

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

А.В. Фомин, Е.М. Филоненко, Е.А. Анашкин

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

FEATURES OF THE ION-BEAM DEPOSITION TECHNOLOGY OF MULTI-LAYER OPTICAL COATINGS FOR INJECTION LASERS CAVITIES

A.V. Fomin, E.M. Filonenko, E.A. Anashkin

ABSTRACT

The work is devoted to the creation of a technology for obtaining optical coatings for injection lasers cavities on an ion-beam deposition facility. The constructions of optical coatings have been designed to meet the requirements for facets reflection coefficients and dielectric layers deposition modes have been determined. The development of the deposition modes consisted in determining the optimal parameters of the ion beam, the ratio of the flow rates of the ion-source gas and the reagent gas, and the substrate temperature. The calculation of the spectral characteristics of high-reflection and anti-reflection coatings obtained on the basis of the proposed designs and the experimental values of the dielectric layers refractive indices indicates that the required reflection coefficients for injection lasers cavities have been achieved.

KEYWORDS

ION-BEAM DEPOSITION, REFRACTIVE INDICES, OPTICAL COATINGS, INJECTION LASERS

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, 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 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 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$, SiO_2/Si , $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$.

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 работам [5-7], подобранные скорости нанесения и режимы подачи реакционного газа позволяют получать покрытия с коэффициентами преломления близким 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).

Таблица 1.

Рассчитанные конструкции оптических покрытий торцов резонаторов лазеров спектрального диапазона 915-980 нм для материала подложки GaAs

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО НАНЕСЕНИЯ

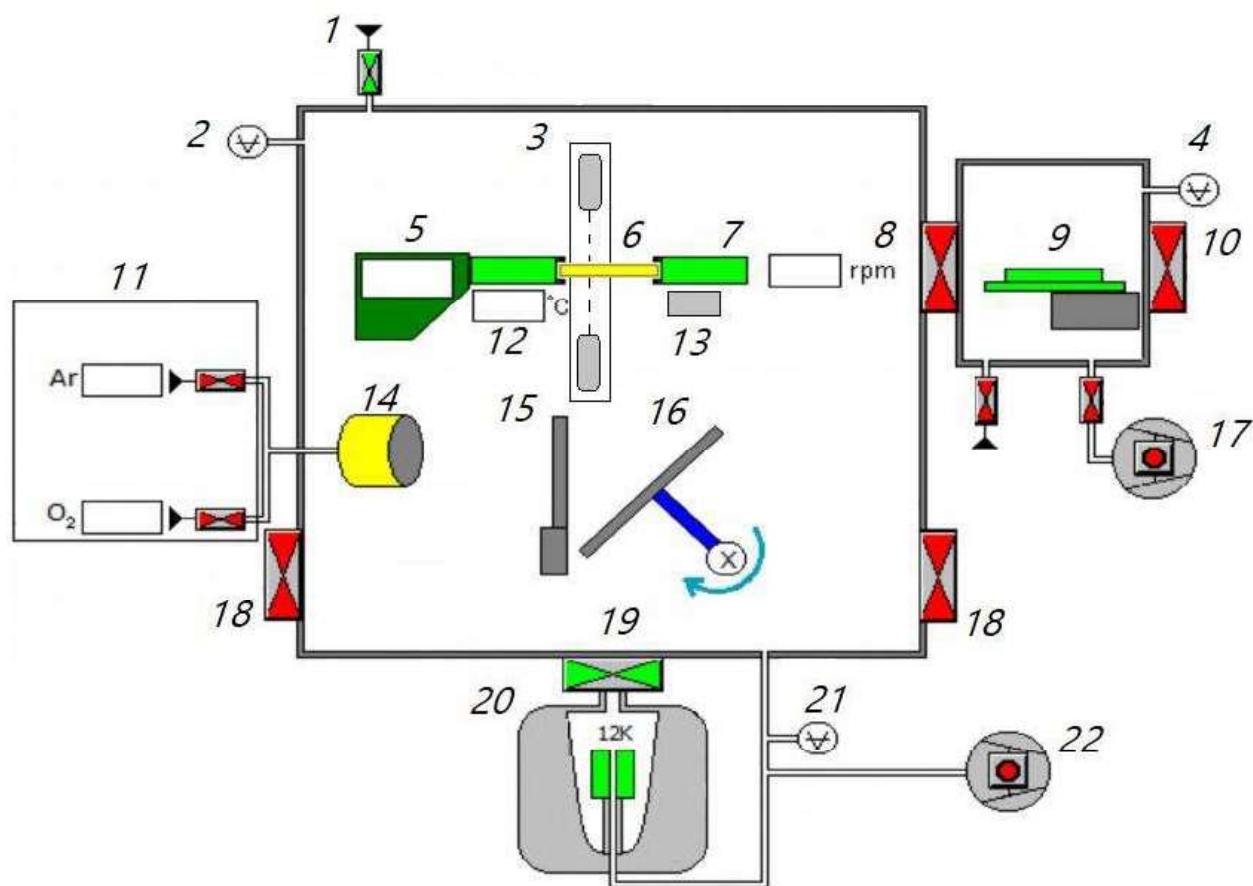
Имеющаяся установка ионно-лучевого нанесения оснащена двумя источниками ионов типа Кауфман, системой оптического мониторинга наносимых покрытий, кварцевой системой измерения их толщины, высокопроизводительной криосистемой, позволяющей достигать глубины вакуума $2 \cdot 10^{-6}$ бар. Во время процесса 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 $\sim 0,01 - 0,2$ 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 4 водоохлаждаемые мишени, закреплённые на медных основаниях. Устройство камеры схематично представлено на рисунке 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 заданных соотношениях расходов газа-источника ионов и газа-реагента (O₂/Ar). Выбор оптимальных соотношений расходов газов осуществлялся на основании анализа отклонений

экспериментальных значений плотностей для получаемых монослоев от справочных значений плотностей пленок стехиометрического состава $\Delta\rho = \rho_{\text{теор.}} - \rho_{\text{экср.}}$ [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 таблице 3 представлены значения коэффициентов преломления получаемых монослоев при различных температурах подложки в случае подобранных режимов скорости нанесения и соотношения расходов газов.



- 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

Рис. 1. Устройство вакуумной камеры для проведения процессов ионно-лучевого нанесения материалов

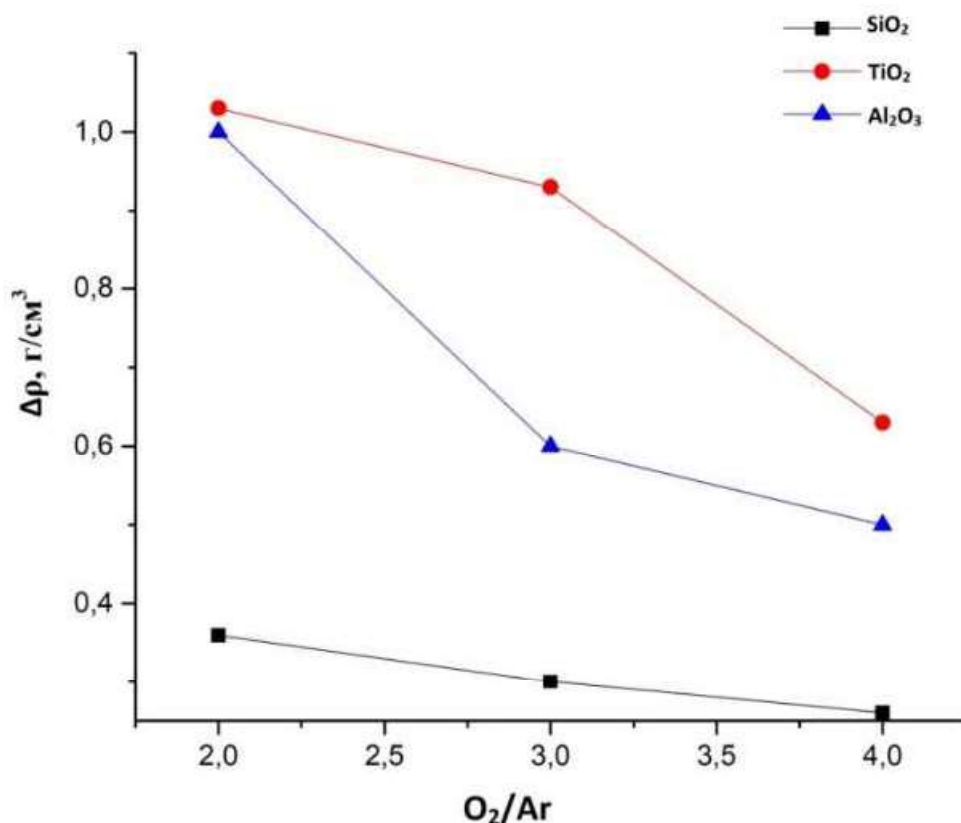


Рис. 2. Зависимость разницы справочных и экспериментальных значений плотностей монослоев от соотношения расходов газа-источника ионов и газа-реагента

Таблица 2.
 Оптимальные режимы нанесения монослоев и коэффициенты преломления
 в зависимости от температуры подложки

Монослой	Скорость нанесения, нм/с	Ar/O₂	n (975 нм)		
			80°C	150°C	300°C
SiO₂	0,08	4	1,45	1,46	1,46
TiO₂	0,03	4	2,29	2,35	2,35
Al₂O₃	0,05	4	1,58	1,60	1,65

Согласно таблице 2, наиболее выраженная зависимость коэффициента преломления от температуры при прочих установленных режимах характерна для монослоя Al₂O₃. С учетом прочих подобранных режимов нанесения оптимальная температура подложки, при которой достигается максимальный коэффициент преломления в случае нанесения диэлектрических слоев SiO₂ и TiO₂, составила 150°C. Температура, для которой достигается максимальный коэффициент преломления в случае нанесения монослоя Al₂O₃, составила 300°C.

Проведенный расчет спектральных характеристик для предложенных конструкций оптических покрытий (табл. 1) при экспериментальных значениях коэффициентов преломления исследуемых монослоев позволил получить коэффициенты пропускания покрытий на подложке GaAs и свидетеле КУ1 (рис. 3 а, б) и обеспечить прямой контроль оптических свойств при последующем изготовлении просветляющего (AR) и высокоотражающего (HR) покрытий на установке ионно-лучевого нанесения.

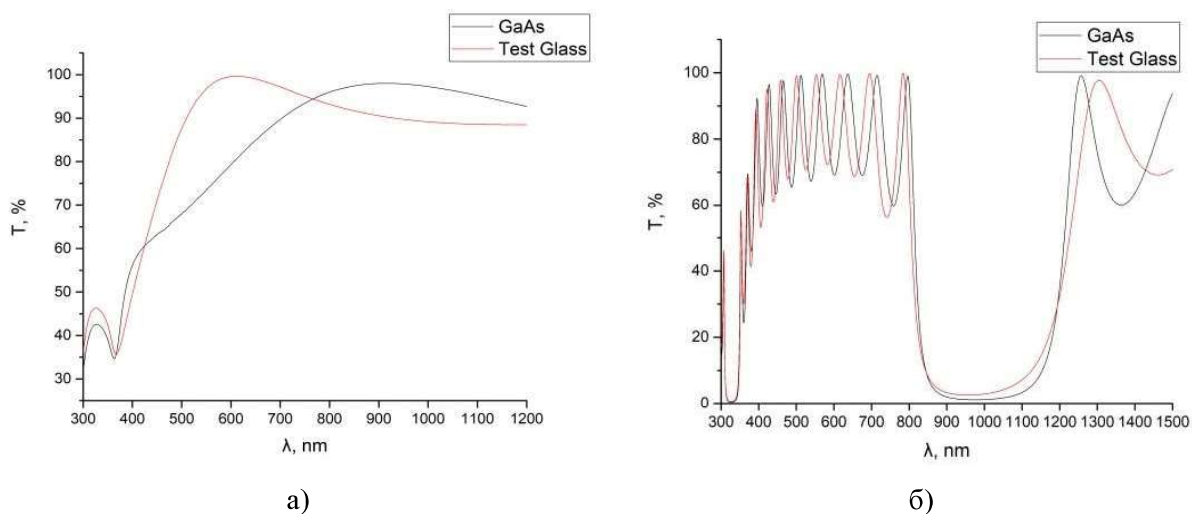


Рис. 3. Расчетные графики зависимостей коэффициента пропускания T от длины волны для а) – просветляющего и б) – высокоотражающего покрытий на подложках GaAs и КУ1 с учетом полученных значений коэффициентов преломления монослоев

АПРОБАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ 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 TiO_2 ($n=2,35$), SiO_2 ($n=1,46$) и Al_2O_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 КУ1 на спектрофотометре с точностью не менее 1% T , где T – коэффициент пропускания.

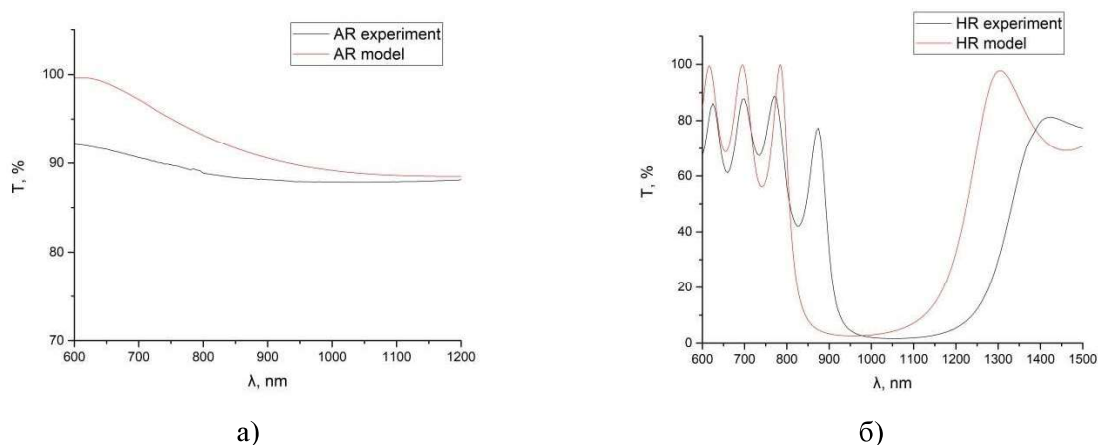


Рис. 4. Сравнение зависимостей коэффициента пропускания T от длины волны для расчетных и полученных а)-просветляющего и б)-высокоотражающего покрытий на подложке КУ1

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 рисунке 5 представлены типичные ватт-амперные характеристики (ВтАХ) одиночных эмиттеров ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий.

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

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

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

Результаты сравнения ВтАХ 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.

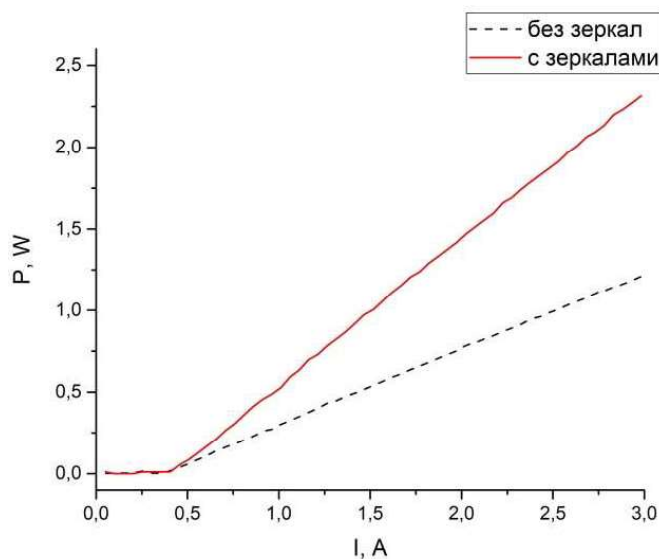


Рис. 5. ВтАХ одиночного эмиттера ЛЛД до и после нанесения оптических покрытий в импульсном режиме лазерной генерации

Таблица 3
Измеренные и рассчитанные параметры одиночных эмиттеров ЛЛД
с нанесёнными зеркалами

L, см	I _{th} , А	I, А	P _{out} , Вт	α_{ext} , см ⁻¹	R ₁ , %	R ₂ , %
4	0,4	3	2,3	2,65	96,3	4,4

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 расчёт фактических коэффициентов отражения на выходных и задних торцах резонаторов инжекционных лазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wei C.T., Shieh H.-P. D. Stresses and temperature stability of dense wavelength division multiplexing filters prepared by reactive ion-assisted e-gun evaporation // Jpn. J. Appl. Phys., 2005, V.44, PP.7577–7581.
2. Venkataraj, 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 Ta₂O₅ 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, 99 с.
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, №. 23, PP. 4536-4544.
7. Farhan M. S., Zalnezhad E., Bushroa A. R. Properties of Ta₂O₅ thin films prepared by ion-assisted deposition // Materials Research Bulletin, 2013, V. 48, №. 10, PP. 4206-4209.
8. Kaufman H.R., Robinson R.S. Broad-beam ion source technology and applications // Vacuum, 1989, V. 39, №. 11–12, PP. 1175-1180.
9. Radovic I. et al. Stoichiometric SiO₂ 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 TiO₂ films prepared by reactive evaporation // Thin Solid Films, 2000, V. 371, №. 1-2, pp. 218–224.
11. Groner M. D., Fabreguette F. H., Elam J. W., George S. M. Low-Temperature Al₂O₃ Atomic Layer Deposition // Chem. Mater., 2004, V.16, PP. 639-645.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

А.В. Фомин – кандидат физико-математических наук, начальник отдела ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск.

Е.М. Филоненко – научный сотрудник ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск; e-mail: dep5@vniitf.ru

Е.А. Анашкин – начальник лаборатории, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск