

ЛАЗЕРЫ И АКТИВНЫЕ СРЕДЫ

Перестраиваемый источник одночастотного излучения на основе массива РОС-лазеров для спектрального диапазона 1.55 мкм

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, А.Д.Андреев, Е.А.Когновицкая, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, А.Г.Гладышев, Д.В.Денисов, К.О.Воропаев, А.С.Ионов, А.В.Бабичев, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, В.И.Кучинский, А.Ю.Егоров, Г.С.Соколовский

Представлены результаты разработки технологии и исследования характеристик массивов полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью для спектрального диапазона 1.55 мкм. Продемонстрирована устойчивая одночастотная генерация с коэффициентом подавления боковых мод более 25 дБ. Показана возможность непрерывной перестройки длины волны генерации до 7 нм.

Ключевые слова: распределенная обратная связь, одночастотная генерация, линейка лазеров, коэффициент подавления боковых мод, полупроводниковый лазер.

1. Введение

Источники одночастотного излучения на основе полупроводниковых лазеров спектральной области 1.55 мкм являются критически важными компонентами волоконно-оптических линий связи. Наиболее компактными, надежными и обеспечивающими крайне узкую ширину линии генерации являются полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью (РОС) [1, 2]. Экспериментальные исследования и разработки по созданию таких лазеров были начаты еще в 70–80-х гг. прошлого века [3, 4]. Дальнейшее развитие технологии РОС-лазеров позволило создавать лазеры с очень высоким коэффициентом связи [5, 6], что обеспечило чрезвычайно стабильную

одночастотную генерацию, а также повысило выход годных приборов. В настоящее время устойчивый интерес к данному типу полупроводниковых лазеров связан с новой концепцией универсальности компонентов в телекоммуникационных сетях [7], которая подразумевает использование в качестве передатчиков перестраиваемых одночастотных лазеров. Помимо технологии РОС-лазеров существует несколько альтернативных направлений развития перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров, среди которых можно выделить применение миниатюрных внешних резонаторов [8, 9] и управляемого распределенного брегговского отражателя [10]. Перестройка длины волны генерации РОС-лазера может осуществляться в основном за счет изменения температуры его активной области. Хорошо известно, что скорость температурной перестройки длины волны генерации в спектральной области 1.55 мкм составляет ~ 0.1 нм/К, что ограничивает спектральный диапазон перестройки величиной 2–3 нм, т. к. существенный нагрев приводит к резкому падению ватт-амперной характеристики и падению выходной мощности [11]. В связи с этим наиболее перспективным подходом для получения перестраиваемых одночастотных источников излучения в области 1.55 мкм является создание массивов РОС-лазеров с индивидуальным периодом решетки распределенной обратной связи у каждого излучателя. Ведущиеся активные исследования таких лазеров показали перспективность данного подхода для создания одночастотных перестраиваемых лазеров, излучающих в указанной спектральной области [12–14].

2. Экспериментальные образцы

Для создания линеек РОС-лазеров был выбран метод двухстадийного эпитаксиального процесса, подразумевающий прерывание эпитаксиального роста гетероструктуры после выращивания волноводного слоя, формирование на нем дифракционных решеток РОС и последующее эпитаксиальное наращивание. Гетероструктуры для линеек РОС-лазеров были выращены в ООО «Коннектор Оптик» на промышленной установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber 49. Там же производилось наращивание полупроводниковых пластин со сформиро-

В.В.Дюделев, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: gs@mail.ioffe.ru
Д.А.Михайлов, Д.В.Денисов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
А.Д.Андреев, А.Ю.Егоров. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49
Е.А.Когновицкая. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
А.Г.Гладышев. ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16
К.О.Воропаев. АО «ОКБ-Планета», Россия, 173004 Великий Новгород, Большая Московская ул., 13а; Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Россия, 173003 Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41
А.С.Ионов. АО «ОКБ-Планета», Россия, 173004 Великий Новгород, Большая Московская ул., 13а
А.В.Бабичев. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16
И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г., после доработки – 16 октября 2019 г.

ванными на них дифракционными решетками для линеек РОС-лазеров.

Как показано ранее [15], для обеспечения высокой стабильности одночастотной генерации при температурной перестройке спектра излучения РОС-лазера требуется формировать решетку вблизи активной области (для обеспечения высокого коэффициента связи). Как следствие, при формировании РОС-лазера по технологии зарастивания уровень вносимых оптических потерь может существенно превышать уровень оптических потерь при формировании решетки на поверхности верхней обкладки волновода, что требует использования активной области с высоким коэффициентом усиления. Двойные гетероструктуры с объемным слоем на основе четверных твердых растворов InGaAsP демонстрируют высокий уровень усиления, что и предопределяет их выбор при отработке технологии зарастивания дифракционной решетки методом МПЭ и формирования массива полупроводниковых лазеров с РОС для спектральной области 1.55 мкм, обеспечивающих одночастотный режим генерации. Подробное описание структуры приведено в работе [15].

После выполнения первой стадии эпитаксиального выращивания гетероструктур на них в АО «ОКБ-Планета» методом электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) были сформированы дифракционные решетки обратной связи, шаг которых составлял 468.6, 468, 467.4 и 466.8 нм. Для проведения операции ЭЛЛ использовалась установка Raith Voyager. Данная система предназначена для формирования изображений в пленке электронно-чувствительных резистов (электронрезистов) с минимальным размером топологического элемента вплоть до 10 нм. В составе литографа применена система электростатического отклонения электронного луча совместно с паттерн-генератором, работающим на частоте 50 МГц, что позволяет достичь скорости обработки до $1 \text{ см}^2/\text{ч}$ (при 50%-ном заполнении области экспонирования). Размер поля экспонирования составляет до 500 мкм с динамической коррекцией параметров в режиме реального времени. Установка позволяет проводить экспонирование без согласования полей экспонирования, что является важным при изготовлении протяженных элементов, таких как оптические волноводы и повторяющиеся структуры типа фотонных кристаллов, к которым относятся дифракционные решетки РОС. Помимо выполнения функции литографа, данная система может использоваться в качестве электронного микроскопа с предельным увеличением до $100000\times$. Кроме того, имеется возможность выполнять измерения под различными углами к поверхности исследуемого образца.

Для определения наилучшей дозы экспонирования с целью получения качественной маски в электронном резисте и последующего формирования решеток РОС, были созданы маски при дозе экспонирования 75, 80 и 85 мкКл/см (рис.1). Как видно из фотографий, наиболее подходящая доза экспонирования для получения качественной маски в электронном резисте для создания решеток РОС равна 85 мкКл/см.

Для создания периодической структуры и формирования РОС в волноводной области лазера, состоящей из четверного твердого раствора InGaAsP толщиной 120 нм, необходимо получить мезаструктуру глубиной ~ 80 нм. Как показали проведенные эксперименты, наиболее эффективным методом для получения качественных решеток РОС является метод плазмохимического травления.

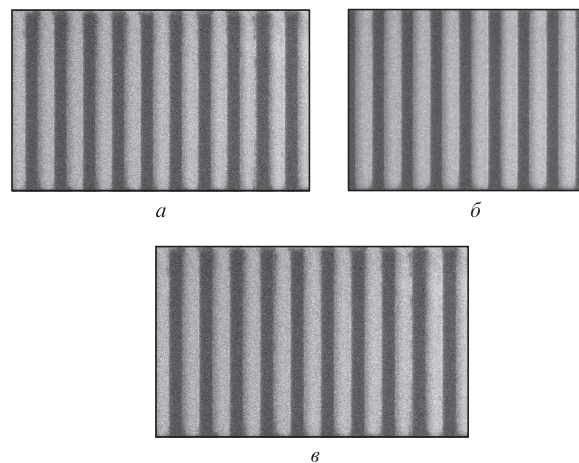


Рис.1. СЭМ-фотографии решетки РОС-лазера при дозах экспонирования 75 (а), 80 (б) и 85 мкКл/см (в).

Плазмохимическое травление проводилось на установке Sentech SI500 в индуктивно связанной плазме. Однако качественное травление, при котором отсутствуют сильный наклон боковой стенки штрихов решетки, а также развитая морфология дна, требовала нагрева образцов, что приводило к деградации резистивной маски на основе электронного резиста. Данное обстоятельство требовало подбора так называемой жесткой маски. Проведенные исследования показали, что двуслойная жесткая маска, состоящая из SiO_2 толщиной 50 нм и Al толщиной 30 нм, позволяет получать дифракционные решетки обратной связи высокого качества. Слой алюминия являлся маской для травления SiO_2 . Топологическая маска в слое Al для травления SiO_2 формировалась методом взрывной литографии. В качестве маски для взрывной литографии применялся двуслойный резист, состоящий из резиста LOR 1A и позитивного электронного резиста PMMA 600K. Полученная таким образом топологическая маска в Al приведена на рис.2,а.

На рис.2,б показана фотография дифракционной решетки РОС, полученной методом плазмохимического травления в индуктивно связанной плазме волноводного слоя $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ через жесткую комбинированную маску на основе SiO_2/Al . Описанный метод позволяет получать дифракционные решетки РОС высокого качества с глубиной рельефа до 80 нм. Столь большая глубина травления, как было показано в работе [15], позволяет получать коэффициент связи ~ 400 , что, в свою очередь, обеспечивает высокую стабильность одночастотной генерации

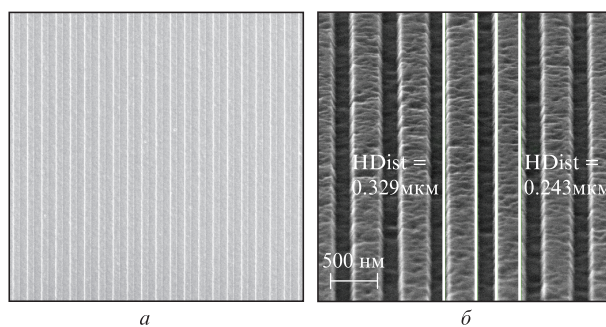


Рис.2. СЭМ-изображения маскирующего покрытия на основе Al (а) и изготовленной при помощи плазмохимического травления решетки РОС (б).

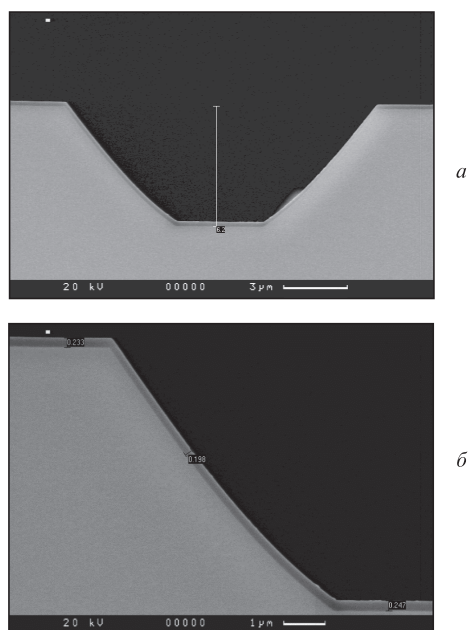


Рис.3. СЭМ-изображения мезоканавки, сформированной жидкостным травлением на гетероструктуре РОС-лазеров (а), и мезоканавки с напыленным диэлектриком (б).

при температурной перестройке спектра излучения. В итоге на пластине были сформированы дифракционные решетки РОС с четырьмя различными периодами. Поперечный размер области формирования решетки равнялся 50 мкм, расстояние между соседними решетками было 200 мкм. Таким образом, скважность заполнения пластины составила 20%, что позволило существенно уменьшить время ЭЛЛ. Области формирования решеток чередовались так, чтобы обеспечить формирование массивов из четырех излучателей с различными длинами волн генерации.

Следующим шагом в изготовлении экспериментальных образцов массивов РОС-лазеров был процесс эпитаксиального зарастивания полупроводниковых пластин с вытравленными на них дифракционными решетками. На лазерных структурах были выращены слой эмиттера и контактный слой. Описание слоев приведено в работе [15].

Финальным этапом в изготовлении образцов массивов РОС-лазеров являлось формирование полосок с последующим разделением пластин на отдельные чипы и пайкой чипов на первичные теплоотводы. В связи с тем, что на пластине были сформированы области дифракционных решеток с разным шагом, еще на этапе формирования решеток были заложены метки совмещения, кото-

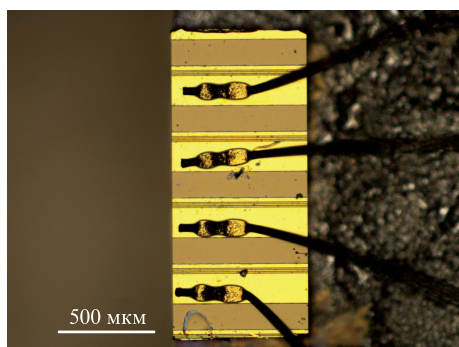


Рис.4. Фотография чипа массива РОС-лазеров из четырех излучателей на первичном теплоотводе.

рые позволили на уже зарощенной пластине методами фотолитографии и жидкостного травления сформировать над дифракционными решетками полоски шириной 5 мкм. Полоски были сформированы за счет травления в гетероструктуре неглубоких мезоканавок. На рис.3,а представлено изображение сформированной мезоканавки в гетероструктуре РОС-лазеров. Затем на структуру напылялся диэлектрик SiO_2 , а на вершине полосок были вскрыты окна для формирования верхнего контакта. На рис.3,б приведено изображение мезоканавки с напыленным диэлектриком. Фотография сделана до этапа вскрытия окон под верхний контакт.

После формирования полосок структура разделялась на отдельные лазерные чипы длиной 0.5 мм, содержащие в себе по четыре излучателя. Чипы затем напаялись на первичный теплоотвод. Фотография массива РОС-лазеров из четырех излучателей, напаянного на теплоотвод, приведена на рис.4. Чипы напаялись общим контактом, сформированным со стороны подложки. Такой монтаж хоть и затрудняет отведение тепла от лазера, но позволяет индивидуально управлять каждым из лазеров массива.

3. Эксперимент

Полученные образцы массивов РОС-лазеров исследовались в импульсном режиме. Длительность импульса тока накачки составляла 90 нс, частота следования 48 кГц. Исследуемые образцы монтировались на медный теплоотвод, температура которого стабилизировалась при помощи термоэлектрического охладителя.

Измерения ватт-амперных характеристик (ВтАХ) показали, что при комнатной температуре пороговые токи отдельных излучателей находятся в пределах 500–700 мА, а их выходные мощности превышают 100 мкВт. Малость выходной оптической мощности лазеров обусловлена сильным разогревом гетероструктуры вследствие больших пороговых токов. Регистрация мощности осуществлялась калиброванным измерителем мощности Newport 841PE с германиевым фотодетектором Newport 818-IR. Типичная ВтАХ массива РОС-лазеров при температуре 288 К приведена на рис.5.

Исследования спектральных характеристик проводились на монохроматоре МДР-23 с дифракционной решеткой 600 мм^{-1} . В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод Фд-7Г. Для уменьшения влияния паразитной засветки на качество измерений использовалась техника синхронного детектирования. Размер вход-

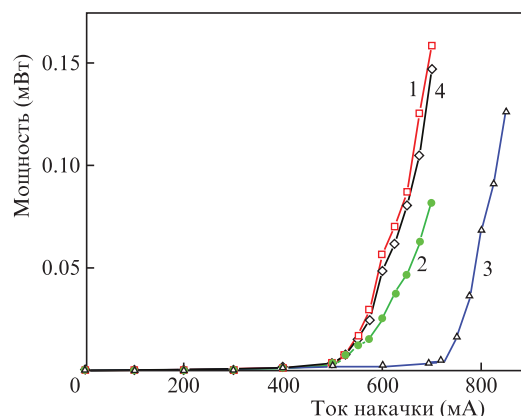


Рис.5. Типичная ватт-амперная характеристика массива РОС-лазеров при комнатной температуре; 1–4 – номера лазеров в чипе.

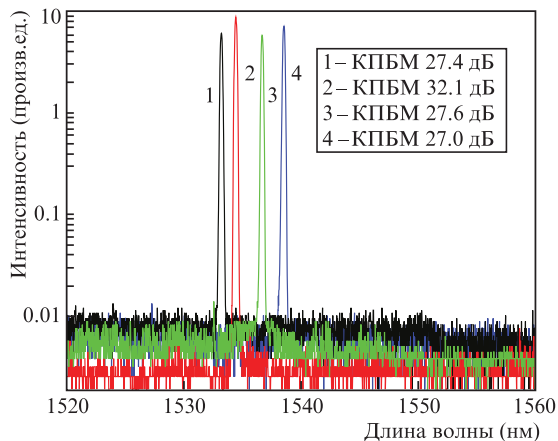


Рис.6. Типичный спектр излучения массива РОС-лазеров при комнатной температуре.

ной/выходной щели составлял 0.1 мм, что обеспечивало спектральное разрешение 0.26 нм. Выбор размера щелей монохроматора определялся на основе следующих параметров: во-первых, получаемое разрешение должно быть меньше межмодового расстояния резонатора Фабри–Перо длиной 0.5 мм (образуемого сколотыми выходными гранями чипа), а во-вторых, необходимо обеспечивать высокое соотношение сигнал/шум, что, в свою очередь, дает возможность измерения высокого коэффициента подавления боковых мод (КПБМ). Исследования спектральных характеристик показали наличие устойчивой одночастотной генерации при комнатной температуре у всех излучателей массива. КПБМ составлял более 25 дБ.

Типичный спектр излучения массива из четырех РОС-лазеров приведен на рис.6. Полный перекрываемый спектр (т.е. спектральное расстояние между линиями индивидуальных излучателей массива) при одной и той же температуре составил ~5.5 нм, что близко к расчетному значению 6 нм. Отклонение спектрального расстояния между самой коротковолновой и длинноволновой линиями от расчетного объясняется, по-видимому, небольшим отклонением значения эффективного показателя преломления, используемого в расчетах, от его реального значения. Полученные данные спектральных измерений показали, что экспериментальные образцы массивов РОС-лазеров могут использоваться в качестве перестраиваемых

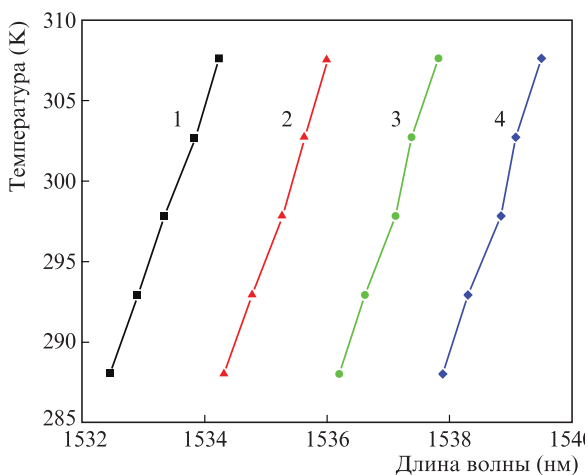


Рис.7. Зависимость длины волны излучения от температуры для каждого из излучателей массива РОС-лазеров.

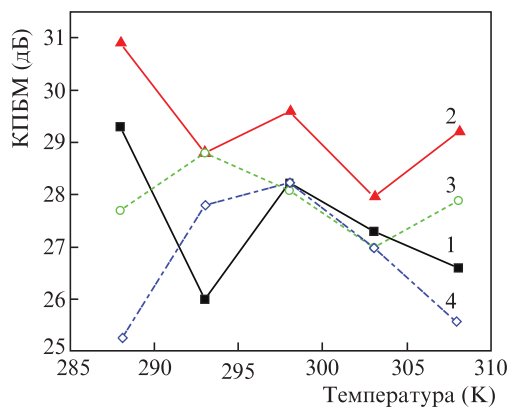


Рис.8. Коэффициент подавления боковых мод в зависимости от температуры для каждого из излучателей массива РОС-лазеров.

одночастотных источников лазерного излучения в спектральной области 1.55 мкм.

Исследования температурной перестройки излучения массива РОС-лазеров проводились в диапазоне 288–308 К (15–35°C). На рис.7 показана спектральная перестройка каждого из излучателей массива РОС-лазеров в зависимости от температуры излучателя. Хорошо видно, что, независимо управляя каждым из излучателей массива, можно получить непрерывную перестройку длины волны излучения шириной 7 нм. Исследования показали высокое (более 25 дБ) значение коэффициента подавления боковых мод для каждого из излучателей во всем температурном диапазоне. Зависимость КПБМ от температуры для каждого из излучателей массива показана на рис.8.

Следует отметить, что разработанная технология может быть с успехом использована для создания массивов мощных одночастотных широкоапертурных РОС-лазеров с искривленными штрихами дифракционной решетки обратной связи [16, 17].

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлена технология изготовления массивов РОС-лазеров для спектральной области 1.55 мкм. Полученные образцы массивов РОС-лазеров обладают устойчивой одночастотной генерацией с коэффициентом подавления боковых мод более 25 дБ. Проведенные исследования спектральных характеристик в температурном диапазоне 288–308 К продемонстрировали возможность получения непрерывной перестройки излучения в спектральном диапазоне шириной 7 нм при сохранении высокого (более 25 дБ) КПБМ, что показывает возможность применения разработанной технологии для создания перестраиваемых источников одночастотного лазерного излучения в спектральной области 1.55 мкм. Высокие пороговые токи лазеров, полученные в ходе эксперимента, обусловлены использованием конструкции активной области на основе двойной гетероструктуры, для которой, наряду с высоким модальным усилением, характерны высокий ток прозрачности и, как следствие, высокий пороговый ток. Создание перестраиваемых источников одночастотного лазерного излучения в спектральной области 1.55 мкм на основе разработанной технологии заравнивания гетероструктур методом МПЭ и формирования массивов РОС-лазеров возможно за счет использования в дальнейшем квантово-

размерных активных областей [18, 19], обеспечивающих высокие усилительные свойства, а также меньшие плотности пороговых токов и, следовательно, меньший разогрев кристалла в сравнении с конструкцией, использующей объемную активную область.

1. Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А. *ФТП*, **6**, 1359 (1972) [*Sov. Phys. Semicond.*, **6**, 1184 (1972)].
2. Kogelnik H., Shank C.V. *J. Appl. Phys.*, **43**, 2327 (1972).
3. Алферов Ж.И., Гуревич С.А., Клепикова Н.В., Кучинский В.И., Мизеров М.Н., Портной Е.Л. *Письма в ЖТФ*, **1**, 645 (1975) [*Sov. Tech. Phys. Lett.*, **1**, 286 (1975)].
4. Барышев В.И., Голикова Е.Г., Дураев В.П., Кижаев К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 2196 (1988) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **18**, 1376 (1988)].
5. Hillmer H., Hansmann S., Burkhard H. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 534 (1990).
6. Hillmer H., Hansmann S., Burkhard H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1753 (1991).
7. <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-ITLA-MSA-01.3.pdf>.
8. Sato K., Mizutani K., Sudo S., Tsuruoka K., Naniwae K., Kudo K. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 2226 (2007).
9. Liu A.Q., Zhang X.M. *Micromech. Microeng.*, **17**, R1 (2007).
10. Yagi H., Kaneko T., Kono N., Yoneda Y., Uesaka K., Ekawa M., Takechi M., Shoji H. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24**, 6100411 (2018).
11. Zhang C., Liang S., Zhu H., Wang W. *Opt. Laser Technol.*, **54**, 148 (2013).
12. Gotoda M., Takabayashi M., Horiguchi Y., Matsumoto K., Ishimura E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **23**, 6000406 (2017).
13. Pezeshki B., Vail E., Kubicky J., Yoffe G., Zou S., Heanue J., Epp P., Rishon S., Ton D., Faraji B., Emanuel M., Hong X., Sherback M., Agrawal V., Chipman C., Razazan T. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14**, 1457 (2002).
14. Tsuzuki K., Shibata Y., Kikuchi N., Ishikawa M., Takako Yasui, Ishii H., Yasaka H. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 521 (2009).
15. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Чистяков Д.В., Когновицкая Е.А., Лютецкий А.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Воропаев К.О., Ионов А.С., Бабичев А.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С. *Квантовая электроника*, **49**, 801 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 801 (2019)].
16. Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Birkin D.J.L., Sibbett W. *Opt. Quantum Electron.*, **31**, 215 (1999).
17. Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Birkin D.J.L., Sibbett W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 1412 (2000).
18. Babichev A.V., Karachinsky L.Y., 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. *IEEE J. Quantum Electron.*, **53**, 1 (2017).
19. Бабичев А.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Блохин С.А., Михайлов С., Иakovlev В., Сирбу А., Степняк Г., Чорчос Л., Туркiewicz Ж.П., Воропаев К.О., Ионов А.С., Агустин М., Ледентсов Н.Н., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **44**, 59 (2018) [*Techn. Phys. Lett.*, **44**, 24 (2018)].