

УДК 621.373.8

В.П. Дураев, С.А. Воронченко, И.С. Молодцов

АО «Нолатех», Москва, Россия

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МОДУЛЬ НА БАЗЕ ДВУХПРОХОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 1550 НМ

Представлены результаты работ по созданию перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазерных модулей на длину волны 1550 нм с внешним резонатором на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), сформированных в одномодовом волоконном световоде. Рассмотрены способы дискретной и плавной перестройки длины волны излучения. Представленные лазерные модули способны генерировать динамически стабильное одночастотное излучение с подавлением боковой моды более 40 дБ, шириной линии генерации менее 100 кГц и выходной оптической мощностью более 50 мВт. Перестройка длины волны спектра излучения лазерного модуля составила 1,5 нм.

Ключевые слова: одночастотный перестраиваемый лазер, перестройка длины волны излучения, волоконные брегговские решетки.

V.P. Duraev, S.A. Voronchenko, I.S. Molodtsov

Nolatech JSC, Moscow, Russia

TUNABLE SINGLE-FREQUENCY SEMICONDUCTOR LASER MODULE BASED ON TWO-PASS 1550 NM WAVELENGTH AMPLIFIER

The results of work on the creation of tunable single-frequency semiconductor laser modules for a wavelength of 1550 nm with an external cavity based on fiber Bragg gratings (FBGs) formed in a single-mode fiber are presented. The methods for discrete and smooth tuning of the radiation wavelength are considered. The presented laser modules are capable of generating dynamically stable single-frequency radiation with a side mode suppression of more than 40 dB, a lasing line width less than 100 kHz, and an output optical power of more than 50 mW. The wavelength tuning of the radiation spectrum of the laser module was 1.5 nm.

Keywords: single-frequency tunable laser, tuning of the radiation wavelength, fiber Bragg gratings.

Введение

В последние 20 лет начался период массового применения инжекционных лазеров. Компактность, быстродействие, эффективность и простота устройства – вот свойства, которые реализуются в волоконно-оптической связи, системах памяти и т.д. При этом актуаль-

ными являются физические исследования и новые разработки, направленные на выявление и использование предельных возможностей лазеров, на удовлетворение более высоких требований.

Возможность выделения одной частоты и плавная ее перестройка позволили найти применение в различных областях научных исследований, таких как спектроскопия высокого разрешения; аналитическая спектроскопия и, в частности, обнаружение загрязнений атмосферы; измерительная интерферометрия; датчики; научное приборостроение и аппаратура медицинского диагностирования; оптическая накачка лазеров на основе кристаллов и стекол, активированных редкоземельными ионами, в первую очередь неодимом, иттербием и эрбием [1]. Также была продемонстрирована возможность применения перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров в качестве затравочного источника излучения для одночастотных импульсных твердотельных ND:YAG лазеров с шириной линии менее 100 МГц. [2].

Создание лазерного модуля

На первом этапе создания полупроводниковых перестраиваемых лазеров использовались лазерные диоды (ЛД) с коротким резонатором (100–200 мкм). Учитывая, что межмодовый интервал для таких излучателей велик, разница в усилении соседних мод достигает значительной величины. В результате спектр излучения лазеров с коротким резонатором обычно имеет одну продольную моду. Перестройка длины волны таких лазеров осуществлялась путем изменения температуры и тока накачки. Недостатками таких лазеров являлись малое значение выходной мощности, большая ширина линии излучения (100 МГц), а также нестабильный режим работы.

Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (РОС) с динамической одиночной продольной модой стал первым выбором в качестве источника света для оптоволоконной связи, что обеспечило его популярность в области одночастотных полупроводниковых лазеров. В данном типе одночастотных лазеров дифракционная решетка интегрирована в резонатор лазерного диода. Данный класс лазеров имеет более стабильный одночастотный режим работы, сравнительно небольшую оптическую мощность и ширину линии излучения порядка 1...10 МГц. Перестройка длины волны осуществляется за счет изменения температуры лазера или тока накачки [3–4].

Для одночастотных полупроводниковых лазеров крайне важны стабильность и ширина линии излучения. На стабильность и ширину линии в режиме свободной генерации лазера влияет множество параметров, в том числе частотный шум. Источником частотного шума в основном является спонтанное излучение. Кроме того, изменение стационарного числа фотонов из-за спонтанного излучения вызывает соответствующее изменение усиления, т.е. концентрации электронов, что, в свою очередь, приводит к изменению показателя преломления и частоты генерации. Вместе с числом носителей флуктуируют как электрический ток, так и степень нагрева самого вещества. [5]. В результате даже в одночастотных РОС-лазерах и лазерах с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) не удаётся получить ширину линии генерации менее 1 МГц.

Для подавления частотного шума, проявляющегося в режиме свободной генерации, и дальнейшего сужения линии генерации используют лазеры с внешним резонатором. На выходную грань активного элемента наносится просветляющее покрытие, тем самым исключая эту грань из формирования геометрии лазерного резонатора. В качестве «глухого» зеркала выступает селективный по длине волны элемент, как правило, это дифракционная или брэгговская решётка. Созданная таким образом положительная обратная связь будет порождать фотоны той частоты, на которую настроен селективный элемент. Диапазон и точность непрерывной перестройки зависят от конструкции оптики и соответствующей механики.

Альтернатива лазерам с внешней дифракционной решеткой – это лазер с ВБР, где ВБР выполняет роль внешнего частотно-селективного элемента [6–8]. Такой подход является более простым и надежным, так как исключает наличие множества подвижных компонентов. На рис. 1 представлена структурная схема лазерного модуля. Основными элементами конструкции являются: двухпроходный усилитель 1 с отражающим покрытием на задней грани резонатора 90 % и просветляющим покрытием передней грани 0,01 %, а также скошенным волноводом к выходной грани под углом 8° ; брэгговская решетка 2, сформированная в сердцевине волокна; цилиндрическая микролинза 3, сформированная на торце волокна, которая обеспечивает ввод излучения в оптическое волокно более 80 %; оптический изолятор 4 и пьезокермика 5, на которой жестко закреплено оптическое волокно с ВБР.

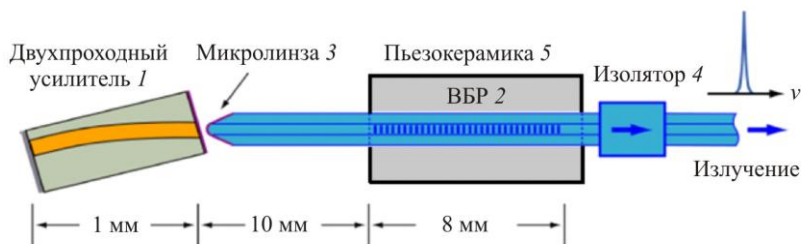


Рис. 1. Структурная схема модуля

Расстояние от выходной грани активного элемента до ВБР составляет 10 мм. Это ограничение обусловлено особенностями технологии крепления оптического волокна, юстировкой оптического волокна относительно активного элемента и креплением ВБР к пьезокерамике. Если не использовать пьезокерамику и отказаться от возможности перестройки, то это расстояние можно уменьшить до 3–5 мм.

ВБР, используемые в данной работе, были изготовлены в ООО «ЛИКОптика» с помощью метода фазовой маски. Спектральная ширина ВБР выбиралась минимальной (0,08 нм), чтобы исключить попадание соседних лазерных мод внутрь селективности ВБР. Параметры ВБР приведены ниже:

Длина волны, нм	1550
Спектральная ширина по уровню 0,5, нм	0,08
Отражательная способность, %	15
Отношение уровня боковых максимумов к центральному пику отражения, дБ	8
Длина ВБР, мм	8

Перестройка длины волны осуществляется согласно закону Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – это центральная длина волны Брэгга, которая будет отражаться обратно от брэгговской решетки; n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волокна на центральной длине волны; Λ – период решетки.

Длина волны Брэгга зависит от эффективного показателя преломления сердцевины волокна и от периода решетки, на которые влияют изменение температуры и растяжение.

В работе использовались эпитаксиальные структуры на основе InAlGaAs/InP (длина волны излучения 1300–1650 нм) с квантово-размерными слоями, изготовленными методом МОС-гидридной эпитаксии. Структуры были изготовлены в АО «НИИ “Полус”» имени М.Ф. Стельмаха». Активный элемент изготовлен на базе гребешкового волновода. Длина резонатора двухпроходного усилителя составила 1 мм.

В нашей работе использовался пьезокерамический элемент, изготовленный в АО «НИИ “Элпа”». На пьезокерамику жестко закреплялось волокно с ВБР. При растяжении пьезокерамики изменяется период ВБР, что приводит к изменению длины волны Брэгга. Ниже приведены характеристики пьезокерамики, используемой в этой работе.

Максимальное напряжение	150 В
Растяжение	10 мкм
Гистерезис смещения	<15 %
Сопротивление изоляции	>100 МОм
Статическая емкость	<1000 нФ

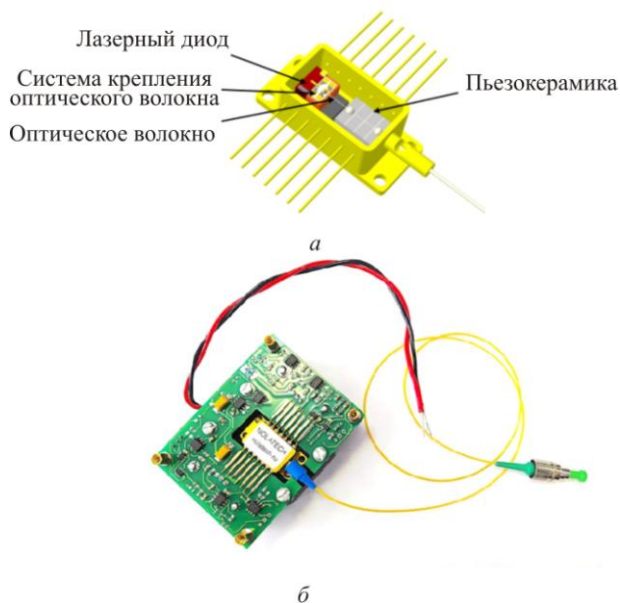


Рис. 2. Модель расположения оптоэлектронных компонентов внутри унифицированного корпуса 14 pin DIL «Butterfly» (а); фотография готового лазерного модуля в корпусе 14 pin DIL «Butterfly» с платой управления (б)

Все элементы лазерного модуля помещаются в унифицированный корпус 14 pin DIL «Butterfly». На рис. 2, а изображена

упрощенная модель размещения всех составных элементов в корпусе, а на рис. 2, б изображен готовый лазерный модуль с платой управления.

Измерение характеристик и их обсуждение

Для измерения ватт-амперных (ВтАХ) и вольт-амперных (ВАХ) перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля используется стенд, структурная схема которого изображена на рис. 3.

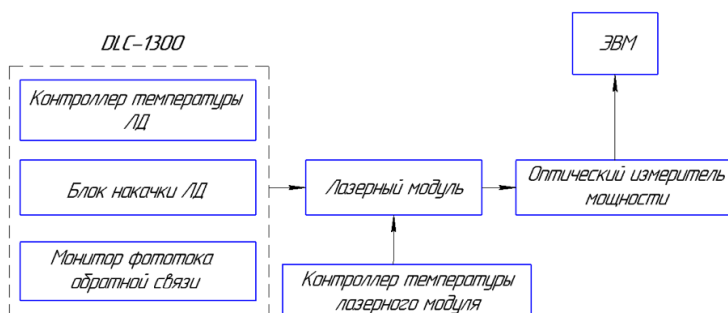


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерения ватт-амперных и вольт-амперных характеристик перестраиваемых полупроводниковых одночастотных лазеров

Контроллер температуры ЛД позволяет отслеживать и изменять температуру термоэлектрического микроохладителя (ТЭМО), на котором расположен двухпроходный усилитель. Данная схема изготовлена на базе драйвера DLC-1300 производства компании АО «НО-ЛАТЕХ».

Ниже на рис. 4 представлены ВАХ и ВтАХ перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля, изготовленного на базе двухпроходного усилителя.

С ростом тока накачки активная область двухпроходного усилителя нагревается за счет джоулева нагрева, что вызывает смещение продольной моды двухпроходного усилителя между двумя модами внешнего резонатора. Это вносит нестабильность в одночастотный режим генерации с появлением перескока моды. На графике ватт-амперной характеристики это выглядит как излом кривой. Далее наблюдается стабильный одночастотный режим работы лазера до следующего перескока моды. Поскольку в двухпроходном усилителе влияние внутреннего резонатора максимально подавлено, то перескоки

мод не так явно выражены по сравнению с активным элементом, имеющим прямой полосок. Характеристики перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля приведены ниже.

Выходная оптическая мощность	мВт	50
Пороговый ток	мА	60
Эффективность ввода излучения в волокно	%	80
Напряжение отсечки	В	0,95
Свободный от перескоков мод участок	мА	50
Ток накачки	мА	до 900

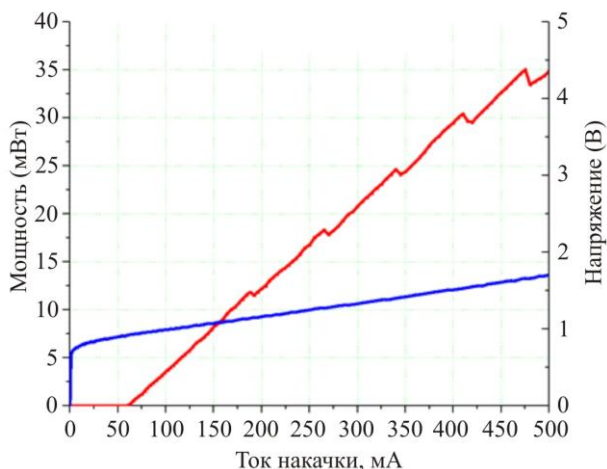


Рис. 4. Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля

На рис. 5 показаны ватт-амперные характеристики перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазера при разных значениях температуры активного элемента. Увеличение температуры приводит к сильному падению выходной мощности. Сильная температурная зависимость выходной оптической мощности объясняется уменьшением коэффициента усиления с ростом температуры. Увеличение температуры приводит к росту безызлучательных процессов, доминирующим из которых является Оже-рекомбинация. Сильная температурная зависимость характерна для лазеров в диапазоне длин волн 1300–1650 нм.

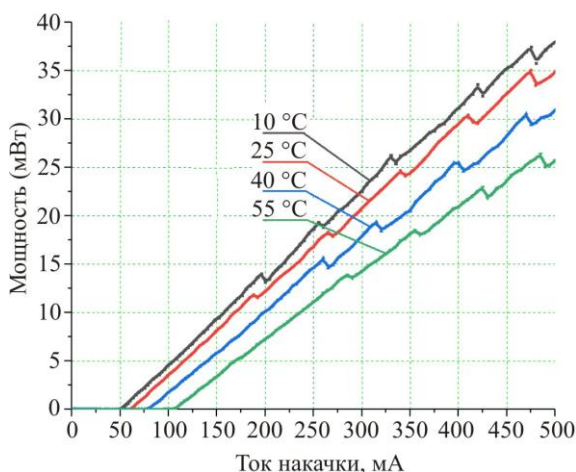


Рис. 5. Зависимость ВТАХ лазерного модуля от температуры активного элемента

Для исследования спектральных характеристик перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров использовался оптический анализатор спектра AQ6317 (Ando, Япония). Измерение длины волны и анализ оптического спектра излучения осуществились в диапазоне 1548–1562 нм. Разрешающая способность 0,01 нм. В логарифмическом масштабе наблюдалось значение подавление боковой моды, которое составило 40–45 дБ. Спектр излучения представлен на рис. 6.

Ширина линии генерации составляла $\sim 10\text{--}100$ кГц, данный эффект радикального сужения ширины линии излучения перестраиваемого одночастотного лазерного модуля исследовался в Научном центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова Российской академии наук с помощью волоконного интерферометра Маха–Цандера [9].

На рис. 7 представлена зависимость длины волны лазерного модуля от напряжения на пьезокерамике (растяжения ВБР). Так как зависимость растяжения пьезокерамики от подаваемого на нее напряжения представляет петлю гистерезиса, то и зависимость смещения длины волны генерации от растяжения пьезокерамики тоже имеет петлю гистерезиса. Шаг перестройки составляет 0,04 нм, что является межмодовым расстоянием для внешнего резонатора, образованным ВБР и двухпроходным усилителем. Влияние внутреннего резонатора на качество перестроечной кривой отсутствует. Перестройка длины волны происходит по петле, образованной красной и синей кривыми.

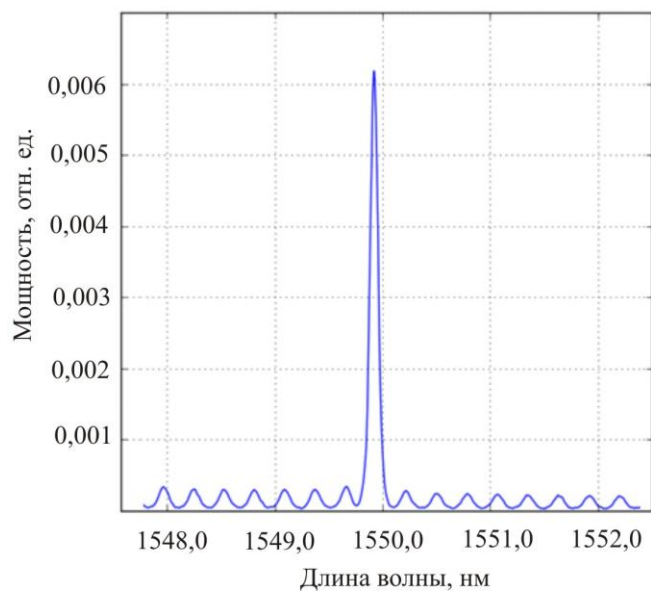


Рис. 6. Спектральная характеристика лазерного модуля

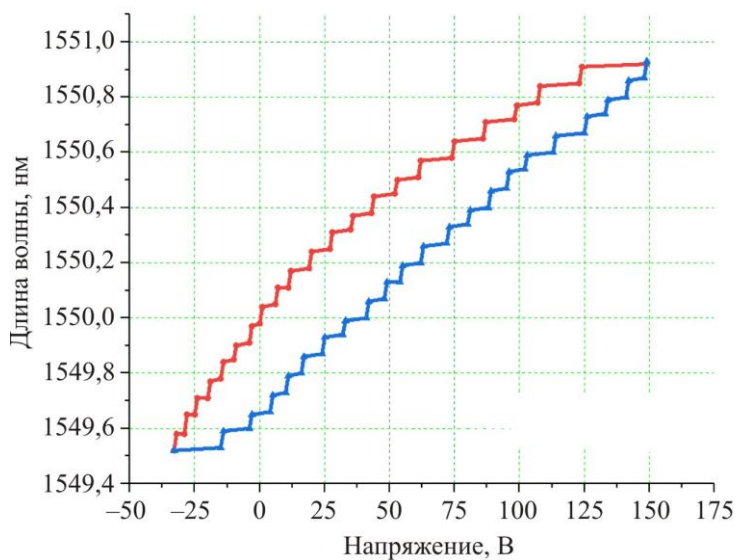


Рис. 7. Зависимость длины волны лазерного модуля от напряжения на пьезокерамике: — обратное смещение; — прямое смещение

Плавную перестройку длины волны лазерного модуля можно осуществить с помощью модуляции тока накачки или температуры

активного элемента [10]. При этом диапазон перестройки строго ограничен селективностью ВБР 0,08 нм.

Выводы

Таким образом, были созданы перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазерные модули на базе двухпроходного усилителя, излучающие на длине волны 1550 нм. Представлены их основные конструктивные и эксплуатационные характеристики. Мощность излучения на выходе оптического волокна составила 50 мВт. Ширина линии излучения лазерного модуля в одночастотном режиме составляет 100–500 кГц и перестраивается в пределах 1–1,5 нм. Ресурс работы 100 тысяч часов.

Список литературы

1. Single Frequency Semiconductor Lasers / Fang Zujie, Cai Haiwen, Chen Gaoting, Qu. Ronghui // Springer Singapore. – 2017. – P. 306.

2. Моноимпульсный Nd: YAG-лазер с поперечной диодной накачкой и инъекцией излучения одночастотного полупроводникового лазерного модуля / М.В. Богданович, В.П. Дураев, В.С. Калинов, О.Е. Костик, К.И. Ланцов, К.В. Лепченков, В.В. Машко, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, Л.Л. Тепляшин // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 10. – № 46. – С. 870–872.

3. Спенсер Д.Е., Янг П. Сравнение DBR-лазерных диодов от компании Photodigm с DFB-лазерами // Фотоника. – 2018. – №2 (70). – С. 166–173.

4. Экспериментальные исследования мощных полупроводниковых одночастотных лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм / О.О. Багаева, Р.Р. Галиев, А.И. Данилов, А.В. Иванов, В.Д. Курносков, К.В. Курносков, Ю.В. Курнявко, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.И. Романцевич, В.А. Симаков, Р.В. Чернов, В.В. Шишков // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 2. – С. 143–146.

5. Камия Т., Оцу М., Ямамото В. Физика полупроводниковых лазеров: пер. с япон. / под ред. Х. Такумы. – М.: Мир, 1989. – 310 с.

6. Bragg-grating-stabilized external cavity lasers for gas sensing using tunable diode laser spectroscopy / S.G. Lynch [et al.] // Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII. – International Society for Optics and Photonics. – 2014. – Vol. 9002. – P. 900209.

7. External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform / S.G. Lynch [et al.] // *Optics express*. – 2016. – Vol. 24. – №. 8. – P. 8391–8398.

8. High-power ultralow-noise semiconductor external cavity lasers based on low-confinement optical waveguide gain media / P.W. Juodawlkis [et al.] // *Novel In-Plane Semiconductor Lasers IX*. – International Society for Optics and Photonics. – 2010. – Vol. 7616. – P. 76160X.

9. Полупроводниковые лазеры с гибридным резонатором на волоконных брэгговских решетках: Препринт / М.И. Беловолов, Е.М. Дианов, В.П. Дураев [и др.]; Рос. акад. наук; Ин-т общ. физики (ИОФАН). – М., 2002. – 67 с.

10. Дураев В.П. Медведев С.В. Одночастотные полупроводниковые лазеры на основе двухпроходных усилителей // *Фотоника*. – 2015. – № 6. – С. 54.

References

1. Zujie Fang, Haiwen Cai, Gaoting Chen, Ronghui Qu. *Single Frequency Semiconductor Lasers*. Springer Singapore, 2017, 306 p.

2. Bogdanovich M.V., Duraev V.P., Kalinov V.S., Kostik O.E., Lantsov K.I., Lepchenkov K.V., Mashko V.V., Riabtsev A.G., Riabtsev G.I., Teplishin L.L. Monoimpul'snyi Nd: YAG-lazer s poperechnoi diodnoi nakachkoi i inzhektsiei izlucheniia odnochastotnogo poluprovodnikovogo lazernogo modulia [Transversely diode-pumping-switched Nd: YAG laser with injection of radiation from a single-frequency semiconductor laser]. *Kvantovaia elektronika*, 2016, vol. 10, no. 46, pp. 870-872.

3. Spenser D.E., Iang P. Sravnenie DBR-lazernykh diodov ot kompanii Photodigm s DFB-lazerami [Contrasting the Photodigm DBR laser diode architecture with competing DFB designs]. *Fotonika*, 2018, no. 2 (70), pp. 166-173.

4. Bagaeva O.O., Galiev R.R., Danilov A.I., Ivanov A.V., Kurnosov V.D., Kurnosov K.V., Kurniavko Iu.V., Ladugin M.A., Marmaliuk A.A., Romantsevich V.I., Simakov V.A., Chernov R.V., Shishkov V.V. Eksperimental'nye issledovaniia moshchnykh poluprovodnikovykh odnochastotnykh lazerov spektral'nogo diapazona 1,5-1,6 mkm [Experimental studies of 1,5-1,6 μm high-power single-frequency semiconductor lasers]. *Kvantovaia elektronika*, 2020, vol. 2, pp. 143-146.

5. Kamiia T., Otsu M., Iamamoto V. Fizika poluprovodnikovyykh lazerov [Physics of semiconductor lasers]. Ed. Kh. Takumy. Moscow: Mir, 1989, 310 p.

6. Lynch S.G. et al. Bragg-grating-stabilized external cavity lasers for gas sensing using tunable diode laser spectroscopy. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII. International Society for Optics and Photonics*, 2014, vol. 9002, 900209 p.

7. Lynch S.G. et al. External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform. *Optics express*, 2016, vol. 24, no. 8, pp. 8391-8398.

8. Juodawlkis P.W. et al. High-power ultralow-noise semiconductor external cavity lasers based on low-confinement optical waveguide gain media. *Novel In-Plane Semiconductor Lasers IX. International Society for Optics and Photonics*, 2010, vol. 7616, 76160X p.

9. Belovolov M.I., Dianov E.M., Duraev V.P. et al. Poluprovodnikovye lazery s gibridnym rezonatorom na volokonnykh breggovskikh reshetkakh [Semiconductor lasers with a hybrid cavity based on fiber Bragg gratings]. Moscow: Rossiiskaia akademiia nauk. Institut obshchei fiziki (IOFAN), 2002, 67 p.

10. Duraev V.P. Medvedev S.V. Odnochastotnye poluprovodnikovye lazery na osnove dvukhprokhodnykh usilitelei [Single-frequency semiconductor lasers based on two-pass amplifiers]. *Fotonika*, 2015, no. 6, 54 p.