

УДК 621.373.826

Характеризация режимов лазерной генерации вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1,3 мкм на основе короткопериодной сверхрешётки InGaAs/InGaAlAs

© 2021 г. А. А. ПЕТРЕНКО*, АСПИРАНТ; С. С. РОЧАС*, АСПИРАНТ;
Л. Я. КАРАЧИНСКИЙ*, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; А. В. БАБИЧЕВ*, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
И. И. НОВИКОВ*, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; А. Г. ГЛАДЫШЕВ*, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
Е. С. КОЛОДЕЗНЫЙ*, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; П. Е. КОПЫТОВ*, СТУДЕНТ;
В. Е. БУГРОВ*, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК; С. А. БЛОХИН**, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
А. А. БЛОХИН**, К. О. ВОРОПАЕВ***; А. Ю. ЕГОРОВ*, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК

* Университет ИТМО, Санкт-Петербург

** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

***АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

E-mail: aapetrenko@itmo.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-12-11-16

В статье представлены результаты характеристики режимов лазерной генерации вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1,3 мкм на основе короткопериодной сверхрешётки $\text{In}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,27}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ и двух распределённых брэгговских отражателей $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{GaAs}$ на подложке GaAs. Для проведения исследований кристаллы вертикально-излучающих лазеров были смонтированы на кристаллодержатель со сверхвысокочастотным SMA- (SubMiniature Version A) разъёмом и оптическим волокном с разъёмом типа Ferrule Connector (FC). Экспериментальные исследования вольтамперной и ватт-амперной характеристик, оптических и радиочастотных спектров и поляризационной стабильности лазерного излучения проводились в диапазоне токов накачки от 0 до 14 мА. Установлено, что величина порогового тока исследуемых вертикально-излучающих лазеров составила 1,7 мА. Продемонстрированы максимальная выходная оптическая мощность на выходе из оптического волокна вертикально-излучающего лазера на основе короткопериодной сверхрешётки $\text{In}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,27}\text{Al}_{0,2}\text{As}$, равная 1,34 мВт, частота малосигнальной модуляции в гигагерцовом диапазоне, величина токового сдвига длины волны излучения, равная 0,5 нм/мА. Исследованные вертикально-излучающие лазеры могут быть использованы при создании устройств радиофотоники для телекоммуникационных применений. Дальнейшее улучшение статических и динамических характеристик вертикально-излучающих лазеров возможно в результате оптимизации конструкции короткопериодной сверхрешётки и зарощенного туннельного перехода.

Ключевые слова: вертикально-излучающие лазеры, короткопериодные сверхрешётки, динамические режимы лазера, информационно-телекоммуникационные системы передачи данных.

Код OCIS: 140.5960.

ВВЕДЕНИЕ

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 1,3 мкм являются перспективными источниками излучения для создания устройств радиофотоники [1], применяются в информационно-телекоммуникационных и вычислительных системах для сверхскоростной передачи данных по оптоволоконным каналам [2], могут быть интегрированы с фотонными устройствами на основе кремния, что позволит значительно увеличить протяжённость оптических каналов связи [3], широко используются при создании квантовых генераторов случайных чисел [4]. В сравнении с традиционно используемыми в системах передачи данных лазерами с распределённой обратной связью, ВИЛ отличаются симметричной диаграммой направленности, более низкими рабочими токами и, как следствие, пониженным энергопотреблением [5].

Для создания ВИЛ ближнего инфракрасного диапазона широко применяется конструкция на основе системы материалов индий-алюминий-галлий-мышьяк InAlGaAs на подложке арсенида галлия GaAs с инжекцией носителей через распределённые брэгговские отражатели (РБО) [6], однако данное решение не может быть использовано для разработки конструкции длинноволновых ВИЛ вследствие отсутствия эффективной активной области, а применение структуры ВИЛ с внутрирезонаторными контактными слоями и туннельным переходом в системе материалов индий-алюминий-галлий-мышьяк-фосфор InAlGaAsP на подложке фосфида индия InP ограничено низкой температурной стабильностью характеристик и низкой частотой модуляции лазера [7].

Различными исследовательскими группами были предложены эпитаксиальные структуры длинноволновых ВИЛ на основе GaAs [8, 9] и InP [10–12], а также гибридных структур на основе InP [13], активные области которых выполнены на основе квантовых ям (КЯ) InAlGaAs или сильнонапряжённых КЯ InGaAs/InAlGaAs, обеспечивающих высокое оптическое усиление [7], что позволяет создавать ВИЛ, демонстрирующие одномодовую лазерную генерацию с выходной оптической мощностью более 1 мВт [14]. Недостатком подобных конструкций ВИЛ является ограни-

чение применимости оксидных апертур, обеспечивающих токовое ограничение, что приводит к усилению влияния эффекта саморазогрева ВИЛ [7]. Одним из подходов, позволяющих обойти данное ограничение при создании длинноволновых ВИЛ, демонстрирующих частоту эффективной модуляции до 9 ГГц при температуре 20 °С [15], является конструкция с вертикальным микрорезонатором, содержащим заращенный туннельный переход (ЗТП), обеспечивающий токовое и оптическое ограничение, и два внутрирезонаторных контактных слоя, необходимых для инжекции носителей [3].

Характерные значения плотности пороговых токов современных ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм с активными областями на основе КЯ находятся в диапазоне 3–5 кА/см², что соответствует области насыщения оптического усиления гетероструктур с КЯ [16]. В связи с этим, перспективной областью исследования являются конструкции ВИЛ с активными областями на основе короткопериодных сверхрешёток (СР) InGaAs/InGaAlAs, позволяющих повысить модовое усиление лазеров [17], увеличить их выходную оптическую мощность и снизить энергопотребление. Характеристики ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм с активными областями на основе СР в настоящий момент мало изучены, для их эффективного использования при создании устройств радиофотоники необходимым является контроль режимов лазерной генерации.

Целью данной работы является характеристика режимов лазерной генерации ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм на основе короткопериодной сверхрешётки InGaAs/InGaAlAs.

КОНСТРУКЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1,3 МКМ НА ОСНОВЕ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ СВЕРХРЕШЁТКИ InGaAs/InGaAlAs

В конструкции ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм использована геометрия вертикального микрорезонатора с токовым ограничением на основе концепции ЗТП (рис. 1). Гетероструктура ВИЛ включает в себя два РБО — верхний, состоящий из 21,5 пары Al_{0,9}Ga_{0,1}As/GaAs, и нижний, состоящий

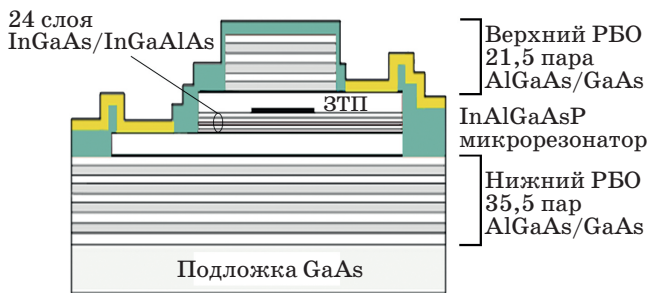


Рис. 1. Конструкция ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм на основе короткопериодной сверхрешётки InGaAs/InGaAlAs.

из 35,5 пар $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{GaAs}$, и оптический микрорезонатор на основе InAlGaAs толщиной 3λ . В оптический микрорезонатор помещены активная область, состоящая из короткопериодной сверхрешётки на основе 24 чередующихся слоёв $\text{In}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{As}$ КЯ и барьерных слоёв $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,27}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ с толщинами слоёв 0,8 нм и 2 нм, соответственно, и туннельный переход $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAlAs}$ с ЗТП диаметром 5 мкм, заключенные между внутрирезонаторными контактами. Внутрирезонаторные контактные слои и туннельный переход расположены в минимумах электромагнитного поля оптической моды резонатора, активная область — в максимуме аналогично конструкции, описанной в работе [1]. Формирование гетероструктуры ВИЛ производилось по технологии последовательного двойного спекания оптического резонатора с верхним и нижним РБО, более подробно представленной в работах [18, 19]. Технология роста, конструкция и характеристики гетероструктур на основе CP InGaAs/InAlGaAs для активных областей ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм детально описаны в работе [20]. Дополнительно для проведения исследований кристалл ВИЛ был смонтирован на кристаллодержатель со сверхвысокочастотным SMA-разъёмом для подключения кабелей электропитания и оптическим волокном с разъёмом типа FC.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

На рис. 2а, 2б приведены вольт- и ватт-амперные характеристики ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм с волоконным выво-

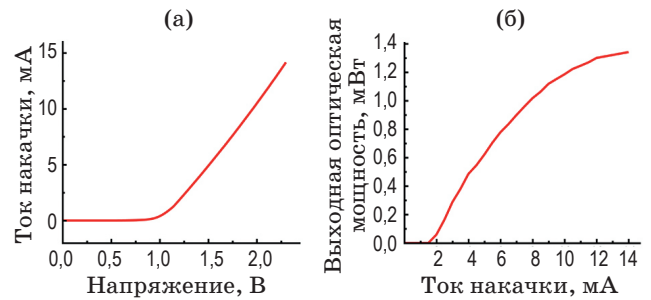


Рис. 2. Вольтамперная (а) и ватт-амперная (б) характеристика ВИЛ на основе короткопериодной сверхрешётки InGaAs/InAlGaAs спектрального диапазона 1,3 мкм; величина порогового тока составляет 1,7 мА, максимальная достигнутая выходная оптическая мощность — 1,34 мВт.

дом, исследованные в непрерывном режиме работы для диапазона токов накачки от 0 до 14 мА. ВИЛ на основе CP InGaAs/InAlGaAs демонстрируют классическое поведение ватт-амперной характеристики во всем диапазоне токов накачки с резким возрастанием выходной оптической мощности лазера при превышении порога лазерной генерации, сопровождающимся последующим насыщением при достижении высоких уровней накачки, что является следствием влияния эффекта саморазогрева лазера. Величина порогового тока составила 1,7 мА, максимально достигнутая выходная оптическая мощность на выходе из волокна — 1,34 мВт.

Радиочастотные спектры ВИЛ исследовались для всего диапазона токов накачки с использованием осциллографа Keysight UXR0204A и фотоприёмника с шириной полосы пропускания 20 ГГц. Радиочастотные спектры были получены из временных последовательностей посредством быстрого преобразования Фурье, с разрешением 1 МГц. Примеры полученных радиочастотных спектров приведены на рис. 3а, 3б, 3в. По мере повышения уровня накачки наблюдается увеличение частоты релаксационных колебаний, частота малосигнальной модуляции исследуемых ВИЛ соответствует гигагерцовому диапазону.

Анализ оптических спектров лазерной генерации (рис. 4а, 4б) производился в непрерывном режиме работы ВИЛ с использованием спектроанализатора Aragon Photonics BOSA 100 O с опорным перестраиваемым лазером Yenista Optics Tunics-T100S-HP

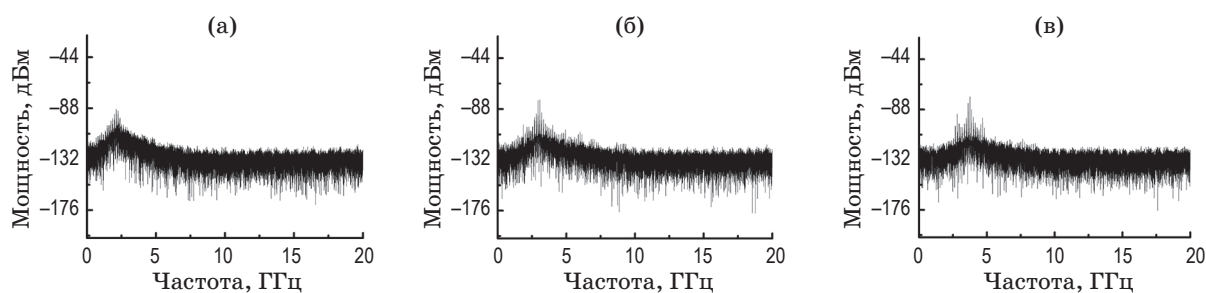


Рис. 3. Радиочастотные спектры ВИЛ при токах накачки 5 мА (а), 6 мА (б), 7 мА (в). Соответствующие значения частоты релаксационных колебаний составляют 2,12 ГГц; 3,07 ГГц; 3,75 ГГц.

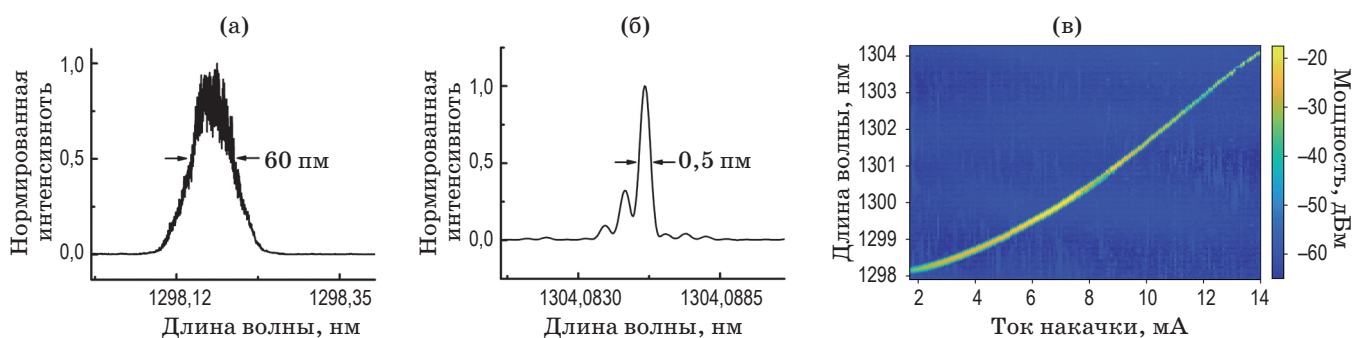


Рис. 4. Оптические спектры лазерной генерации ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм при токе накачки 1,7 мА (а) и 17 мА (б), достигнутые значения ширины пика на полувысоте указаны стрелками; двумерная диаграмма, демонстрирующая интенсивность лазерного излучения ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм на различных длинах волн при токах накачки 1,7–14 мА (в). Величина токового сдвига длины волны излучения — 0,5 нм/мА.

в диапазоне длин волн 1290–1310 нм с разрешением 40 фм. Для построения двумерной диаграммы (рис. 4в), демонстрирующей интенсивность лазерного излучения ВИЛ на различных длинах волн при токах накачки 1,7–14 мА оптические спектры регистрировались с разрешением 14,5 пм. ВИЛ на основе CP InGaAs/InAlGaAs демонстрируют одномодовую лазерную генерацию (работают в режиме эффективной генерации через фундаментальную моду). При увеличении тока накачки наблюдается длинноволновый сдвиг спектра излучения, связанный с разогревом ВИЛ при повышении уровня накачки. Величина токового сдвига длины волны излучения составила 0,5 нм/мА. Величина ширины пика на полувысоте также уменьшается по мере возрастания токов накачки от величины 60 пм вблизи порога генерации до 0,5 пм при токе накачки 17 мА.

Одним из важных аспектов при характеристике режимов лазерной генерации является

вопрос стабильности поляризации лазерного излучения. Для ВИЛ с активными зонами на основе КЯ InGaAs/In(Al)GaAs характерным является вырождение фундаментальной моды по поляризации ввиду симметрии токового и оптического ограничений [21]. Существуют различные подходы обеспечения стабильности поляризации излучения ВИЛ, к числу которых относятся асимметричная инжекция тока или применение асимметричных резонаторов для создания анизотропии оптического усиления, применение зеркал на основе высококонтрастных решёток для создания анизотропии отражения зеркал [22], использование ромбовидных оксидных токовых апертур [23]. Согласно результатам проведённых поляризационных исследований, для ВИЛ спектрального диапазона 1,3 мкм на основе CP InGaAs/InAlGaAs характерна стабильность плоскости поляризации лазерного излучения во всем диапазоне токов накачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведена характеристика режимов лазерной генерации ВИЛ в геометрии с внутрирезонаторными контактами, ЗТП диаметром 5 мкм, активной областью, содержащей СР на основе 24 чередующихся слоёв $\text{In}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{As}$ КЯ и барьерных слоёв $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,27}\text{Al}_{0,2}\text{As}$. Пороговый ток составляет 1,7 мА, выходная оптическая мощность в рабочей точке достигает значения 1,34 мВт. Показана высокая стабильность поляризационного состояния генерируемого излучения ВИЛ во всем диапазоне токов накачки. Рабочий спектральный диапазон ВИЛ — 1,3 мкм с величиной токового сдвига длины волны, не превышающей 0,5 нм/мА. Характерное значение ширины пика на полувысоте в оптическом спектре ВИЛ не превышает 0,5 пм при токе накачки 17 мА, что превосходит показанные ранее значения ширины пика на полувысоте для ВИЛ с активной областью на основе InAlGaAs КЯ [5], продемонстрированная частота малосигнальной модуляции ВИЛ с активной областью

на основе СР в гигагерцовом диапазоне сравнима с достигнутыми значениями частоты малосигнальной модуляции для ВИЛ с активной областью на основе КЯ [24]. Показанные приборные характеристики исследованного ВИЛ позволяют судить о перспективах его потенциального применения для создания устройств радиофоники, используемых в информационно-телекоммуникационных системах передачи данных со скоростью до 10 Гб/с, разработки квантовых генераторов случайных чисел. Дальнейшая оптимизация конструкции СР $\text{InGaAs}/\text{InGaAlAs}$, диаметра ЗТП и времени жизни фотона в резонаторе ВИЛ может привести к улучшению статических и динамических характеристик, повышению выходной оптической мощности ВИЛ с активной областью на основе СР в сравнении с ВИЛ с активной областью на основе InAlGaAs КЯ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин С.А., Бобров М.А., Малеев Н.А., Блохин А.А., Кузьменков А.Г., Васильев А.П., Рочас С.С., Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Ионов А.С., Егоров А.Ю., Устинов В.М. Вертикально-излучающий лазер спектрального диапазона 1,55 мкм с туннельным переходом на основе слоев $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 17. С. 21–25.
2. Леденцов Н.Н., Шукин В.А., Kalosha V.P., Ledentsov N.N.Jr., Kropp J.R., Agustin M., Блохин С.А., Блохин А.А., Бобров М.А., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Малеев Н.А. Дизайн и новая функциональность антиволноводных вертикально-излучающих лазеров на длину волны 850 нм // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 1. С. 85–94.
3. Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А., Кузьменков А.Г., Малеев Н.А., Устинов В.М., Колодезный Е.С., Рочас С.С., Бабичев А.В., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Ионов А.С., Егоров А.Ю. Влияние потерь на вывод излучения на динамические характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1,55 мкм, изготовленных методом спекания эпитаксиальных пластин // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 8. С. 1128–1134.
4. Sciamanna M., Shore K.A. Physics and applications of laser diode chaos // Nat. Photon. 2015. V. 9. № 3. P. 151–162.
5. Mereuta A., Sirbu A., Caliman A., Suruceanu G., Iakovlev V., Mickovic Z., Kapon E. Fabrication and performance of 1.3- μm 10-Gb/s CWDM wafer-fused VCSELs grown by MOVPE // J. Cryst. Growth. 2015. V. 414. P. 210–214.
6. Bimberg D., Larsson A., Joel A. Industry VCSELs // Comp. Semicond. 2014. V. 1. P. 22–26.
7. Park M.-R., Kwon O.-K., Han W.-S., Lee K.H., Park S.-J., Yoo B.-S. All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3-1.6- μm wavelength range for CWDM band applications // IEEE Photon. Tech. Lett. 2006. V. 18. № 16. P. 1717–1719.
8. Louderback D.A., Fish M.A., Klem J.F., Serkland D.K., Choquette K.D., Pickrell G.W., Stone R.V., Guilfoyle P.S. Development of bottom-emitting 1300 nm vertical-cavity surface-emitting lasers // IEEE Photon. Tech. Lett. 2004. V. 16. № 4. P. 963–965.
9. Nishida T., Takaya M., Kakinuma S., Kaneko T. 4.2 mW GaInNAs long-wavelength VCSEL grown by metal-organic chemical vapor deposition // J. Sel. Top. Quantum Electron. 2005. V. 11. № 5. P. 958–961.

10. *Shin J.-H., Yoo B.-S., Han W.-S., Kwon O.-K., Ju Y.-G., Lee J.-H.* CW operation and threshold characteristics of all-monolithic InAlGaAs 1.55- μm VCSELs growth by MOCVD // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2002. V. 14. № 8. P. 1031–1033.
11. *Shin J.-H., Kin J.-H., Song H.-W., Han I.-Y., Ju Y.-G., Han W.-S., Kwon O.-K.* Near room-temperature continuous-wave operation of all-monolithic InAlGaAs/InP 1.3 μm VCSELs // *Electron. Lett.* 2003. V. 39. № 8. P. 664–665.
12. *Freezell D., Buell D.A., Coldren L.A.* InP-based 1.3-1.6 μm VCSELs with selectively etched tunnel-junction apertures on a wavelength flexible platform // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005. V. 17. № 10. P. 2017–2019.
13. *Ramana Murty M.V., Huang X.D., Liu G.L., Lin C.C., Xu D., Shieh C.L., Lee H.C., Cheng J.* Long-wavelength VCSEL-based CWDM scheme for 10-GbE links // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005. V. 17. № 6. P. 1286–1288.
14. *Muller M., Wolf P., Grasse C., Dias M.P.J., Ortsiefer M., Bouhm G., Wong E., Hofmann W., Bimberg D., Amann M.-C.* 1.3 μm short-cavity VCSELs enabling error-free transmission at 25 gbit/s over 25 km fibre link // *Electron. Lett.* 2012. V. 48. № 23. P. 1487–1489.
15. *Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A., Suruceanu G., Mickovic Z., Caliman A., Mereuta A., Kapon E.* Control of cavity lifetime of 1.5 μm wafer-fused VCSELs by digital mirror trimming // *Opt. Exp.* 2014. V. 22. № 26. P. 32180–32187.
16. *Babichev A.V., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Blokhin S.A., Mikhailov S., Iakovlev V., Sirbu A., Stepniak G., Chorchos L., Turkiewicz J.P., Voropaev K.O., Ionov A.S., Agustin M., Ledentsov N.N., Egorov A.Yu.* 6-mW single-mode high-speed 1550-nm wafer-fused VCSELs for DWDM application // *IEEE J. Quant. Electron.* 2017. V. 53. № 6. P. 1–8.
17. *Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Babichev A.V., Gladyshev A.G., Kolodeznyi E.S., Rochas S.S., Kurochkin A.S., Bobretsova Yu.K., Klimov A.A., Denisov D.V., Voropaev K.O., Ionov A.S., Bougrov V.E., Egorov A.Yu.* Optical gain in laser heterostructures with an active area based on an InGaAs/InGaAlAs superlattice // *Opt. Spectr.* 2019. V. 127. № 6. P. 1053–1056.
18. *Блохин С.А., Неведомский В.Н., Бобров М.А., Малеев Н.А., Блохин А.А., Кузьменков А.Г., Васильев А.П., Рочас С.С., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Ионоу А.С., Егоров А.Ю., Устинов В.М.* Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 1,55 мкм, изготовленные по технологии спекания гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердотельных источников // *Физика и техника полупроводников.* 2020. Т. 54. № 10. С. 1088–1096.
19. *Blokhin S., Babichev A., Gladyshev A., Karachinsky L., Novikov I., Blokhin A., Rochas S., Denisov D., Voropaev K., Ionov A., Ledentsov N., Egorov A.* Wafer-fused 1300 nm VCSELs with an active region based on superlattice // *Electron. Lett.* 2021. V. 57. № 18. P. 697–698.
20. *Блохин С.А., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Блохин А.А., Бобров М.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Надточий А.М., Неведомский В.Н., Андрияшкин В.В., Рочас С.С., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Жумаева И.О., Устинов В.М., Егоров А.Ю., Бугров В.Е.* Исследование характеристик сверхрешетки InGaAs/InAlGaAs для вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм // *Журнал технической физики.* 2021. Т. 91. № 12. С. 2008–2017.
21. *Блохин С.А., Малеев Н.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Васильев А.П., Задиранов Ю.М., Кулагина М.М., Блохин А.А., Гусева Ю.А., Оспенников А.М., Петренко М.В., Гладышев А.Г., Егоров А.Ю., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Денисов Д.В., Устинов В.М.* Вертикально-излучающие лазеры с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной токовой апертурой для компактных атомных часов // *Квантовая электроника.* 2019. Т. 49. № 2. С. 187–190.
22. *Nakwaski W.* VCSEL structures used to suppress higher-order transverse modes // *Opto-Electron. Rev.* 2011. V. 19. № 1. P. 119–129.
23. *Бобров М.А., Малеев Н.А., Блохин С.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Лисак В., Устинов В.М.* Поляризационные характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной оксидной токовой апертурой // *Физика и техника полупроводников.* 2016. Т. 50. № 10. С. 1408–1413.
24. *Wolf P., Li H., Caliman A., Mereuta A., Iakovlev V., Sirbu A., Kapon E., Bimberg D.* Spectral efficiency and energy efficiency of pulse-amplitude modulation using 1.3 μm wafer-fusion VCSELs for optical interconnects // *ACS Photon.* 2017. V. 4. № 8. P. 2018–2024.