

Вертикально-излучающие лазеры с внутриврезонаторными контактами и ромбовидной токовой апертурой для компактных атомных часов

С.А.Блохин, Н.А.Малеев, М.А.Бобров, А.Г.Кузьменков, А.П.Васильев, Ю.М.Задиранов, М.М.Кулагина, А.А.Блохин, Ю.А.Гусева, А.М.Оспенников, М.В.Петренко, А.Г.Гладышев, А.Ю.Егоров, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, Д.В.Денисов, В.М.Устинов

Представлены результаты исследования одномодовых вертикально-излучающих лазеров с внутриврезонаторными контактами, композиционными распределенными брэгговскими зеркалами и селективно-окисленной ромбовидной токовой апертурой. Показано, что использование ромбовидной токовой апертуры обеспечивает фиксацию направления поляризации выходного излучения без использования специального поверхностного рельефа, а также эффективное сужение линии излучения при сохранении высокой дифференциальной эффективности. Разработанные вертикально-излучающие лазеры имеют выходную мощность свыше 1 мВт, пороговый ток менее 1 мА, частоту эффективной модуляции более 5 ГГц и ширину линии излучения менее 60 МГц при повышенных (65–75 °С) температурах и потенциально пригодны для использования в компактных атомных часах на основе ячеек с парама Cs.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, токовая апертура, компактные атомные часы.

В последние годы активно ведутся работы в области компактных атомных стандартов частоты и времени (так называемые атомные часы), действие которых основано на эффекте когерентного пленения населенности в атомах паров щелочных металлов (обычно рубидия или цезия) [1]. В таких устройствах в качестве лазерного источника излучения широко применяются компактные полу-

проводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ), которые позволяют получить высокое быстродействие в одномодовом режиме лазерной генерации при низком энергопотреблении. Наряду с необходимостью прецизионной настройки длины волны излучения на используемую спектральную линию (794.8 и 780 нм для линии D₁/D₂ изотопа ⁸⁷Rb или 894.3 и 852.1 нм для линии D₁/D₂ изотопа ¹³³Cs) к лазерному источнику предъявляется ряд специфических требований: это одночастотное излучение с подавлением боковых мод более 20 дБ, линейно поляризованное излучение с подавлением ортогональной поляризации более 15 дБ, ширина спектра излучения менее 100 МГц и полоса частот модуляции более 3.4 ГГц для Rb и 4.6 ГГц для Cs [2]. При этом указанные требования должны быть реализованы при повышенных температурах, соответствующих рабочим температурам компактной газовой ячейки (60–90 °С).

Для получения одномодового режима генерации ВИЛ традиционно используют оксидные токовые апертуры малого размера, обеспечивающие одновременно токовое и оптическое ограничение, что ведет к росту последовательного сопротивления и ограничению выходной оптической мощности. В условиях необходимости работы лазера при температурах 60–90 °С получение выходной оптической мощности более 0.2 мВт становится одной из ключевых проблем для таких одномодовых ВИЛ. Обеспечение узкой ширины линии лазерной генерации обычно достигается за счет снижения потерь на вывод излучения [2], что приводит к падению дифференциальной эффективности, либо в результате увеличения длины микрорезонатора [3], а значит, сопряжено с ростом внутренних оптических потерь. В рамках классической геометрии ВИЛ с легированными распределенными брэгговскими отражателями (РБО) одновременное достижение низкого уровня внутренних оптических потерь и не слишком высокого электрического сопротивления представляется трудновыполнимой задачей. Тем не менее, ранее

С.А. Блохин, М.А.Бобров, Ю.М.Задиранов, М.М.Кулагина. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26;

e-mail: blokh@mail.ioffe.ru, maleev@beam.ioffe.ru

Н.А.Малеев. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

А.Г.Кузьменков, А.П.Васильев, А.А.Блохин, Ю.А.Гусева. Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26

А.М.Оспенников. Российский институт радионавигации и времени, Россия, 192012 С.-Петербург, просп. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ

М.В.Петренко. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Российский институт радионавигации и времени, Россия, 192012 С.-Петербург, просп. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ

А.Г.Гладышев, А.Ю.Егоров, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. ООО «Коннектор Оптико», Россия, 194292 С.-Петербург, Домостроительная ул., 16, ЛИТБ

Д.В.Денисов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

В.М.Устинов. Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Россия, 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Поступила в редакцию 24 октября 2018 г., после доработки – 29 ноября 2018 г.

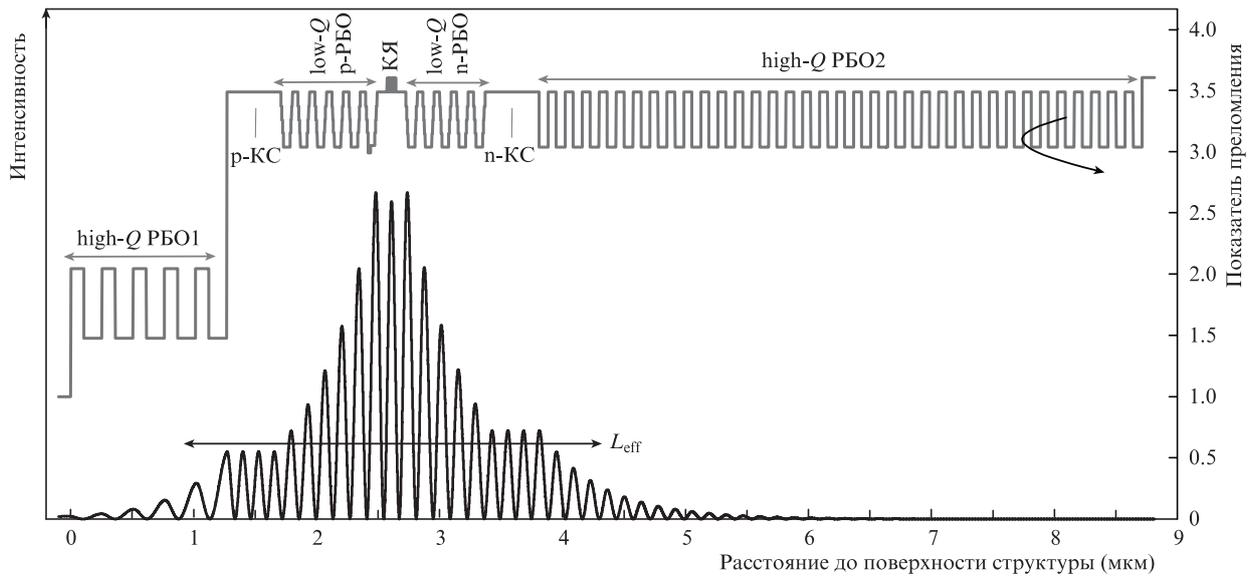


Рис. 1. Расчетное распределение электромагнитного поля стоячей волны и профиль показателя преломления в ВК-ВИЛ: high- Q РБО – высокодобротный распределенный брэгговский отражатель с высокой отражательной способностью; КЯ – квантовые ямы; КС – внутрирезонаторный контактный слой; low- Q РБО – композиционная брэгговская решетка с малым коэффициентом отражения (низкодобротный брэгговский отражатель).

мы продемонстрировали возможность решения обеих проблем в рамках модифицированной геометрии ВИЛ с внутрирезонаторными контактами (далее ВК-ВИЛ) [4].

Одним из ключевых требований для рассматриваемых приборов является фиксация направления поляризации излучения. Обычно фундаментальная мода ВИЛ на основе квантовых ям (КЯ) InAlGaAs вырождена по поляризации вследствие симметрии токового и оптического ограничений. Для фиксации поляризации излучения ВИЛ были предложены различные методы: создание латеральной анизотропии оптического усиления за счет асимметричной инжекции тока; получение поперечной анизотропии усиления вследствие асимметрии резонатора или механических напряжений; формирование анизотропии отражения выводного зеркала в результате применения зеркал на основе высококонтрастных решеток или формирования субволновой дифракционной решетки на поверхности выводного РБО [5]. В рамках последнего подхода можно также одновременно обеспечить дополнительную селекцию поперечных мод в изначально многомодовом лазере, что позволяет увеличить выходную оптическую мощность при относительно малом уровне потерь на вывод излучения [6]. Недавно нами предложен технологически более простой способ контроля поляризации выходного излучения ВК-ВИЛ в спектральной области 850 нм путем формирования оксидной токовой апертуры ромбовидной формы при использовании апертурного слоя AlAs/Al_{0,9}Ga_{0,1}As [7]. Данный подход может быть использован и для спектрального диапазона 895 нм благодаря сохранению анизотропии селективного окисления слоев AlGaAs с высоким содержанием Al.

Ниже представлены результаты разработки оригинальной конструкции ВК-ВИЛ с ромбовидной токовой апертурой для применения в компактных атомных часах на основе ячеек с парами Cs.

В конструкцию ВК-ВИЛ для линии Cs D₁ (рис.1) входят высокодобротный диэлектрический SiO₂/Ta₂O₅-РБО (high- Q РБО1), внутрирезонаторный контактный слой p-Al_{0,15}Ga_{0,85}As (p-КС), низкодобротная композиционная брэгговская решетка p-Al_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,9}Ga_{0,1}As (low- Q

p-РБО), одномодовый AlGaAs-микрорезонатор с активной областью на основе КЯ In_{0,08}Ga_{0,92}As, низкодобротная композиционная брэгговская решетка n-Al_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,9}Ga_{0,1}As (low- Q n-РБО), внутрирезонаторный контактный слой n-Al_{0,15}Ga_{0,85}As (n-КС) и высокодобротный РБО Al_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,9}Ga_{0,1}As (high- Q РБО2). Для синтеза эпитаксиальной структуры ВК-ВИЛ использовался метод молекулярно-пучковой эпитаксии в системе материалов InAlGaAs на подложке GaAs. Как видно из рис.1, внедрение композиционных брэгговских решеток с малым коэффициентом отражения между внутрирезонаторными контактными слоями и микрорезонатором позволяет перераспределить электромагнитное поле и не только снизить уровень внутренних оптических потерь, связанных с поглощением на свободных носителях, но и существенно увеличить эффективную длину резонатора L_{eff} , что позволяет сузить линию лазерной генерации при сохранении высокой дифференциальной эффективности [8]. Особенности технологического процесса изготовления ВК-ВИЛ приведены в работе [9]. Анализ картин ближнего поля лазеров в режиме спонтанного излучения и наблюдение оптического контраста в латеральном направлении между полупроводниковым слоем AlGaAs и оксидом AlGaO при ИК освещении выявили наличие ярко выраженной ромбовидной формы оксидной токовой апертуры с отношением диагоналей в диапазоне 0.8–0.85. Анизотропия процесса селективного окисления фиксирует следующую ориентацию ромба: его большая диагональ соответствует кристаллографическому направлению [110], а меньшая диагональ – направлению $[\bar{1}10]$. В дальнейшем в качестве характерного размера оксидной токовой апертуры принята величина большой диагонали ромба.

На рис.2 приведены вольт- и ватт-амперные характеристики ВК-ВИЛ с характерным размером токовой оксидной апертуры 2.5 мкм, измеренные в непрерывном режиме работы при различных температурах. В силу малой площади токовой оксидной апертуры такие ВИЛ обладают высокими значениями тепловых сопротивлений (как правило, 7–8 К/Вт) и плотностей тока (десятки кА/см²).

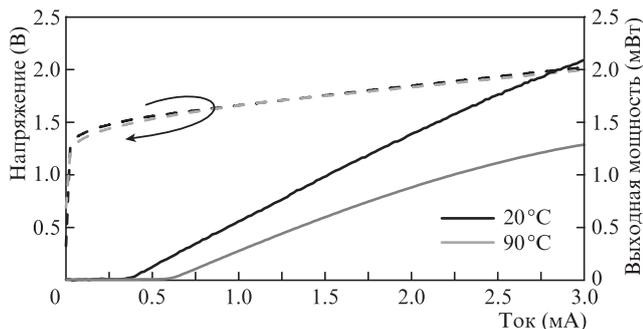


Рис.2. Вольт- и ватт-амперные характеристики ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм, измеренные при различных температурах.

Учитывая существенное ускорение деградационных процессов в полупроводниковых лазерах с ростом плотности тока и температуры, при исследованиях характеристик кристаллов ВК-ВИЛ выбран диапазон максимальных значений рабочих токов на уровне не более 50% – 70% от величины тока насыщения ватт-амперной характеристики, обусловленного сильным саморазогревом. С увеличением температуры наблюдается заметный рост порогового тока, сопровождающийся падением дифференциальной эффективности, что обусловлено уходом резонансной длины волны вертикального микрорезонатора ВК-ВИЛ от максимума спектра усиления активной области. Тем не менее, исследованные приборы демонстрируют лазерную генерацию с дифференциальной эффективностью более 0.5 Вт/А и субмиллиамперным пороговым током при повышенных температурах, что позволяет достичь более высокой оптической мощности (свыше 0.5 мВт при токах 2–3 мА) по сравнению с коммерчески доступными ВИЛ для линии Cs D₁ [6, 10]. При этом общее энергопотребление лазеров не превышает 6 мВт.

Согласно результатам поляризационных исследований изготовленных лазеров поляризация излучения ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм фиксируется вдоль ее меньшей диагонали, совпадающей с кристаллографическим направлением $[\bar{1}10]$, что коррелирует с ранее полученными результатами для одномодовых ВК-ВИЛ спектрального диапазона 850 нм [6]. На рис.3 представлены зависимости фактора подавления ортогональной поляризации (OPSR) от тока накачки. С увеличением температуры наблюдается небольшое падение значения OPSR, что, по-видимому,

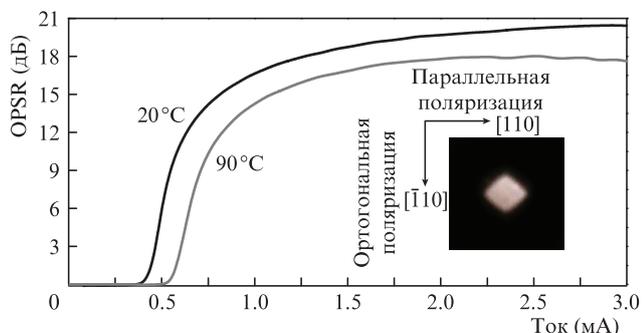


Рис.3. Зависимости коэффициента подавления ортогонально-поляризованной моды OPSR от тока накачки для ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм. На вставке приведено изображение ближнего поля в допороговом режиме и указаны характерные кристаллографические направления.

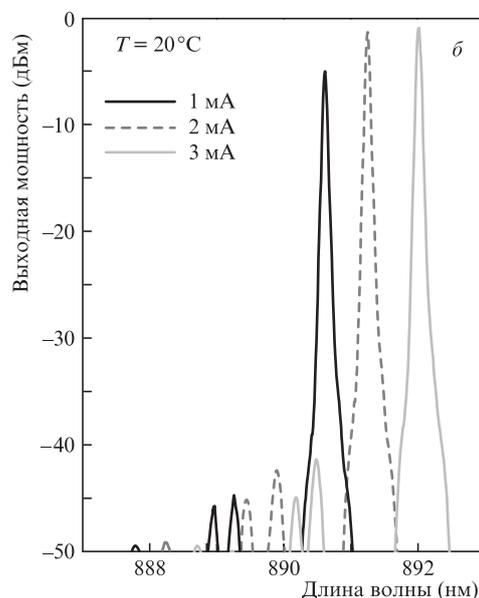
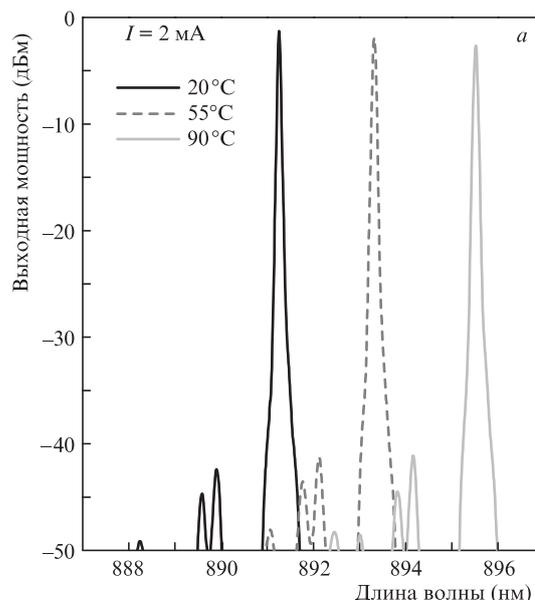


Рис.4. Спектры лазерной генерации ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм при различных температурах (а) и токах накачки (б).

обусловлено ростом относительной доли спонтанного излучения в условиях высоких потерь на вывод излучения. Следует отметить, что величина OPSR превышает уровень 15 дБ во всем рабочем диапазоне токов даже при повышенной температуре.

Анализ спектров излучения ВК-ВИЛ с характерным размером токовой оксидной апертуры 2.5 мкм при различных токах накачки и температурах выявил одномодовый характер лазерной генерации с фактором подавления боковых мод (SMSR) более 35 дБ во всем рабочем диапазоне токов накачки (рис.4). Перестройка длины волны генерации с током накачки и контроль температуры лазера позволяют точно попасть в длину волны линии Cs D₁. Так, например, рабочая точка для данного прибора соответствует току 2 мА и температуре 70 °С.

В компактных атомных часах на основе ячейки с парами Cs рабочий ток ВК-ВИЛ необходимо модулировать на частоте 4.596 ГГц с целью обеспечения при одновремен-

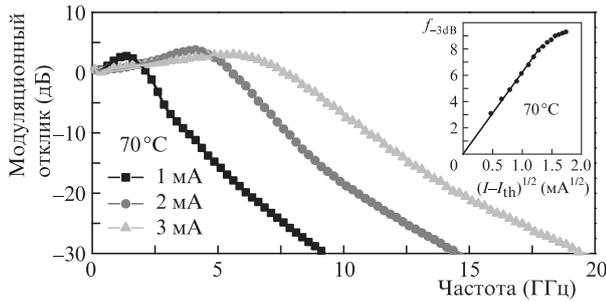


Рис.5. Амплитудно-частотные характеристики ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм, измеренные при температуре 70°C. На вставке приведена зависимость частоты эффективной модуляции $f_{-3\text{дВ}}$ от превышения тока накачки над пороговым током I_{th} .

ной накачке двух оптических переходов сверхтонкого расщепления спектральных линий в магнитном поле на величину 9.192 ГГц. На рис.5 приведены результаты малосигнального частотного анализа ВК-ВИЛ вблизи рабочей точки. Частота эффективной модуляции по уровню -3 дБ растет с током накачки со скоростью 6.2 ГГц/мА^{1/2} (см. вставку на рис.5) и превышает 5 ГГц уже при относительно малых (~ 1.2 мА) токах накачки. Следует отметить, что максимальная частота эффективной модуляции превышает 8 ГГц и лимитирована двумя факторами: насыщением резонансной частоты с ростом тока накачки вследствие сильного саморазогрева и относительно низкой паразитной частотой фильтра низких частот, образованного элементами электрической схемы лазера (вследствие большой емкости пассивных областей и относительно высокого последовательного сопротивления приборов).

На рис.6 приведена зависимость ширины линии излучения ВК-ВИЛ с характерным размером токовой оксидной апертуры 2.5 мкм от обратной оптической мощности P^{-1} при температуре 20°C, измеренная с помощью сканирующего интерферометра Фабри – Перо Thorlabs SA-200. С ростом тока накачки сперва наблюдается падение ширины линии излучения обратно пропорционально выходной оптической мощности, однако при обратной мощности менее 1 мВт⁻¹ происходит насыщение зависимости с последующим уширением линии генерации, что, по-видимому, обусловлено увеличением α -фактора при повышенной плотности носителей и фотонов в микрорезонаторе [11]. Тем не менее, благодаря увеличению эффективной длины микрорезонатора ширина линии генерации лазера в диапазоне токов накачки 1–3 мА не превышает

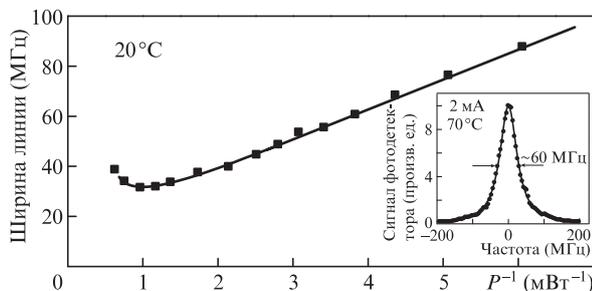


Рис.6. Зависимость ширины линии излучения от тока накачки для ВК-ВИЛ с характерным размером ромбовидной токовой оксидной апертуры 2.5 мкм, измеренная при температуре 20°C. На вставке приведена характерная ширина спектра лазерной генерации, измеренная в рабочей точке.

45 МГц, что коррелирует с данными для ВИЛ с классической геометрией микрорезонатора, с легированными РБО и низкими потерями на вывод излучения [2]. Следует отметить, что дальнейшее снижение потерь на вывод излучения позволяет заметно сузить линию излучения ВК-ВИЛ до уровня 20–25 МГц. Конструкция компактных атомных часов обуславливает необходимость функционирования лазера при температуре, близкой к температуре газовой ячейки, что может быть сопряжено с нежелательным ростом α -фактора [12] из-за падения дифференциального усиления активной области с ростом температуры и, как следствие, с уширением линии излучения лазера [13]. Согласно результатам измерения спектров излучения исследуемых ВК-ВИЛ при повышенной температуре ширина линии излучения не превышает 60 МГц вблизи рабочей точки (см. вставку на рис.6).

Таким образом, успешно апробирована конструкция вертикально-излучающего лазера в геометрии с внутрирезонаторными контактами, низкодобротными композиционными брэгговскими решетками и ромбовидной токовой апертурой, позволяющая реализовать одномодовый режим генерации с фиксированной поляризацией излучения вблизи линии Cs D₁. В рабочей точке выходная оптическая мощность лазера достигает 1 мВт, частота эффективной модуляции превышает 5 ГГц, а ширина линии излучения не превышает 60 МГц. По совокупности достигнутых приборных характеристик разработанные ВК-ВИЛ потенциально пригодны для применения в компактных атомных часах на основе ячеек с парами Cs, а также для различных задач оптической спектроскопии, где необходимы сверхузкие линии оптического излучения.

1. Kitching J. *Appl. Phys. Rev.*, **5** (3), 031302 (2018).
2. Serkland D.K., Geib K.M., Peake G.M., Lutwak R., Rashed A., Varghese M., Tepolt G., Prouty M. *Proc. SPIE*, **6132**, 613208 (2006).
3. Serkland D.K., Keeler G.A., Geib K.M., Peake G.M. *Proc. SPIE*, **7229**, 722907 (2009).
4. Блохин С.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Карповский И.О. и др. *Письма в ЖТФ*, **42** (20), 57 (2016).
5. Nakwaski W. *Opto-Electron. Rev.*, **19** (1), 119 (2011).
6. Gruet F., Al-Samaneh A., Kroemer E., Bimboes L., Miletic D., Affolderbach C., Wahl D., Boudot R., Miletic G., Michalzik R. *Opt. Express*, **21** (5), 5781 (2013).
7. Бобров М.А., Малеев Н.А., Блохин С.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., и др. *ФТП*, **50** (10), 1408 (2016).
8. Блохин С.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Малеев Н.А., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Леденцов Н.Н., Устинов В.М. *Письма в ЖТФ*, **44** (1), 67 (2018).
9. Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Васильев А.П., Блохин С.А., Шуленков А.С., Трошков С.И. и др. *ФТП*, **47** (7), 985 (2013).
10. Kroemer E., Rutkowski J., Maurice V., Vicarini R., Abdel Hafiz M., Gorecki C., Boudot R. *Appl. Opt.*, **55** (31), 8839 (2016).
11. Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А., Кузьменков А.Г., Васильев А.П., Задиранов Ю.М., Европейцев Е.А., Сахаров А.В., Леденцов Н.Н., Карачинский Л.Я., Оспенников А.М., Малеев Н.А., Устинов В.М. *ФТП*, **52** (1), 98 (2018).
12. Halbritter H., Shau R., Riemenschneider F., Kögel B., Ortsiefer M., Rosskopf J., Böhm G., Maute M., Amann M.-C., Meissner P. *Electron. Lett.*, **40** (20), 1266 (2004).
13. Shau R., Halbritter H., Riemenschneider F., Ortsiefer M., Rosskopf J., Böhm G., Maute M., Meissner P., Amann M.-C. *Electron. Lett.*, **39** (24), 1728 (2003).