается даже частичной планаризации по-

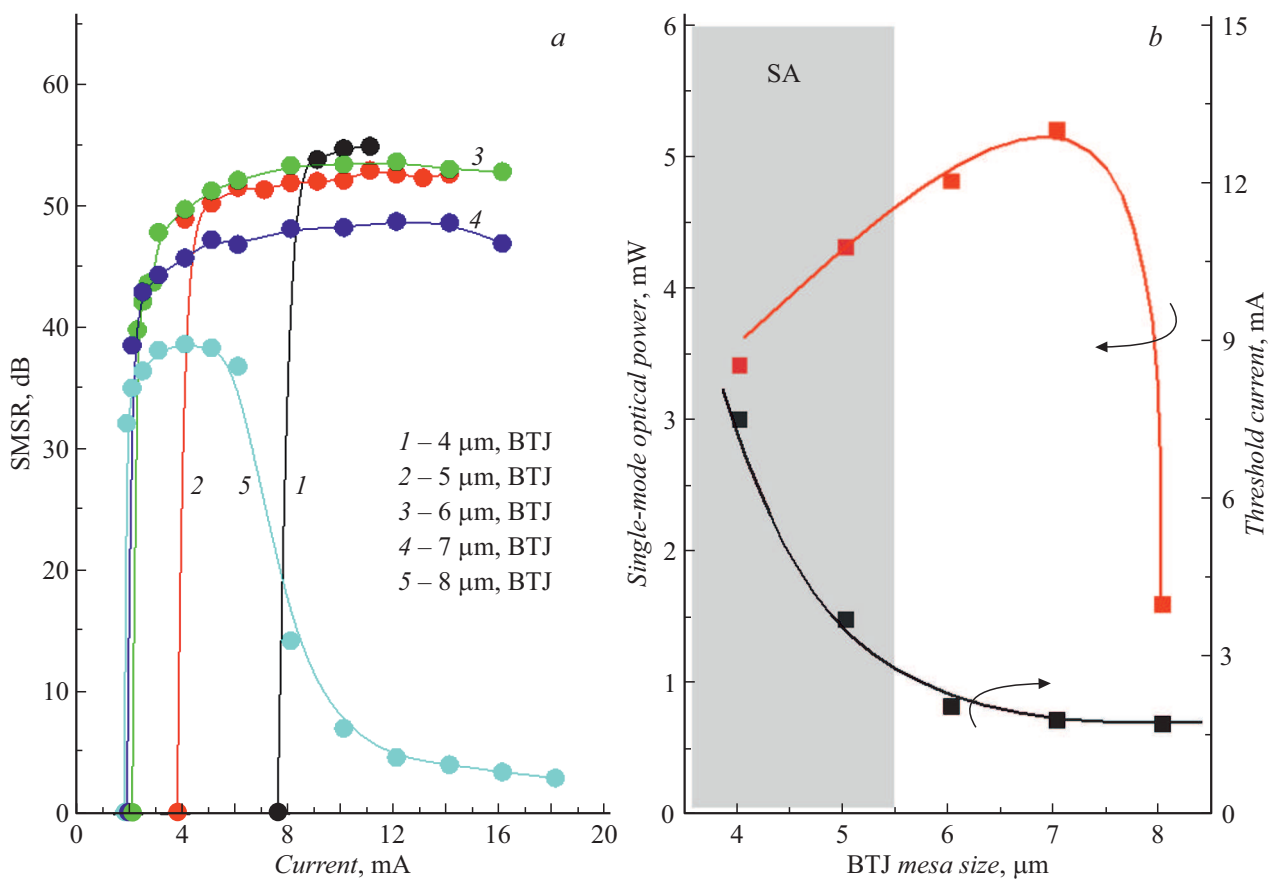


**Рис. 2.** СП-ВИЛ спектрального диапазона  $1.55\mu\text{m}$  с проектной величиной  $\Delta n_{eff} \sim 0.01$ . *a* — зависимости величины SMSR от тока накачки для различного размера мезы ЗТП; *b* — зависимости порогового тока  $I_{th}$  и максимальной оптической мощности в одномодовом режиме генерации  $P_{SM}$  от размера мезы ЗТП. Измерения проведены при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Серым выделена область SA, где наблюдается эффект НП.

верхностного рельефа ( $\Delta L_{BR} = \Delta L_{TJ}$ ), поэтому уровень оптического ограничения легко оценить в рамках модели эффективного показателя преломления [14], используя проектный перепад высот рельефа. На рис. 1 приведено расчетное значение контраста эффективного показателя преломления  $\Delta n_{eff}$  в зависимости от минимальной глубины травления  $\Delta L_{TJ}$  композитного ТП для исследуемых СП-ВИЛ в рамках модели эффективного цилиндрического волновода с одноступенчатым изменением показателя преломления [15]. Расчет нормированной частоты ( $V$ -параметр) показывает, что при величине контраста  $\Delta n_{eff} \sim 0.0035$  рассматриваемый эффективный волновод является одномодовым при размере мезы ЗТП до  $8\mu\text{m}$ , а увеличение контраста ведет к уменьшению предельного размера мезы ЗТП для одномодового режима работы: до  $6\mu\text{m}$  при  $\Delta n_{eff} \sim 0.0062$  и менее  $4\mu\text{m}$  при  $\Delta n_{eff} \sim 0.0138$ . Таким образом, несмотря на расположение слоев ТП в минимуме электромагнитного поля фундаментальной моды, даже при относительно небольших глубинах травления ТП реализуется более сильный волноводный эффект, чем в случае классических (In)AlGaAs/GaAs ВИЛ ближнего ИК-диапазона с оксидной токовой апертурой [16]. С другой стороны, контраст

эффективного показателя преломления в литографических (In)AlGaAs/GaAs ВИЛ ближнего ИК-диапазона, где для токового и оптического ограничения используется процедура травления и зарощивания фазосдвигающего слоя внутри микрорезонатора ВИЛ, заметно выше величины  $\Delta n_{eff}$  для СП-ВИЛ при сравнимых глубинах травления [17].

Согласно экспериментальным данным, приведенным на рис. 2, *a*, лазеры СП-ВИЛ с проектной величиной  $\Delta n_{eff} \sim 0.01$  демонстрируют одномодовый режим генерации вплоть до размера ЗТП  $8\mu\text{m}$  с фактором подавления боковых мод (англ. side-mode suppression ratio, SMSR) более 50 dB. Оптическая мощность  $P_{SM}$  растет по мере увеличения размера мезы ЗТП и достигает 5.6 mW при размере мезы ЗТП  $8\mu\text{m}$  (рис. 2, *b*). В то же время при уменьшении размера мезы ЗТП наблюдается резкое увеличение порогового тока  $I_{th}$  (рис. 2, *b*), что ведет к существенному сужению рабочего диапазона тока при малых размерах мезы ЗТП (рис. 2, *a*) и негативно влияет на быстродействие лазеров (данные не приведены). Подобное поведение, по-видимому, связано с увеличением латеральных размеров зарощенного рельефа (см. вставку на рис. 1), что приводит к формированию эффектив-



**Рис. 3.** СП-ВИЛ спектрального диапазона  $1.55\mu\text{m}$  с проектной величиной  $\Delta n_{eff} \sim 0.015$ . *a* — зависимости величины SMSR от тока накачки для различного размера мезы ЗТП; *b* — зависимости порогового тока  $I_{th}$  и максимальной оптической мощности в одномодовом режиме генерации  $P_{SM}$  от размера мезы ЗТП. Измерения проведены при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Серым выделена область SA, где наблюдается эффект НП.

ного волновода с градиентным профилем показателя преломления. С одной стороны, это ведет к резкому падению фактора латерального оптического ограничения для мод высокого порядка при больших размерах мезы ЗТП, а с другой — к снижению фактора латерального оптического ограничения для фундаментальной моды и возникновению эффекта насыщающегося поглотителя (НП, англ. saturated absorber, SA) в непрокачиваемых частях активной области, для которого характерны скачкообразное изменение оптической мощности с током накачки и небольшая область гистерезиса [18].

В случае СП-ВИЛ с проектной величиной  $\Delta n_{eff} \sim 0.015$  увеличение оптического контраста эффективного волновода  $\Delta n_{eff}$  ведет к снижению максимального значения SMSR по мере увеличения размера мезы ЗТП, а также к уменьшению диапазона размеров мез ЗТП, в котором реализуется одномодовый режим генерации во всем диапазоне токов накачки. Подобное поведение также характерно для ВИЛ с оксидной токовой апертурой [16], литографических [17] и гибридных ВИЛ [6]. В нашем случае для лазеров с размером мезы ЗТП менее  $6\mu\text{m}$  предельная величина SMSR превышает 50 dB, а в лазерах с размером мезы

ЗТП  $8\mu\text{m}$  предельная величина SMSR снижается до уровня 38 dB и при токах более 5 mA наблюдается резкое падение значения SMSR и переключение в многомодовый режим генерации (рис. 3, *a*). В результате оптическая мощность  $P_{SM}$  достигает максимального значения  $\sim 5.2\text{mW}$  при размере мезы ЗТП  $7\mu\text{m}$  (рис. 3, *b*). При этом увеличение оптического ограничения приводит к подавлению эффекта НП при промежуточных размерах мез ЗТП и менее резкому росту порогового тока  $I_{th}$  при малых размерах мез ЗТП (рис. 3, *b*), что служит подтверждением предложенного объяснения причины и механизма формирования НП.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение глубины травления композитного ТП представляется нецелесообразным. Хотя увеличение глубины травления должно способствовать дальнейшему подавлению эффекта НП и снижению величины пороговых токов при размерах мез ЗТП менее  $6\mu\text{m}$ , что важно с точки зрения обеспечения высокого быстродействия лазеров, одновременно оно сопряжено с дальнейшим уменьшением предельного размера мезы ЗТП, при котором реализуется одномодовый режим генерации. В совокупности с увеличением теплового сопротивления это должно

еще больше ограничить максимальную оптическую мощность  $P_{SM}$ . Принимая во внимание усиление эффекта НП при увеличении температуры, можно предположить, что увеличение проектной спектральной расстройки в 2 раза позволит снизить поглощение света на резонансной длине волны ВИЛ в непрокачиваемых частях активной области и дополнительно подавить эффект НП, а также улучшить температурную стабильность СП-ВИЛ.

Таким образом, проведено исследование влияния латерального оптического ограничения на статические и спектральные характеристики СП-ВИЛ спектрального диапазона  $1.55 \mu\text{m}$ , реализованных с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии и технологии спекания пластин. Уровень оптического ограничения задавался глубиной травления композитного ТП  $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$  и рассчитывался как контраст эффективного показателя преломления  $\Delta n_{eff}$ . В лазерах с низким уровнем оптического ограничения ( $\Delta n_{eff} \sim 0.01$ ) удается реализовать стабильный одномодовый режим генерации в широком диапазоне размеров мезы ЗТП ( $4\text{--}8 \mu\text{m}$ ) благодаря разрастанию латеральных размеров зарощенного поверхностного рельефа, однако поглощение света в непрокачиваемых частях активной области ведет к появлению нежелательного эффекта НП при размерах мезы ЗТП менее  $7 \mu\text{m}$ . Увеличение контраста  $\Delta n_{eff}$  до  $\sim 0.015$  позволяет подавить эффект НП при промежуточных размерах мезы ЗТП ( $5\text{--}6 \mu\text{m}$ ), однако это накладывает ограничения на предельный размер мезы ЗТП, при котором возможна лазерная генерация через фундаментальную моду, и максимальную выходную оптическую мощность в одномодовом режиме. Дальнейшее подавление эффекта НП при сохранении эффективного одномодового режима генерации, а также повышение температурной стабильности может быть достигнуто путем увеличения спектральной расстройки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Caliman, A. Mereuta, G. Suruceanu, V. Iakovlev, A. Sirbu, E. Kapon, *Opt. Express*, **19** (18), 16996 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.016996
- [2] D. Ellafi, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Suruceanu, Z. Mickovic, A. Caliman, A. Mereuta, E. Kapon, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **21** (6), 414 (2015). DOI: 10.1109/jstqe.2015.2412495
- [3] 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, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **53** (6), 2400808 (2017). DOI: 10.1109/JQE.2017.2752700
- [4] C. Lauer, M. Ortsiefer, R. Shau, J. Roskopf, G. Bohm, R. Meyer, M.C. Amann, *Phys. Status Solidi C*, **1** (8), 2183 (2004). DOI: 10.1002/pssc.200404770
- [5] M. Müller, W. Hofmann, T. Grundl, M. Horn, P. Wolf, R.D. Nagel, E. Ronneberg, G. Böhm, D. Bimberg, M.-C. Amann, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **17** (5), 1158 (2011). DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2109700
- [6] T. Grundl, P. Debernardi, M. Müller, C. Grasse, P. Ebert, K. Geiger, M. Ortsiefer, G. Bohm, R. Meyer, M.-C. Amann, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **19** (4), 1700913 (2013). DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2244572
- [7] M. Ortsiefer, R. Shau, G. Bohm, F. Kohler, M.C. Amann, *Appl. Phys. Lett.*, **76** (16), 2179 (2000). DOI: 10.1049/el:20020819
- [8] D. Keiper, R. Westphalen, G. Landgren, *J. Cryst. Growth*, **197** (1-2), 25 (1999). DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00903-8
- [9] N. Volet, T. Czyszanowski, J. Walczak, L. Mutter, B. Dwir, Z. Micković, P. Gallo, A. Caliman, A. Sirbu, A. Mereuta, V. Iakovlev, E. Kapon, *Opt. Express*, **21** (22), 26983 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.026983
- [10] С.А. Блохин, М.А. Бобров, Н.А. Малеев, А.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, С.С. Рочас, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, Письма в ЖТФ, **46** (17), 21 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49888.18393 [S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, A.A. Blokhin, A.G. Kuz'menkov, A.P. Vasil'ev, S.S. Rochas, A.G. Gladyshev, A.V. Babichev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (9), 854 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020090023].
- [11] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, S.S. Rochas, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, *Electron. Lett.* (First published: 3 June 2021). DOI: 10.1049/ell2.12232
- [12] С.А. Блохин, В.Н. Неведомский, М.А. Бобров, Н.А. Малеев, А.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, А.П. Васильев, С.С. Рочас, А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, ФТП, **54** (10), 1088 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.10.49947.9463 [S.A. Blokhin, S.N. Nevedomsky, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, A.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, S.S. Rochas, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov, *Semiconductors*, **54** (10), 1276 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620100048].
- [13] K.O. Voropaev, B.I. Seleznev, A.Yu. Prokhorov, A.S. Ionov, S.A. Blokhin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1658**, 12069 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012069
- [14] G.R. Hadley, *Opt. Lett.*, **20** (13), 1483 (1995). DOI: 10.1364/OL.20.001483
- [15] G.P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems* (Wiley, N.Y., 2010).
- [16] R. Michalzik, *VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers* (Springer-Verlag, Berlin, 2013). DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0

- [17] D.G. Deppe, J. Leshin, J. Leshin, L. Eifert, F. Tucker, T. Hillyer, *Electron. Lett.*, **53** (24), 1598 (2017). DOI: 10.1049/el.2017.2780
- [18] С.А. Блохин, М.А. Бобров, А.А. Блохин, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, Н.А. Малеев, С.С. Рочас, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Д.В. Денисов, К.О. Воропаев, А.С. Ионов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **46** (24), 49 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.24.50430.18522 [S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, A.P. Vasil'ev, A.G. Kuz'menkov, N.A. Maleev, S.S. Rochas, A.G. Gladyshev, A.V. Babichev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (12), 1257 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020120172].