



Перестраиваемый одночастотный полупроводниковый лазерный модуль на базе двухпроходного усилителя на длину волны 1550 нм

В. П. Дурев, С. А. Воронченко, И. С. Молодцов
АО «Нолатех», Москва, Россия

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 волокне. 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 100–500 кГц и выходной оптической мощностью более 35 мВт. Перестройка длины волны спектра излучения лазерного модуля составила 1,5 нм.

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

Статья получена: 09.08.2021

Статья принята к публикации: 25.08.2021

ВВЕДЕНИЕ

В последние 20 лет инжекционные лазеры вступили в период их массового применения. Компактность, быстродействие, эффективность и простота устройства реализуются в таких важных применениях как волоконно-оптическая связь, системы памяти и т. д. При этом актуальными являются физические

Tunable Single-Frequency Semiconductor Laser Module Based on Two-Pass 1550 nm Wavelength Amplifier

V. P. Duraev, S. A. Voronchenko, I. S. Molodtsov
Nolatech JSC, Moscow, Russia

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 of 100–500 kHz, and an output optical power of more than 35 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.

Received on: 09.08.2021

Accepted on: 25.08.2021

INTRODUCTION

In the last 20 years, injection lasers have entered the period of their widespread use. The compactness, speed, efficiency and simplicity of the device are realized in such important applications as fiber-optic communications, memory systems, etc. At the same time, physical research and new developments aimed at identifying and using the limiting capabilities of lasers to meet higher requirements are relevant.

The ability to isolate one frequency and its smooth tuning have made it possible to find applications in various fields of scientific research, such as: high-resolution spectroscopy, analytical spectroscopy and, in particular, the detection of atmospheric pollution,



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 применения в различных области научных исследований, таких, как спектроскопия высокого разрешения, аналитическая спектроскопия и, в частности, обнаружение загрязнений атмосферы, измерительная интерферометрия, датчики в различном научном приборостроении 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. Недостатком таких лазеров являлось 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 [3]. Перестройка длины волны осуществляется за счет изменения температуры лазера или тока накачки [4].

measuring interferometry, sensors, in various scientific instrumentation and medical diagnostics equipment, optical pumping lasers based on crystals and glasses doped with rare-earth ions, primarily neodymium, ytterbium and erbium [1]. The possibility of using tunable single-frequency semiconductor lasers as a seed radiation source for single-frequency pulsed solid-state ND:YAG lasers with a line width of less than 100 MHz was also demonstrated. [2].

CREATION OF A LASER MODULE

At the first stage of the development of semiconductor tunable lasers, laser diodes (LDs) with a short cavity (100–200 μm) were used. Taking into account that the free spectral range for such emitters is large, the difference in the amplification of neighboring modes reaches a significant value. As a result, the emission spectrum of short-cavity lasers usually has one longitudinal mode. The wavelength of such lasers was tuned by changing the temperature and pump current. The disadvantages of such lasers were their low output power, large emission line width (100 MHz), and unstable operation.

Distributed feedback (DFB) semiconductor laser with dynamic single longitudinal mode has become the first choice as a light source for fiber optic communication, which has made it popular in the field of single frequency semiconductor lasers. In this type of single-frequency lasers, the diffraction grating is integrated into the cavity of the laser diode. This class of lasers has a more stable single-frequency mode of operation, a relatively low optical power and a radiation linewidth of the order of 1–10 MHz [3]. Wavelength tuning is performed by changing the laser temperature or pump current [4].

For single frequency semiconductor lasers, stability and linewidth are critical. The stability and linewidth in the free-running laser mode is influenced by many parameters, including frequency noise. The source of frequency noise is mainly spontaneous emission. In addition, a change in the stationary number of photons due to spontaneous emission causes a corresponding change in the gain, i. e. the concentration of electrons, which in turn leads to a change in the refractive index and generation frequency. Together with the number of carriers, both the electric current and the degree of heating of the substance itself fluctuate. [5]. As a result, even in single-frequency DFB and distributed Bragg reflectors (DBR) lasers, it is not possible to obtain a lasing line width of less than 1 MHz.

External cavity lasers are used to suppress the frequency noise that appears in the free-running mode and further narrow the generation line. An antireflection



Для одночастотных полупроводниковых лазеров крайне важна 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 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 непрерывной перестройки и точность зависят от конструкции оптики и соответствующей механики.

Альтернатива лазерам с внешней дифракционной решеткой – это лазер в 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 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°; брэгговской решеткой (2), сформированной в сердцевине волокна; цилиндрической микролинзой (3), сформированной на торце волокна и обеспечивающей ввод излучения в оптическое волокно более 80%; оптический изолятор (4) и пьезокермика (5), на которой жестко закреплено оптическое волокно с ВБР.

Расстояние от выходной грани активного элемента до ВБР составляет 10 мм. Это ограничение

coating is applied to the output face of the active element, thereby excluding this face from the formation of the geometry of the laser resonator. A wavelength-selective element, as a rule, is a diffraction or Bragg grating, acts as a “deaf” mirror. The positive feedback created in this way will generate photons of the frequency to which the selective element is tuned. Continuous tuning range and accuracy are dependent on optics design and associated mechanics.

An alternative to lasers with an external diffraction grating is an FBG laser, where the FBG plays the role of an external frequency-selective element [6–8]. This approach is simpler and more reliable, as it eliminates the presence of many moving components. In fig. 1 shows the block diagram of the module. The main design elements are: a two-pass amplifier (1) with a 90% reflective coating on the back face of the resonator and an antireflection coating of the front face of 0.01%, as well as a beveled waveguide to the output face at an angle of 8°; a Bragg grating (2) formed in the fiber core; a cylindrical microlens (3) formed at the end of the fiber, providing radiation input into the optical fiber of more than 80%; an optical isolator (4) and piezoceramic (5), on which an optical fiber with an FBG is rigidly fixed.

The distance from the output face of the active element to the FBG is 10 mm. This limitation is due to the peculiarities of the technology of optical fiber attachment, optical fiber alignment relative to the active element, and FBG attachment to piezoelectric ceramics. If you do not use piezoelectric ceramics and refuse the possibility of tuning, then this distance can be reduced to 3–5 mm.

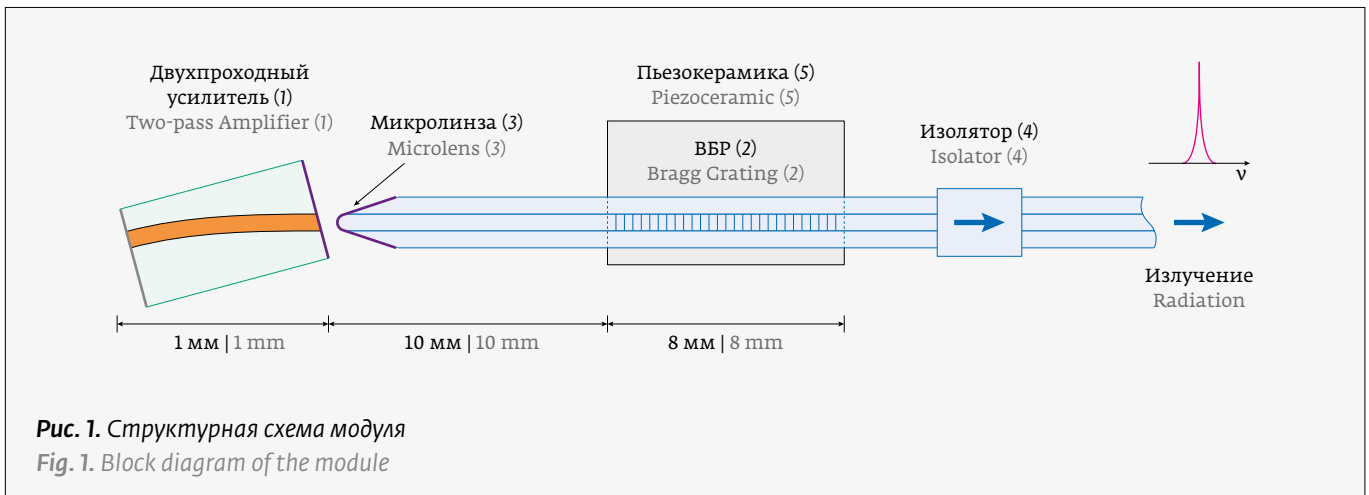
The FBGs used in this research were manufactured by LIKOptika LLC using the phase mask method. The spectral width of the FBG was chosen to be minimal (0.08 nm) in order to exclude the penetration of neighboring laser modes inside the selectivity of the FBG. The FBG parameters are given in Table 1.

Wavelength tuning of wavelength is carried out according to Bragg's law:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda ,$$

where the Bragg grating wavelength λ_B is the central Bragg wavelength that will be reflected back from the Bragg grating, and n_{eff} is the effective refractive index of the fiber core at the central wavelength, Λ is the grating period.

The Bragg wavelength depends on the effective refractive index of the fiber core and on the grating period, which are affected by temperature changes and strains.



обусловлено особенностями технологии крепления оптического волокна, юстировки 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 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 в табл. 1.

Перестройка длины волны длины волны осуществляется согласно закону Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda ,$$

где длина волны брэгговской решетки λ_B – это центральная длина волны Брэгга, которая будет отражаться обратно от брэгговской решетки, а 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 изменения температуры и деформационные растяжения.

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 АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стедьмаха». Активный элемент изготовлен на базе гребешкового волновода. Длина резонатора двухпроходного усилителя составила 1 мм.

We used epitaxial structures based on InAlGaAs/InP (emission wavelength 1300–1650 nm) with quantum-well layers fabricated by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy. The structures were manufactured by M. F. Stelmakh Research Institute “Polyus” JSC. The active element is made on the basis of a ridge waveguide. The cavity length of the double-pass amplifier was 1 mm.

In our research, we used a piezoceramic element based on the inverse piezoelectric effect, manufactured by Research Institute “Elpa” JSC. A fiber with an FBG is rigidly fixed to the piezoceramics. Under tension-compression of piezoceramics, the FBG period changes, which leads to a change in the Bragg resonant wavelength. Following Table 2 shows the characteristics of piezoelectric ceramics used in this research.

All elements of the laser module are placed in a unified 14 pin DIL “Butterfly” case. Fig. 2a shows a simplified model of the placement of all the constituent ele-

Таблица 1. Параметры ВБР

Table 1. FBG parameters

Параметры Parameters	Значение Value
Длина волны, нм Wavelength, nm	1 550
Спектральная ширина по уровню 0,5, нм Spectral width at the level of 0.5, nm	0,08
Отражательная способность, % Reflectivity, %	15
Отношение уровня боковых максимумов к центральному пику отражения, дБ Ratio of the side maxima level to the central reflection peak, dB	8
Длина ВБР, мм FBG length, mm	8

Таблица 2. Характеристики пьезокерамики

Table 2. Characteristics of piezoceramics

Параметры Parameters	Значение Value
Максимальное напряжение, В Maximum voltage, V	150
Растяжение, мкм Elongation, μm	10
Гистерезис смещения, % Displacement hysteresis, %	<15
Сопротивление изоляции, МОм Insulation resistance, MOhm	>100
Статическая емкость, нФ Static capacitance, nF	<1 000

В нашей работе использовался пьезокерамический элемент, основанный на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Он был изготовлен АО «НИИ «Элпа». На пьезокерамику жестко крепится волокно с ВБР. При растяжении-сжатии пьезокерамики изменяется период ВБР, что приводит к изменению резонансной длины волны Брэгга. Ниже в табл. 2 приведены характеристики пьезокерамики, используемой в этой работе.

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 характеристик (ВАХ) перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля используется стенд, структурная схема которого изображена на рис. 3.

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

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

ments in the body, and Fig. 2b shows the finished laser module with driver board.

PERFORMANCE MEASUREMENT AND DISCUSSION

To measure the watt-ampere (WAC) and current-voltage characteristics (VAC) of a tunable single-frequency semiconductor laser module, a stand is used, the block diagram of which is shown in Fig. 3.

The LD temperature controller allows you to control and change the temperature of the thermoelectric microcooler (TEMC), on which the two-pass amplifier is located. This circuit is made on the basis of the DLC-1300 driver manufactured by NOLATEH JSC.

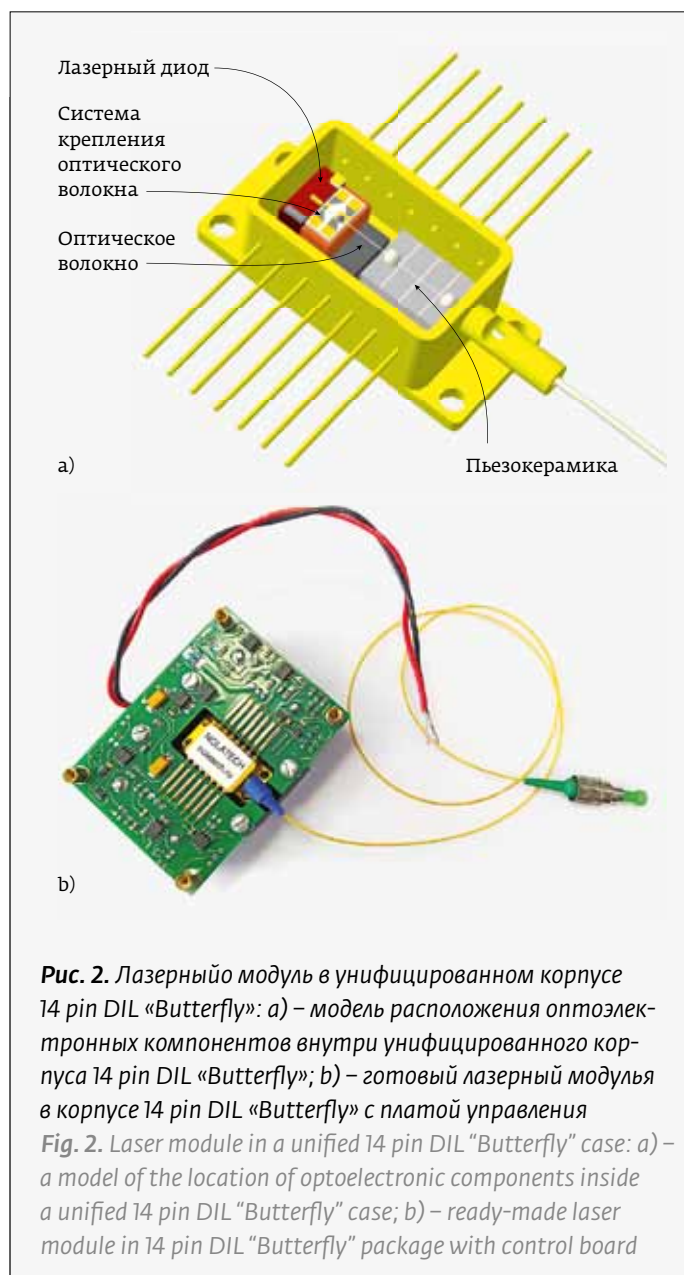


Рис. 2. Лазерный модуль в унифицированном корпусе 14 pin DIL «Butterfly»: а) – модель расположения оптоэлектронных компонентов внутри унифицированного корпуса 14 pin DIL «Butterfly»; б) – готовый лазерный модуль в корпусе 14 pin DIL «Butterfly» с платой управления
Fig. 2. Laser module in a unified 14 pin DIL “Butterfly” case: a) – a model of the location of optoelectronic components inside a unified 14 pin DIL “Butterfly” case; b) – ready-made laser module in 14 pin DIL “Butterfly” package with control board

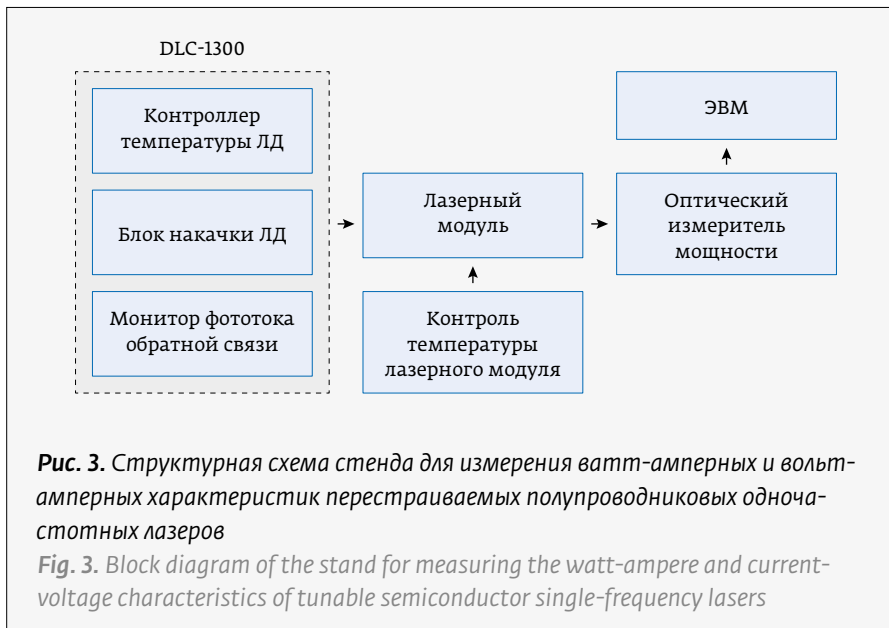


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерения ватт-амперных и вольт-амперных характеристик перестраиваемых полупроводниковых одночастотных лазеров

Fig. 3. Block diagram of the stand for measuring the watt-ampere and current-voltage characteristics of tunable semiconductor single-frequency lasers

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. Так как в двухпроходном усилителе влияние внутреннего резонатора максимально подавлено, то перескоки мод не так явно выражены, по сравнению с активным элементом, имеющим прямой полосок.

Таблица 3. Основные характеристики лазерного модуля

Table 3. Main characteristics of the laser module

Параметры Parameters	Значение Value
Выходная оптическая мощность, мВт Output optical power, mW	35
Пороговый ток, мА Threshold current, mA	60
Эффективность ввода излучения в волокно, % Efficiency of radiation input into fiber, %	80
Рабочее напряжение, В Operating voltage, V	1,7
Напряжение отсечки, В Pinchoff voltage, V	0,95
Свободный от перескоков мод участок, мА Area free from hopping mode, mA	50

Fig. 4 below shows the VAC and WAC characteristics of a tunable single-frequency semiconductor laser module based on a two-pass amplifier.

With an increase in the pump current, the active region of the two-pass amplifier heats up due to Joule heating, which causes a shift of the longitudinal mode of the two-pass amplifier between the two modes of the external cavity. This introduces instability into the single-frequency lasing regime with the appearance of a mode hopping. On the graph of the watt-ampere characteristic, this looks like a kink in the curve. Then, a stable single-frequency laser operation is observed until the next hop.

Since the influence of the internal resonator is maximally suppressed in a two-pass amplifier, the mode hopping is not so pronounced as compared to an active element having a straight stripe. The characteristics of a tunable single-frequency semiconductor laser module are given in Table 3.

Fig. 5 shows the watt-ampere characteristics of a tunable single-frequency semiconductor lasers at different values of the temperature of the active element. An increase in temperature leads to a large drop in

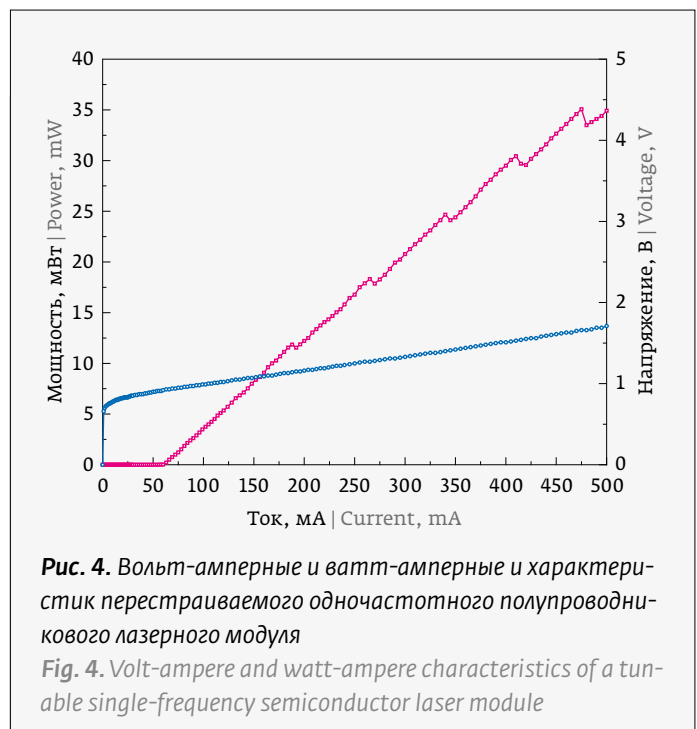


Рис. 4. Вольт-амперные и ватт-амперные и характеристики перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля

Fig. 4. Volt-ampere and watt-ampere characteristics of a tunable single-frequency semiconductor laser module

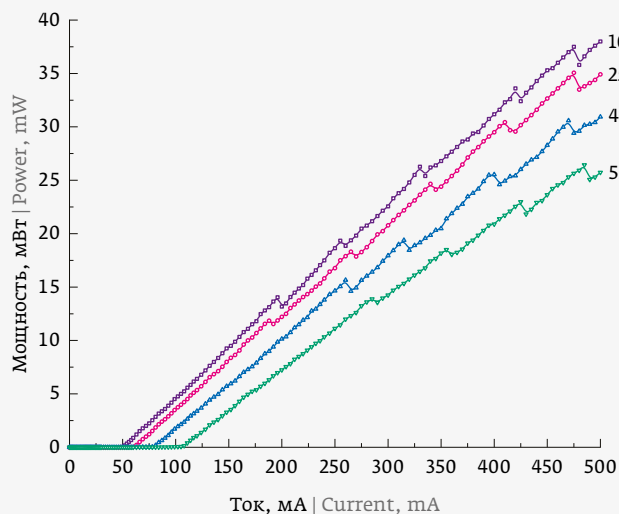


Рис. 5. Зависимость ВтАХ от температуры активного элемента

Fig. 5. Dependence of the L-I characteristic on the temperature of the active element

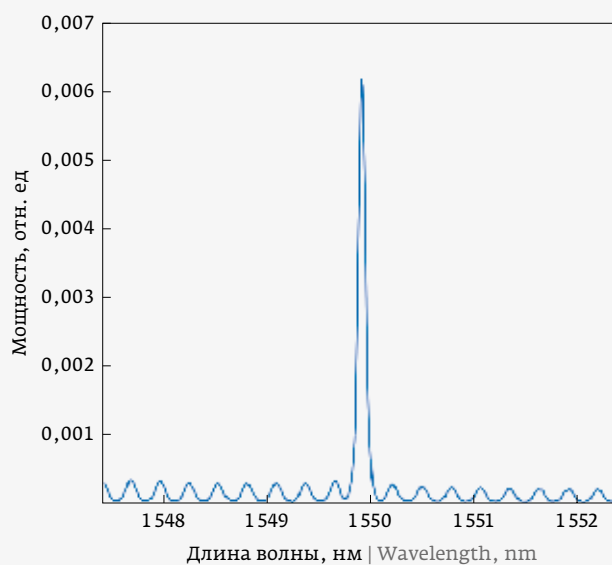


Рис. 6. Спектральная характеристика модуля

Fig. 6. Spectral characteristics of the module

Характеристики перестраиваемого одночастотного полупроводникового лазерного модуля приведены в табл. 3.

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.

Для исследования спектральных характеристик перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров использовался оптический анализатор спектра AQ6317 (Ando, Япония). Измерение длины волны и анализ оптического спектра излучения осуществляются в диапазоне 600–1700 нм. Разрешающая способность 0,01 нм. В логарифмическом масштабе наблюдалось значительное подавление боковой моды, которое составило 40–45 дБ. Спектр излучения представлен на рис. 6.

Ширина линии генерации составляла ~10–100 кГц, данный эффект радикального сужения ширины линии излучения перестраиваемого одночастотного

power output. The strong temperature dependence of the output optical power is explained by a decrease in the gain with increasing temperature. An increase in temperature leads to an increase in nonradiative processes, the dominant of which is Auger recombination. A strong temperature dependence is typical for lasers in the 1300–1650 nm wavelength range.

An AQ6317 optical spectrum analyzer (Ando, Japan) was used to study the spectral characteristics of tunable single-frequency semiconductor lasers. Measurement of wavelength and analysis of the optical spectrum of radiation is carried out in the range 600–1700 nm. Resolution 0.01 nm. On a logarithmic scale, side mode suppression was observed to be 40–45 dB. The emission spectrum is shown in Fig. 6.

The lasing linewidth was ~10–100 kHz; this effect of a radical narrowing of the emission linewidth of a tunable single-particle laser module was investigated at the Fiber Technology Research Center at the GPI of RAS using a Mach-Zehnder fiber interferometer. [9]

Fig. 7 shows the dependence of the wavelength of the laser module on the voltage on the piezoelectric ceramics (FBC stretching). Since the dependence of the stretching of the piezoelectric ceramics on the voltage applied to it is a hysteresis loop, the dependence of the shift of the lasing wavelength on the stretching of the piezoelectric ceramics also has a hysteresis loop. The tuning step is 0.04 nm, which is the intermode distance for the external cavity formed by the FBC and a two-pass amplifier. There is no influence of the

лазерного модуля исследовался в научном центре волоконной техники при ИОФ РАН 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 красному и синему графикам.

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, был создан перестраиваемый одночастотный полупроводниковый лазерный модуль

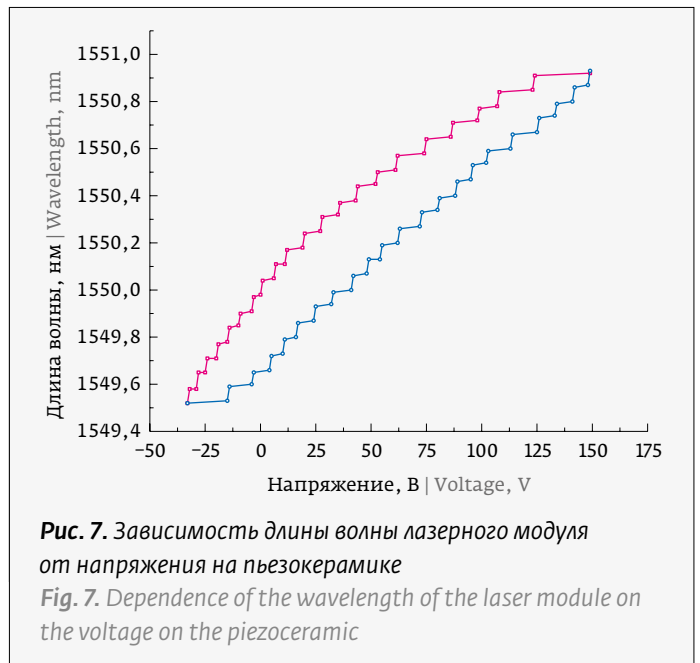


Рис. 7. Зависимость длины волны лазерного модуля от напряжения на пьезокерамике

Fig. 7. Dependence of the wavelength of the laser module on the voltage on the piezoceramic

internal resonator on the quality of the tuning curve. Wavelength tuning occurs according to the red and blue graphs.

Continuous tuning of the laser module wavelength can be performed by modulating the pump current or


www.nolatech.ru

АО «НОЛАТЕХ» — разрабатывает и изготавливает полупроводниковые лазеры (в том числе одночастотные и перестраиваемые с волоконно-брегговской решеткой или DFB), суперлюминесцентные диоды, полупроводниковые оптические усилители, фотоприемники, драйверы лазерных модулей. Длины волн от 400 до 1650 нм. Предприятие организовано в 1992 году.

ПРОДУКЦИЯ

- Лазерные диоды и модули
- Лазеры со стабилизацией длины волны
- Одночастотные лазерные модули
- Перестраиваемые лазерные модули
- DFB лазеры
- Суперлюминесцентные диоды
- Полупроводниковые оптические усилители
- Фотодиодные модули
- Компактные лазерные модули
- Драйверы лазерных диодов







nolatech@mail.ru
+7(495)333-93-01
+7(495)335-32-25



на базе двухпроходного усилителя, излучающий на длине волны 1550 нм. Представлены их основные конструктивные и эксплуатационные характеристики. Мощность излучения на выходе оптического волокна – 35 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. **Zujie Fang, Haiwen Cai, Gaoting Chen, Ronghui Qu.** *Single Frequency Semiconductor Lasers.* Springer Singapore. 2017. 306 p.
2. **Богданович М. В., Дураев В. П., Калинов В. С., Костик О. Е., Ланцов К. И., Лепченко К. В., Машко В. В., Рябцев А. Г., Рябцев Г. И., Тепляшин Л. Л.** Моноимпульсный Nd:YAG-лазер с поперечной диодной накачкой и инжекцией излучения одночастотного полупроводникового лазерного модуля. *Квантовая электроника.* 2016; 46(10): 870–872. URL: [http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v46/i10/p870].
3. **Спенсер Д. Е., Янг П.** Сравнение DBR-лазерных диодов от компании Photodigm с DFB-лазерами. *Фотоника.* 2018;70(2):166–173. DOI: 10.22184/1993–7296.2018.70.2.166.173.
4. **Багаева О. О., Галиев Р. Р., Данилов А. И., Иванов А. В., Курносов В. Д., Курносов К. В., Курняк Ю. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Романцевич В. И., Симаков В. А., Чернов Р. В., Шишков В. В.** Экспериментальные исследования мощных полупроводниковых одночастотных лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм. *Квантовая электроника.* 2020;50(2): 143–146. URL: [http://dx.doi.org/10.1070/QEL17183].
5. **Камия Т., Оцу М., Ямамото В.** Физика полупроводниковых лазеров / Пер. с японского / под ред. Х. Такумы. – М.: Мир. 1989. 310 с.
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; 9002: 900209.
7. **Lynch S. G. et al.** External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform. *Optics express.* 2016; 24(8): 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; 7616: 76160X.
9. **Беловолов М. И., Дианов Е. М., Дураев В. П. и др.** Полупроводниковые лазеры с гибридным резонатором на волоконных брегговских решетках. – М.: ИОФАН. 2002. 67 с.
10. **Дураев В. П., Медведев С. В.** Одночастотные полупроводниковые лазеры на основе двухпроходных усилителей. *Фотоника.* 2015; 9(6):54–61. URL: [www.photonics.su/journal/article/4987].

АВТОРЫ

Дураев В. П., д. т. н., АО «Новая лазерная техника», Москва, Россия, <http://nolatech.ru>,
ORCID:0000-0002-2701-0335
Воронченко С. А., АО «Новая лазерная техника», 117342, Россия, Москва, Россия, <http://nolatech.ru>,
ORCID: 0000-0002-3913-1097
Молодцов И. С., АО «Новая лазерная техника», 117342, Россия, Москва, Россия, <http://nolatech.ru>.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

the temperature of the active element [10]. In this case, the tuning range is strictly limited by the FBG selectivity of 0.08 nm.

CONCLUSIONS

Thus, a tunable single-frequency semiconductor laser module based on a two-pass amplifier, emitting at a wavelength of 1550 nm, was created. Their main design and operational characteristics are presented. The radiation power at the output of the optical fiber is 35 mW. The linewidth of the laser module in the single-particle mode is 100–500 kHz and is tunable in the range of 1–1.5 nm. The operational life is 100 thousand hours.

REFERENCES

1. **Zujie Fang, Haiwen Cai, Gaoting Chen, Ronghui Qu.** *Single Frequency Semiconductor Lasers.* – Springer Singapore. 2017. 306 p.
2. **Bogdanovich M. V. et al.** Transversely diode-pumped -switched Nd:YAG laser with injection of radiation from a single-frequency semiconductor laser. *Quantum Electronics.* 2016; 46(10): 870–872. URL: [http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v46/i10/p870].
3. **Spencer J. E., Young P.** Contrasting the Photodigm DBR Laser Diode Architecture with Competing DFB Designs. *Photonics Russia.* 2018;70(2):166–173. DOI: 10.22184/1993–7296.2018.70.2.166.173.
4. **Bagava O. O. et al.** Experimental studies of 1.5–1.6 μm high-power single-frequency semiconductor lasers. *Quantum Electronics.* 2020;50(2): 143–146. URL: [http://dx.doi.org/10.1070/QEL17183].
5. **Kamiya T., Ocu M., Yamamoto V.** *Fizika poluprovodnikovyh lazerov / red. H. Takumy.* – М.: Мир. 1989. 310 p. [in Russ.]
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; 9002: 900209.
7. **Lynch S. G. et al.** External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform. *Optics express.* 2016; 24(8): 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; 7616: 76160X.
9. **Belovolov M. I., Dianov E. M., Duraev V. P. et al.** *Poluprovodnikovye lazery s gibridnym rezonatorom na volokonnyh breggovskih reshetkah.* – М.: ИОФАН. 2002. 67 p.
10. **Duraev V., Medvedev S.** Single-Frequency Semiconductor Lasers Based on Two-Pass Amplifiers. *Fotonika.* 2015; 9(6):54–61. URL: [www.photonics.su/journal/article/4987].

ABOUT AUTHORS

Duraev V. P., Doctor of Technical Sciences, JSC "New Laser Technology", <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.
ORCID:0000-0002-2701-0335
Voronchenko S. A., JSC "New Laser Technology", <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-3913-1097
Molodtsov I. S., JSC "New Laser Technology", <http://nolatech.ru>, Moscow, Russia.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.



Главное событие отрасли
в России и странах СНГ

ФОТОНИКА МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ

29 марта – 1 апреля 2022

При поддержке:

- Европейского индустриального консорциума по фотонике (EPIC)
- Госкомитета по науке и технологиям РБ

Под патронатом ТПП РФ

16-я международная
специализированная выставка
лазерной, оптической
и оптоэлектронной техники

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
www.photonics-expo.ru



Реклама 12+



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

