



Получено: 3.08.2023 г. | Принято: 13.08.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.272.280>

Научная статья

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

А.В.Фомин<sup>1</sup>, нач. отдела, к.ф.-м.н., ORCID: 0009-0009-0156-7811 / [dep5@vniitf.ru](mailto:dep5@vniitf.ru)

Е.М.Филоненко<sup>1</sup>, науч. сотр., ORCID: 0000-0002-9477-612X

Е.А.Анашкин<sup>1</sup>, нач. лаб.

**Аннотация.** Работа посвящена созданию технологии получения оптических покрытий для резонаторов инжекционных лазеров на установке ионно-лучевого нанесения. Для требуемых коэффициентов отражения на торцах резонаторов спроектированы оптические покрытия, и отработаны режимы нанесения составляющих их диэлектрических слоев. Отработка режимов нанесения заключалась в определении оптимальных параметров ионного луча, соотношений расходов газа-источника ионов и газа-реагента и температуры подложки. Расчет спектральных характеристик высокоотражающих и просветляющих покрытий, полученных на основании предложенных конструкций и экспериментальных значений коэффициентов преломления диэлектрических слоев, свидетельствует о достижении необходимых коэффициентов отражения на торцах резонаторов инжекционных лазеров.

**Ключевые слова:** ионно-лучевое нанесение, коэффициенты преломления, оптические покрытия, инжекционные лазеры

**Для цитирования:** А.В. Фомин, Е.М. Филоненко, Е.А. Анашкин. Особенности технологии ионно-лучевого нанесения многослойных оптических покрытий для резонаторов инжекционных лазеров. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 272–280. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.272.280>

Received: 3.08.2023 | Accepted: 13.08.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.272.280>

Original paper

## FEATURES OF THE ION-BEAM DEPOSITION TECHNOLOGY OF MULTILAYER OPTICAL COATINGS FOR INJECTION LASERS CAVITIES

A.V.Fomin<sup>1</sup>, Head of Department, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), ORCID: 0009-0009-0156-7811

E.M.Filonenko<sup>1</sup>, Researcher, ORCID: 0000-0002-9477-612X / [dep5@vniitf.ru](mailto:dep5@vniitf.ru)

E.A.Anashkin<sup>1</sup>, Head of Laboratory

**Abstract.** The work is devoted to developing the optical coatings technology for injection lasers cavities on an ion-beam deposition facility. The optical coatings design has been performed to meet the requirements for facets reflection coefficients, and dielectric layers deposition modes have been determined. Development of the deposition modes consisted of determining the optimal parameters of an ion beam, the flow ratio rates of the ion-source and reagent gases, and substrate temperature. Calculations of the spectral characteristics of high-reflection and anti-reflection coatings obtained based on the proposed designs and experimental values of dielectric layers' refractive indices indicate that required reflection coefficients for injection lasers cavities have been achieved.

<sup>1</sup> ФГУП "РЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина", Снежинск, Россия / FSUE "RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia



**Keywords:** ion-beam deposition, refractive indices, optical coatings, injection lasers

**For citation:** A.V. Fomin, E.M. Filononko, E.A. Anashkin. Features of the ion-beam deposition technology of multilayer optical coatings for injection lasers cavities. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 272-280. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.272.280>.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день всевозрастающая потребность в мощных и надежных источниках лазерного излучения спектрального диапазона 915–980 нм обуславливает необходимость разработки технологии получения инжекционных лазеров с улучшенными характеристиками их резонаторов, стойких к катастрофической и постепенной деградациям. В свою очередь, стойкость торцов резонаторов определяется качеством подготовки их поверхностей, конструкцией наносимых на них оптических покрытий, а также выбранной технологией их нанесения. Область разработки конструкций оптических покрытий развивается с 1970-х годов, при этом большинство работ в данной области были мотивированы необходимостью создания готового продукта с увеличенными значениями мощности и надежности, а также получением объекта интеллектуальной собственности и реже включали фундаментальные исследования свойств получаемых покрытий. Результатом такого подхода является существование на сегодняшний день множества патентов на изобретения в данной области, зачастую с неоднозначными результатами, не позволяющими напрямую сравнить преимущества разработанных технологий и/или конструкций с решениями, указанными в других патентах, и как следствие, подобрать готовое решение при создании собственной технологии нанесения оптических покрытий для резонаторов инжекционных лазеров.

Наиболее используемыми методами получения оптических покрытий являются электронно-лучевое нанесение [1], магнетронное распыление [2], а также ионно-лучевое нанесение [3]. Последний метод обладает рядом преимуществ, поскольку позволяет получать тонкие пленки высокой плотности, с низким коэффициентом поглощения в видимом и инфракрасном диапазонах [3], а также контролировать стехиометрический состав за счет непосредственного регулирования соотношения расходов газов, энергий и тока ионов. В свою очередь, вопрос применения метода ионно-лучевого нанесения для формирования оптических покрытий на торцах инжекционных лазеров

## INTRODUCTION

Nowadays, the ever-increasing demand for powerful and reliable sources of laser radiation in the 915–980 nm spectral range makes it necessary to develop a technology for producing injection lasers with improved characteristics of their resonators resistant to catastrophic and gradual degradation. In turn, resistance of resonator ends is determined by preparation quality of their surfaces, the design of optical coatings applied to them, and selected technology of their application. The field of development of optical coating designs has been developing since the 1970s, with the majority of works in this field being motivated by the need to create a finished product with increased power and reliability values, as well as obtaining an intellectual property object, and less often including fundamental studies of the properties of the resulting coatings. The approach results in a number of patents for inventions in this field, often with ambiguous results, which do not allow to compare directly the advantages of the developed technologies and/or designs with the solutions specified in other patents, and as a consequence, to choose a ready-made solution when creating their own technology of optical coatings for facets of injection lasers.

The most used methods of optical coatings production are electron beam deposition [1], magnetron sputtering [2] and ion beam deposition [3]. The latter method has a number of advantages, since it allows to obtain thin films of high density, low absorption coefficient in the visible and infrared ranges [3], as well as to control stoichiometric composition by directly adjusting the gas flow ratio, energies and ion current. In turn, the issue of application of the ion-beam deposition method for optical coatings manufacturing on the ends of injection lasers is characterized by a small number of works and requires a comprehensive study. Thus, the aim of this study was to determine the peculiarities of ion-beam deposition application with subsequent development of our own technology for developing the optical coatings on laser cavities. The work included the optical coatings design with the required reflection coefficients, the study of monolayers deposition modes of dielectric materials included in the structure of optical coatings, and production of multilayer coatings on the cavity facets of laser diode



характеризуется небольшим количеством работ и требует всестороннего изучения. Таким образом, целью данной работы являлось исследование особенностей применения ионно-лучевого нанесения с последующей разработкой собственной технологии формирования оптических покрытий на резонаторах лазеров. Работа включала проектирование оптических покрытий с необходимыми коэффициентами отражения; исследование режимов нанесения монослоев диэлектрических материалов, входящих в состав конструкции оптических покрытий; получение многослойных покрытий на торцах резонаторов линеек лазерных диодов (ЛЛД) спектрального диапазона 915–980 нм, а также апробацию полученных оптических покрытий.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В конструкции инжекционного лазера плоскопараллельный резонатор Фабри-Перо образован двумя сколотыми торцами полупроводникового кристалла со значением коэффициента  $R \sim 30\%$ . Нанесение диэлектрических покрытий на торцы инжекционных лазеров осуществляется с целью защиты их сколотых поверхностей от внешнего воздействия, а также с целью получения определенных коэффициентов отражения на выходном и заднем торцах резонатора – до  $10\%$  (полупрозрачное зеркало) и более  $95\%$  (глухое зеркало) соответственно – для того чтобы практически вся излучаемая мощность выходила через один торец резонатора.

Одним из подходящих вариантов для формирования полупрозрачного зеркала является  $Al_2O_3$  с коэффициентом преломления объемного материала  $n = 1,76$ , удовлетворительными значениями теплопроводности ( $0,2-0,3$  Вт/(см·К)) и шириной запрещенной зоны ( $6,5$  эВ).

Типичными системами для получения глухих зеркал резонаторов инжекционных лазеров в области ближнего ИК-диапазона являются  $SiO_2/TiO_2$ ,  $SiO_2/Ta_2O_5$ ,  $SiO_2/Si$ ,  $Si_3N_4/Si$ . Как правило, оптическая толщина каждого слоя составляет четверть волны (QWOT-quarter wave optical thickness) или кратное ей значение [4].

Коэффициенты преломления слоев, образующих полупрозрачное и глухое зеркала, будут зависеть от способов и режимов нанесения выбранных материалов. В случае нанесения оксидов основной сложностью является получение пленок стехиометрического состава, обусловленной эффектом избирательного распыления кислорода [5]. В этом случае, согласно

bars (LDBs) of the 915–980 nm spectral range, as well as approbation of the obtained optical coatings.

### DESIGN OF OPTICAL COATINGS STRUCTURE

In injection laser design, the plane-parallel Fabry-Perot resonator is formed by two chipped facets of a semiconductor crystal with an R-value of  $\sim 30\%$ . Dielectric coatings are applied to the ends of injection lasers to protect their chipped surfaces from external influences, and also to obtain certain reflection coefficients at the output and rear ends of the resonator – up to  $10\%$  (semi-transparent mirror) and more than  $95\%$  (blind mirror), respectively – so that practically all the emitted power goes out through one facet of the cavity.

One of the suitable choices for forming a AR coating is  $Al_2O_3$  with bulk refractive index  $n = 1.76$ , satisfactory values of thermal conductivity ( $0.2-0.3$  W/(cm·K)) and forbidden band width ( $6.5$  eV).

Typical systems for obtaining HR coatings of injection laser resonators in the near-IR range are  $SiO_2/TiO_2$ ,  $SiO_2/Ta_2O_5$ ,  $SiO_2/Si$ ,  $Si_3N_4/Si$ . As a rule, the optical thickness of each layer is a quarter wave (QWOT – quarter wave optical thickness) or a multiple of it [4].

The refractive indices of the layers forming AR and HR coatings will depend on the methods and modes of deposition of the selected materials. In case of oxide deposition, the main difficulty is obtaining films of stoichiometric composition due to the effect of preferential sputtering of oxygen [5]. In this case, according to [5–7], the selected application rates and modes of reaction gas supply allow to obtain coatings with refractive indices close to those of bulk materials.

Based on the review of materials and their reference optical constants, as well as the principles of optical coatings design and required reflection coefficients, the schemes of anti-reflecting (AR) and highly reflective (HR) coatings were developed to form translucent and blind mirrors, respectively (Table 1).

### STUDY OF OPTICAL COATINGS LAYERS FORMATION MODES BY ION-BEAM DEPOSITION METHOD

The existing ion-beam deposition unit is equipped with two Kaufman-type ion sources, a system for optical monitoring of the applied coatings, a quartz system for measuring their thickness, and a high-performance cryo-system allowing to reach a vacuum depth of  $2 \cdot 10^{-6}$  bar. During the ion-beam deposition process, argon and oxygen are supplied as a source of ions for atomization of the target material and reagent gas, respectively. The gases are fed into a Kaufman-type ion gun [8], which allows the materials to be deposited at rates of  $\sim 0.01-0.2$  nm/s. The parameters of the applied dielectric layers are monitored using a quartz sensor and an optical monitoring system, allowing thickness and spectral characteristics of the applied layers to be



работам [5-7], подобранные скорости нанесения и режимы подачи реакционного газа позволяют получать покрытия с коэффициентами преломления, близкими к коэффициентам объемных материалов.

На основании проведенного обзора материалов и их справочных оптических констант, а также принципов проектирования оптических покрытий и требуемых коэффициентов отражения были разработаны схемы просветляющего (AR) и высокоотражающего покрытий (HR) для формирования полупрозрачного и глухого зеркал соответственно (табл.1).

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО НАНЕСЕНИЯ

Имеющаяся установка ионно-лучевого нанесения оснащена двумя источниками ионов типа Кауфман, системой оптического мониторинга наносимых покрытий, кварцевой системой измерения их толщины, высокопроизводительной криосистемой, позволяющей достигать глубины вакуума  $2 \cdot 10^{-6}$  бар. Во время процесса ионно-лучевого нанесения осуществляется подача аргона и кислорода в качестве источника ионов для распыления материала мишени и газа-реагента соответственно. Газы подаются в ионную пушку типа Кауфман [8], позволяющую наносить материалы со скоростями ~ 0,01-0,2 нм/с. Контроль параметров наносимых диэлектрических слоев осуществляется при помощи кварцевого датчика и оптической системы мониторинга, позволяющими определять толщины и спектральные характеристики наносимых слоев по мере их роста. Вакуумная камера содержит четыре водоохлаждаемые мишени, закрепленные на медных основаниях. Устройство камеры схематично представлено на рис.1.

Исследование режимов нанесения оптических покрытий состояло из отработки нанесения каждого материала, входящего в состав спроектированных покрытий, в виде монослоев на стекло-свидетель (КУ1) с последующим определением их оптических констант и плотностей при различных режимах нанесения. Изменяемыми параметрами выступали соотношение расходов газа-источника ионов и газа-реагента, скорости нанесения монослоев, а также температура подложки.

В процессе отработки нанесения каждого монослоя параметры ионного луча подбирались таким образом, чтобы получить максимально возможную скорость нанесения при

Таблица 1. Рассчитанные конструкции оптических покрытий торцов резонаторов лазеров спектрального диапазона 915–980 нм для материала подложки GaAs

Table 1. Calculated designs of optical coatings of laser resonator end faces in the 915–980 nm spectral range for GaAs substrate

Покрытие Coating	Схема Diagram	R, %
AR	1QWOT Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<10
HR	(1QWOT SiO <sub>2</sub> /1QWOT TiO <sub>2</sub> ) × 5	>95

determined as they grow. The vacuum chamber contains four water-cooled targets fixed on copper bases. The design of the chamber is schematically presented in Fig.1.

The study of optical coating deposition modes consisted of deposition of each material included in the designed coatings in the form of monolayers on a control glass (CG1) with the subsequent determination of their optical constants and densities under different deposition modes. The parameters to be varied were the ion source gas ratio and reagent gas flow rates, monolayer deposition rates, and substrate temperature.

In the process of deposition of each monolayer, the ion beam parameters were selected in such a way as to obtain the maximum possible deposition rate at given ratios of ion source gas and reagent gas (O<sub>2</sub>/Ar) flow rates. The choice of optimal gas flow ratios was based on the analysis of deviations of experimental density values for the obtained monolayers from reference values of film densities of stoichiometric composition  $\Delta\rho = \rho_{\text{теор.}} - \rho_{\text{эксп.}}$  [9-11].

The ratios at which these deviations were minimal (Fig.2) were chosen for the deposition of layers. Subsequently, optimal substrate temperatures for each monolayer were searched at the established speeds and ratios of gas flow rates (Table 3). Table 3 shows the refractive indices values of the obtained monolayers at different substrate temperatures in case of the selected modes of application rate, and gas flow rate ratio.

According to Table 2, the most pronounced dependence of the refractive index on temperature at other selected modes is characteristic of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monolayer. Taking into account other selected modes of deposition, the optimal substrate temperature for the maximum refractive index is achieved in case of deposition of dielectric layers of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> was 150 °C. Temperature for the maximum refractive index is achieved in case of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monolayer deposition was 300 °C.



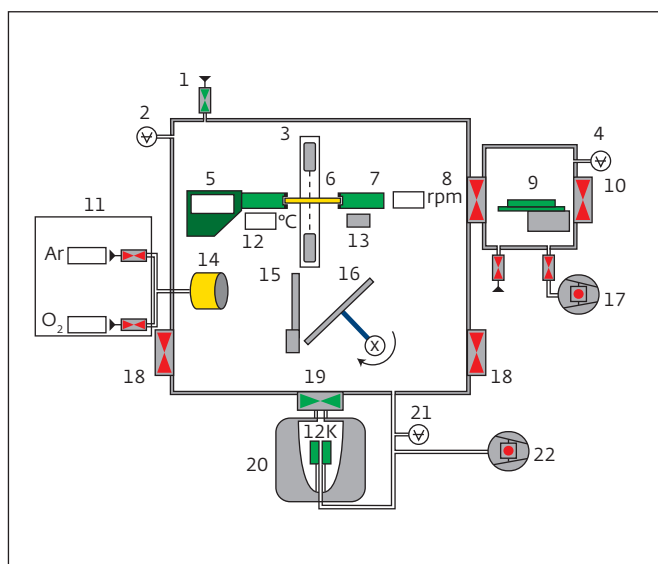


Рис.1. Устройство вакуумной камеры для проведения процессов ионно-лучевого нанесения материалов: 1 – клапан напуска азота в объем рабочей камеры; 2 – высоковакуумный датчик давления; 3 – система оптического мониторинга; 4 – датчик давления загрузочного бокса; 5 – сервопривод стола; 6 – система крепления оснастки; 7 – стол; 8 – шлюз для загрузки оснастки в рабочий объем вакуумной камеры из загрузочного бокса; 9 – механизм подачи оснастки в рабочий объем вакуумной камеры из загрузочного бокса; 10 – дверь загрузочного бокса; 11 – линии подачи аргона и кислорода; 12 – датчик температуры оснастки; 13 – кварцевый датчик для контроля толщины наносимых слоев; 14 – ионная пушка; 15 – заслонка мишени; 16 – система позиционирования мишеней с сервоприводом; 17 – безмасляный вакуумный насос; 18 – двери камеры; 19 – высоковакуумный клапан; 20 – криогенный насос; 21 – датчик давления; 22 – безмасляный вакуумный насос

Fig.1. Vacuum chamber device for ion-beam deposition of materials: 1 – nitrogen inlet valve in the working chamber volume; 2 – high-vacuum pressure sensor; 3 – optical monitoring system; 4 – pressure sensor of the loading box; 5 – table servo drive; 6 – tooling fastening system; 7 – table; 8 – gateway for loading the tooling into the working volume of the vacuum chamber from the loading box; 9 – tooling feeding mechanism into the working volume of the vacuum chamber from the loading box; 10 – loading box door; 11 – argon and oxygen supply lines; 12 – tooling temperature sensor; 13 – quartz sensor for controlling the thickness of applied layers; 14 – ion gun; 15 – target flap; 16 – servo-driven target positioning system; 17 – oil-free vacuum pump; 18 – chamber doors; 19 – high-vacuum valve; 20 – cryogenic pump; 21 – pressure sensor; 22 – oil-free vacuum pump.

заданных соотношениях расходов газа-источника ионов и газа-реагента ( $O_2/Ar$ ). Выбор оптимальных соотношений расходов газов осуществлялся на основании анализа отклонений

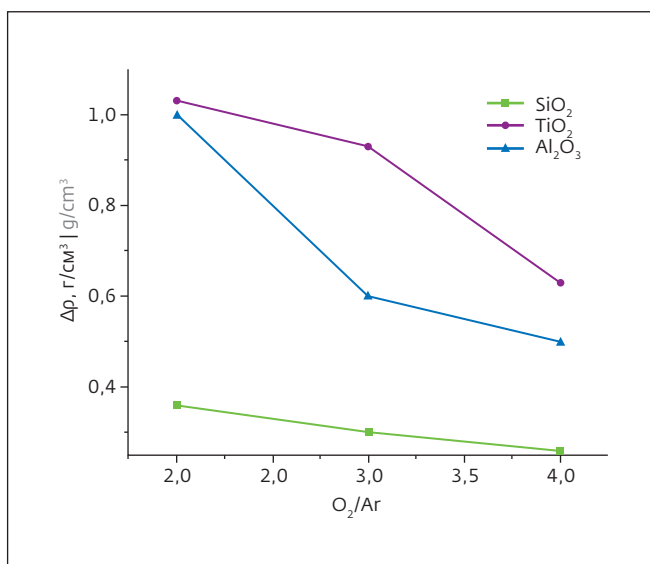


Рис.2. Зависимость разницы справочных и экспериментальных значений плотностей монослоев от соотношения расходов газа-источника ионов и газа-реагента

Fig.2. Dependence of difference between reference and experimental values of monolayer densities on the ion source gas ratio and reagent gas flow rates

Calculations of spectral characteristics for the proposed designs of optical coatings (Table 1) at experimental values of refractive indices of the studied monolayers allowed to obtain the transmission coefficients of coatings on GaAs substrate and CG1 (Fig. 3a, b) and to provide direct control of optical properties during subsequent fabrication of anti-reflecting (AR) and highly reflective (HR) coatings on the ion-beam deposition unit.

#### APPROBATION OF OPTICAL COATING DESIGNS

High-reflective and anti-reflecting coatings were applied to the ends of laser diode linacs (LDBs) by ion-beam deposition. Beforehand, four LDBs with the cavity length of 4 mm were stacked in a special clamp for LDBs, after this they were installed in a tooling for fixing in the ion-beam deposition chamber. The parameters of ion-beam deposition of layers, including temperature, deposition rates, and the ion source gas ratio and reagent gas flow rates were set according to the refractive indices of  $TiO_2$  ( $n=2,35$ ),  $SiO_2$  ( $n=1,46$ ) and  $Al_2O_3$  ( $n=1,65$ ).

As a result of two processes, optical coatings were obtained on the output and rear end faces of the LDB, and the spectral characteristics of the coatings were controlled using CG1 glass witness substrates on a spectrophotometer with an accuracy of at least 1% of T, where T is the transmission coefficient.



Таблица 2. Оптимальные режимы нанесения монослоев и коэффициенты преломления в зависимости от температуры подложки  
 Table 2. Optimal monolayer deposition modes and refractive indices as a function of substrate temperature

Монослой Monolayer	Скорость нанесения, нм/с Deposition rate, nm/s	Ar/O <sub>2</sub>	n (975 нм   nm)		
			80 °C	150 °C	300 °C
SiO <sub>2</sub>	0,08	4	1,45	1,46	1,46
TiO <sub>2</sub>	0,03	4	2,29	2,35	2,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	4	1,58	1,60	1,65

экспериментальных значений плотностей для получаемых монослоев от справочных значений плотностей пленок стехиометрического состава  $\Delta\rho = \rho_{теор.} - \rho_{эксп.}$  [9-11].

Соотношения, при которых данные отклонения являлись минимальными (рис.2), были выбраны для нанесения слоев. В дальнейшем при установленных скоростях и соотношениях расходов газов осуществлялся поиск оптимальных значений температур подложек для каждого монослоя (табл.3). В табл.3 представлены значения коэффициентов преломления получаемых монослоев при различных температурах подложки в случае подобранных режимов скорости нанесения и соотношения расходов газов.

Согласно табл.2, наиболее выраженная зависимость коэффициента преломления от температуры при прочих установленных режимах характерна для монослоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. С учетом прочих подобранных режимов нанесения оптимальная температура подложки, при которой достигается максимальный коэффициент преломления в случае нанесения диэлектрических слоев SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>, составила 150 °C. Температура, при которой достигается максимальный коэффициент преломления в случае нанесения монослоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, составила 300 °C.

Проведенный расчет спектральных характеристик для предложенных конструкций оптических покрытий (табл.1) при экспериментальных значениях коэффициентов преломления

The obtained transmittance coefficients on CG1 for the spectral range of 915-980 nm amounted to 87.9% and 2.7% for anti-reflecting and highly reflective coatings, respectively. Deviation of experimental values from calculated values is not more than 1.5% (Fig.4a, b) and can be due to the difference between the specified and actual refractive indices of the monolayers due to insignificant deviation of temperature and rate modes from application modes previously established as optimal.

Comparisons of the electro-optical characteristics of LDBs before and after application of optical coatings on the end faces of their cavities were made in order to estimate the power gain and the values of the actual reflection coefficients on the output and rear mirrors of LDBs. The measurements were carried out on the LDB certification unit in pulse generation mode in current range from 0 to 3A. Comparison of measurement results showed an increase in power value by a factor of 1.9 after application of anti-reflective coating and highly reflective coatings. Figure 5 shows typical watt-ampere characteristics (W-I) of single LDB emitters before and after application of optical coatings.

The actual reflection coefficients of the mirrors (R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>) formed at the ends of the cavities of length L = 4 mm were found from formula (1) for the radiation output losses  $\alpha_{ext}$ , and were determined earlier for original laser heterostructure

$$\alpha_{ext} = \left(\frac{1}{2L}\right) \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right). \quad (1)$$

Таблица 3. Измеренные и рассчитанные параметры одиночных эмиттеров ЛЛД с нанесенными зеркалами  
 Table 3. Measured and calculated parameters of single LDL emitters with applied mirrors

L, см   cm	I <sub>th</sub> , А	I, А	P <sub>out</sub> , Вт   W	$\alpha_{ext}$ , см <sup>-1</sup>  cm <sup>-1</sup>	R <sub>1</sub> , %	R <sub>2</sub> , %
4	0,4	3	2,3	2,65	96,3	4,4

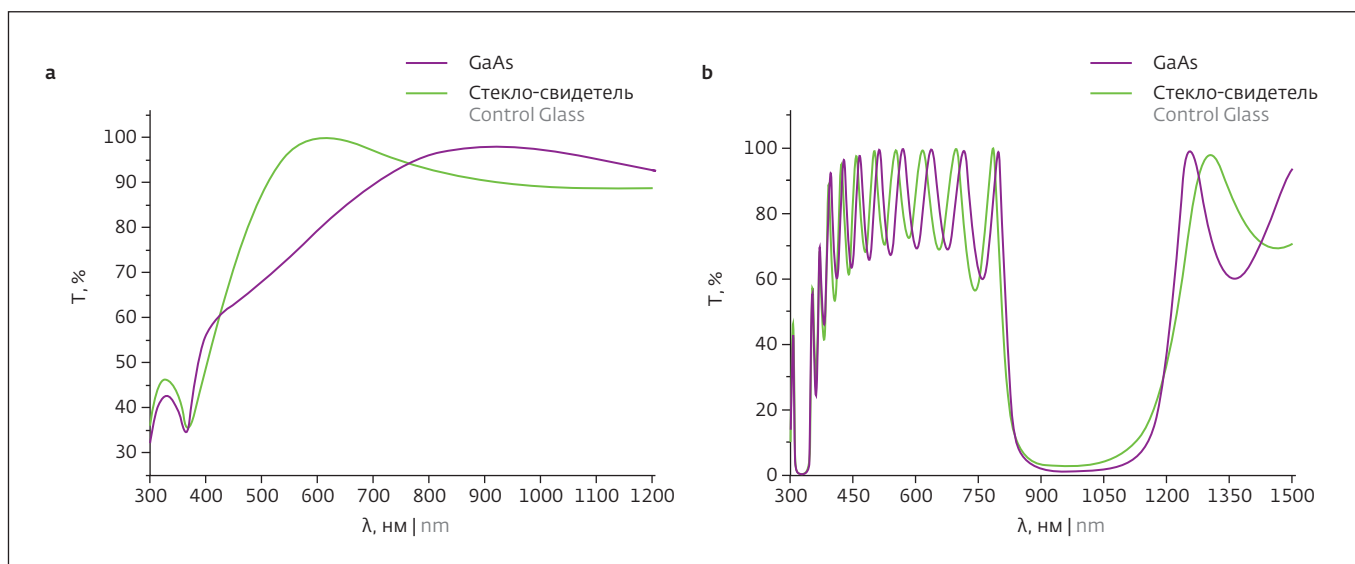


Рис.3. Расчетные графики зависимостей коэффициента пропускания  $T$  от длины волны для: а – просветляющего, б – высокоотражающего покрытий на подложках GaAs и КУ1 с учетом полученных значений коэффициентов преломления монослоев

Fig.3. Calculated plots of dependences of transmittance  $T$  on wavelength for: a – illuminating, b – highly reflective coatings on GaAs and CG1 substrates taking into account obtained values of refractive indices of monolayers

исследуемых монослоев позволил получить коэффициенты пропускания покрытий на подложке GaAs и свидетеле КУ1 (рис.3а, б) и обеспечить прямой контроль оптических свойств при последующем изготовлении просветляющего (AR) и высокоотражающего (HR) покрытий на установке ионно-лучевого нанесения.

### АПРОБАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Высокоотражающие и просветляющие покрытия были нанесены на торцы линеек лазерных диодов (ЛЛД) методом ионно-лучевого нанесения. Предварительно ЛЛД в количестве четырех штук с длиной резонатора 4 мм набирались в стопу в специальный зажим для ЛЛД, после чего устанавливались в оснастку для закрепления в камере ионно-лучевого нанесения. Параметры ионно-лучевого нанесения слоев, включающие температуру, скорости их нанесения и соотношение расходов газа-источника ионов и газа-реагента были установлены в соответствии с коэффициентами преломления  $\text{TiO}_2$  ( $n=2,35$ ),  $\text{SiO}_2$  ( $n=1,46$ ) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $n=1,65$ ).

В результате двух процессов были получены оптические покрытия на выходном и заднем торцах ЛЛД, контроль спектральных характеристик покрытий осуществлялся при помощи подложек-свидетелей из стекла

The actual reflection coefficients at the output ( $R_1$ ) and rear ( $R_2$ ) mirrors of the single emitter LDBs are summarized in Table 3.

The results of comparison of the W-I of single LDB emitters before and after optical coatings and calculation of actually obtained values indicate that required reflection coefficients at the rear and output facets of the injection laser cavities have been achieved.

### CONCLUSIONS

The task of technology development to obtain optical coatings for resonators of injection lasers was successfully solved by the ion-beam deposition method. The conducted studies of the specifics of the method application allowed working out the deposition modes of dielectric monolayers included in design of the designed optical coatings. As a result of technology development, the required values of reflection coefficients were achieved, as evidenced by the results of comparing the output radiation powers of single LDB emitters before and after application of optical coatings, as well as calculations of actual reflection coefficients at output and rear ends of injection lasers resonators.

### PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is

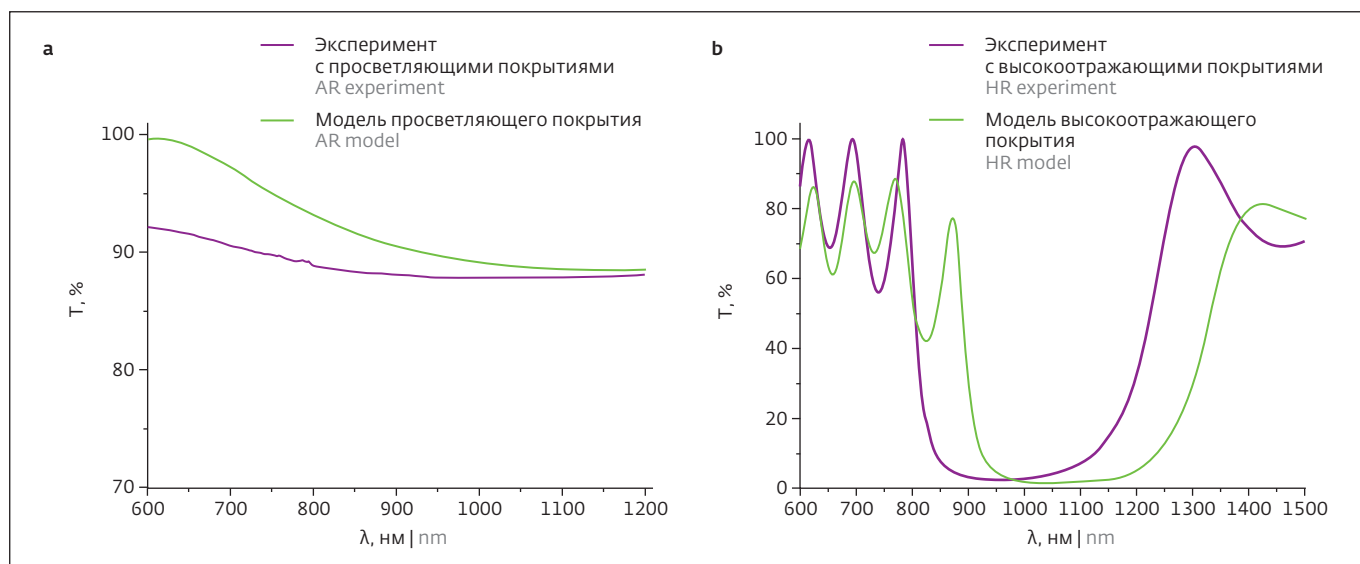


Рис.4. Сравнение зависимостей коэффициента пропускания  $T$  от длины волны для расчетных и полученных для: а – просветляющего и б – высокоотражающего покрытий на подложке КУ1

Fig.4. Comparison of dependences of transmittance  $T$  on wavelength for calculated and obtained for: a – translucent and b – highly reflective coatings on the substrate CG1

КУ1 на спектрофотометре с точностью не менее 1%  $T$ , где  $T$  – коэффициент пропускания.

Полученные коэффициенты пропускания на свидетелях из КУ1 для спектрального диапазона 915–980 нм составили 87,9 и 2,7% для просветляющего и высокоотражающего покрытий соответственно. Отклонение экспериментальных значений от расчетных составляет не более 1,5% (рис.4а, б) и может быть обусловлено разницей заданных и фактических коэффициентов преломления монослоев в силу незначительного отклонения температурных и скоростных режимов от режимов нанесения, ранее установленных как оптимальные.

Сравнения электрооптических характеристик ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий на торцы их резонаторов производились с целью оценки прироста мощности и значений фактических коэффициентов отражения на выходном и заднем зеркалах ЛЛД. Измерения проводились на установке паспортизации ЛЛД в импульсном режиме генерации в диапазоне токов от 0 до 3А. Сравнение результатов измерений показало увеличение значения мощности в 1,9 раз после нанесения просветляющего и высокоотражающего покрытий. На рис.5 представлены типичные ваттамперные характеристики (ВАХ) одиночных эмиттеров ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий.

also grateful for their consent to publish papers on the journal’s website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

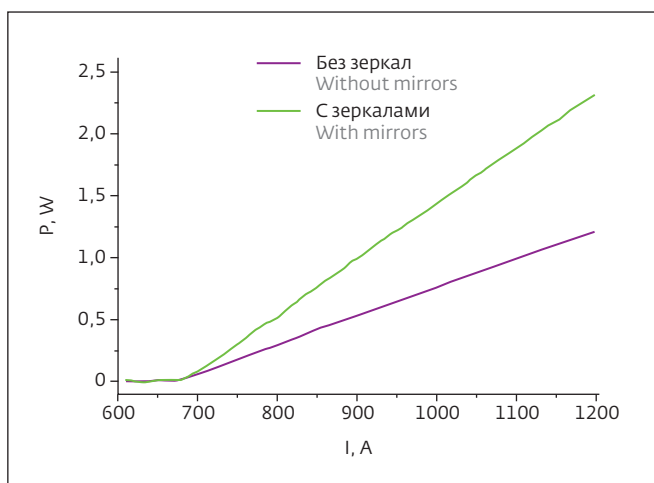


Рис.5. ВАХ одиночного эмиттера ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий в импульсном режиме лазерной генерации  
Fig.5. WAC of a single LDL emitter before and after optical coatings application in pulsed laser generation mode



Фактические коэффициенты отражения зеркал ( $R_1$  и  $R_2$ ), сформированных на торцах резонаторов длиной  $L = 4$  мм, были найдены из формулы (1) для потерь на вывод излучения  $\alpha_{\text{ext}}$ , которые были определены ранее для исходной лазерной гетероструктуры

$$\alpha_{\text{ext}} = \left( \frac{1}{2L} \right) \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (1)$$

Фактические коэффициенты отражения на выходном ( $R_1$ ) и заднем ( $R_2$ ) зеркалах одиночных эмиттеров ЛЛД приведены в табл.3.

Результаты сравнения ВАХ одиночных эмиттеров ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий и расчет фактически получаемых значений свидетельствуют о достижении необходимых коэффициентов отражения на задних и передних торцах резонаторов инжекционных лазеров.

## ВЫВОДЫ

Задача разработки технологии получения оптических покрытий для резонаторов инжекционных лазеров была успешно решена методом ионно-лучевого нанесения. Проведенные исследования особенностей применения метода позволили отработать режимы нанесения диэлектрических монослоев, входящих в конструкцию спроектированных оптических покрытий. В результате разработки технологии были достигнуты требуемые значения коэффициентов отражения, о чем свидетельствуют результаты сравнения выходных мощностей излучения одиночных эмиттеров ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий, а также расчет фактических коэффициентов отражения на выходных и задних торцах резонаторов инжекционных лазеров.

## ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

*Декларация о конфликте интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wei C.T., Shieh H.D. Stresses and temperature stability of dense wavelength division multi-

plexing filters prepared by reactive ion-assisted e-gun evaporation // Jpn. J. Appl. Phys. 2005. V. 44. PP. 7577-7581.

2. Venkataraj S., Drese R., Kappertz O., Jayavel R., Wutting M. Characterization of niobium oxide films prepared by reactive dc magnetron sputtering // Phys. Status Solidi A, 2001. V. 188. PP. 1047-1058.
3. Yoon S.G., Kim Y.T., Kim H.K., Kim M.J., Lee H.M., Yoon D.H. Comparison of residual stress and optical properties in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by single and dual ion beam sputtering // Materials Science and Engineering B. 2005. V. 118. PP. 234-237.
4. Ершов А.В., Машин А.И. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электроннолучевого испарения // Учебно-методический материал по программе повышения квалификации "Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем", Нижний Новгород, 2006.
5. Sahoo N.K., Thakur S., Bhattacharyya D., Das N.C. Ion assisted deposition of refractory oxide thin film coatings for improved optical and structural properties // Bhabha Atomic Research Centre, India, Report BARC/1999/E/001, 1999.
6. Çetinörgü E. et al. Mechanical and thermoelastic characteristics of optical thin films deposited by dual ion beam sputtering // Applied optics. 2009. V. 48, No. 23. PP. 4536-4544.
7. Farhan M.S., Zalnezhad E., Bushroa A.R. Properties of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films prepared by ion-assisted deposition / Materials Research Bulletin, 2013. V. 4, No. 10. PP. 4206-4209.
8. Kaufman H.R., Robinson R.S. Broad-beam ion source technology and applications / Vacuum, 1989. V. 39, No. 11-12. PP. 1175-1180.
9. Radovic I. et al. Stoichiometric SiO<sub>2</sub> thin films deposited by reactive sputtering // Materials Chemistry and Physics, 2007. V. 104. PP. 172-176.
10. Mergel D., Buschendorf D., Eggert S., Grammes R., Samset B. Density and refractive index of TiO<sub>2</sub> films prepared by reactive evaporation // Thin Solid Films. 2000. V. 371, No. 1-2. PP. 218-224.
11. Groner M.D., Fabreguette F.H., Elam J.W., George S.M. Low-Temperature Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Atomic Layer Deposition // Chem. Mater. 2004. V. 16. PP. 639-645.

# УФА 2023

ВАНХЭКСПО

# 15-17 НОЯБРЯ



## РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

### ВЫСТАВКИ

- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- МЕТАЛЛООБРАБОТКА
- ИННОВАЦИОННЫЙ  
ПОТЕНЦИАЛ УФЫ

[www.prombvk.ru](http://www.prombvk.ru)

+7 (347) 246-41-77

+7 (917)-354-45-05

[promexpo@bvkexpo.ru](mailto:promexpo@bvkexpo.ru)

 prombvk

 promexpoufa



Организаторы



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
ЭНЕРГЕТИКИ И ИННОВАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БАШКИРСКАЯ  
ВЫСТАВОЧНАЯ  
КОМПАНИЯ

Поддержка



РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ  
«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»