



Получено: 13.03.2026 г. | Принято: 17.03.2026 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2026.19.2.144.152>

Научная статья

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСИДОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ

С.В.Сидорова¹, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-3002-1246 / sidorova@bmstu.ru

Д.С.Трекушевский¹, студ., ORCID: 0009-0001-9728-9183

А.Д.Купцов¹, асп., ORCID: 0009-0002-3997-9722

Аннотация. Представлены результаты обзора источников информации по тематике лазерных зеркал. Обобщены и структурированы данные по материалам брэгговских зеркал, приведены характеристики L- и H-слоев. Обоснован выбор материалов для создания лазерного зеркала на многослойной оксидной пленке. Приведены результаты отработки режимов осаждения наноразмерных тонкопленочных слоев оксида кремния и оксида титана. Описаны режимы и представлены результаты исследования толщин покрытий оксида кремния и оксида алюминия. Методом полного факторного эксперимента обработаны экспериментальные данные. Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость толщин оксидных слоев от режимов магнетронного распыления. Показана многослойная структура, состоящая из чередующихся слоев оксида кремния и оксида титана.

Ключевые слова: лазерное зеркало, брэгговское зеркало, оксид кремния, оксид титана, кварцевое стекло, магнетронное распыление, уравнение регрессии

Для цитирования: С.В. Сидорова, Д.С. Трекушевский, А.Д. Купцов. Тонкие пленки оксидов для лазерных зеркал. НАНОИНДУСТРИЯ. 2026. Т. 19. № 2. С. 144-152. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2026.19.2.144.152>.

Received: 13.03.2026 | Accepted: 17.03.2026 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2026.19.2.144.152>

Original paper

OXIDE THIN FILMS FOR LASER MIRRORS

S.V.Sidorova¹, Cand. of Sci. (Tech), Docent, ORCID: 0000-0002-3002-1246 / sidorova@bmstu.ru

D.S.Trekushevskiy¹, Student, ORCID: 0009-0001-9728-9183

A.D.Kouptsov¹, Post Graduate, ORCID: 0009-0002-3997-9722

Abstract. The results of a review of information sources on the subject of laser mirrors are presented. The data on the materials of the Bregg mirrors are generalized and structured. The characteristics of the L- and H-layers are given. The choice of materials for creating a laser mirror on a multilayer oxide film is justified. The results of testing the deposition modes of nanoscale thin-film layers of silicon oxide and titanium oxide are presented. The modes are described and the results of a study of the thicknesses of silicon oxide and aluminum oxide coatings are presented. The experimental data were processed using the method of a complete factorial experiment. Regression equations describing the dependence of oxide layer thicknesses on magnetron sputtering modes are obtained. A multilayer structure consisting of alternating layers of silicon oxide and titanium oxide is shown.

Keywords: laser mirror, Bregg mirror, silicon oxide, titanium oxide, quartz glass, magnetron sputtering, regression equation

For citation: S.V.Sidorova, D.S. Trekushevskiy, A.D. Kouptsov. Oxide thin films for laser mirrors. NANOINDUSTRY. 2026. Vol. 19. No. 2. PP. 144-152. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2026.19.2.144.152>.

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Лазерные зеркала широко используются в современных лазерных системах для генерации лазерного луча и его позиционирования. Классической является конструкция зеркала, состоящая из тонкой металлической пленки, расположенной на стеклянной подложке. Однако с развитием лазерных технологий и усложнением систем, использующих лазерное излучение, возникла потребность в зеркалах с низким коэффициентом поглощения. На смену металлическим зеркалам пришли многослойные диэлектрические зеркала, чья структура представляет собой брэгговский отражатель [1-3]. В последнем за счет явления конструктивной интерференции достигается высокий коэффициент отражения зеркала, близкий к единице.

Диэлектрические (брэгговские) лазерные зеркала представляют собой одномерный фотонный кристалл, состоящий из нескольких пар слоев прозрачных материалов [1]. Фотонный кристалл – это периодическая структура, которая позволяет влиять на распространение излучения в одном или нескольких направлениях. Каждый фотонный кристалл обладает фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ) – областью частот, не пропускаемых структурой фотонного кристалла [2]. Устройство брэгговской решетки основано на явлении конструктивной интерференции (рис.1).

Оно состоит из нескольких пар L- и H-слоев (периодов зеркала), сформированных на подложке с высокой пропускной способностью света. Оптическая толщина каждого слоя подбирается равной четверти средней длины волны λ ФЗЗ [3]:

$$n_H d_H = n_L d_L = \frac{\lambda}{4}. \quad (1)$$

Из-за этого оптические пути I_A и I_B различаются ровно на одну длину волны, поэтому разность фаз между двумя волнами, отраженными от H-слоя, составляет 2π , то есть разность фаз отсутствует. В то же время разница в оптическом пути лучей, отраженных от L-слоев, составляет половину длины волны и смещает фазу на π , однако ввиду перехода из более плотной оптической среды в менее плотную фаза отраженного луча дополнительно смещается на π и суммарно смещение составляет 2π . В результате все отраженные волны имеют одинаковую фазу этому лучу и отраженные лучи света совпадают по фазе и усиливают друг друга, что обеспечивает высокий коэффициент отражения, который может превышать 99,99% [1, 3]. Ширина ФЗЗ брэгговского зеркала пропорциональна разности показателей преломления материалов [1].

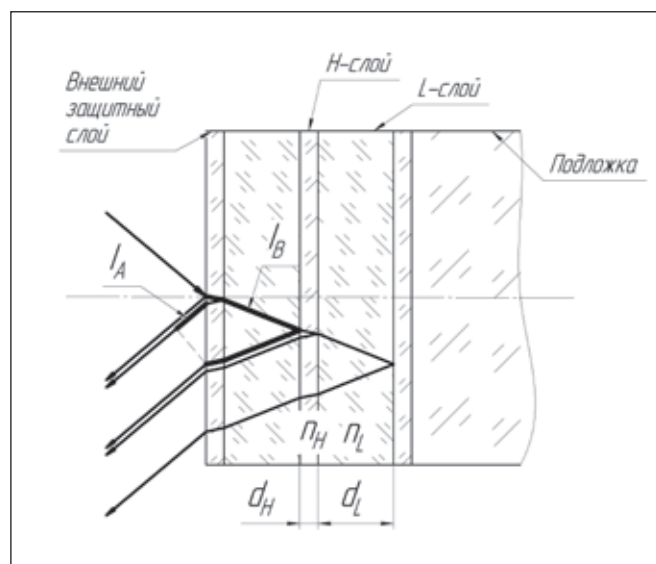


Рис.1. Принцип работы брэгговского зеркала

Fig.1. The principle of the Bragg mirror

Именно так работает диэлектрическое зеркало для видимого или ИК-диапазона лазерного излучения. Однако при переходе в УФ-диапазон коэффициент отражения такой конструкции снижается. Во-первых, со снижением длины волны меняется показатель преломления [4, 5]. Это означает, что при отклонении длины волны от заданной условие (1) не работает, и ФЗЗ такого зеркала значительно уменьшается. Во-вторых, при уменьшении длины волны возрастает проникающая способность излучения, и даже самые прозрачные материалы поглощают УФ-излучение [1]. Это определяет основные требования для материалов зеркала – стабильность показателя преломления в УФ-диапазоне, большая разница в показателях преломления и низкие потери на поглощение.

На сегодняшний день достаточно распространены брэгговские зеркала для видимого и ИК-спектров лазерного излучения, но гораздо меньше – отражатели для УФ-спектра. Это связано с тем, что материалы функциональных слоев зеркала значительно меняют свои оптические свойства при уменьшении длины волны. Потенциал применения диэлектрических зеркал для УФ-лазеров, в частности, лазеров ближнего УФ-диапазона в микроэлектронике, спектроскопии и биомедицинских технологиях определяют актуальность разработки технологий их изготовления.

Ключевой операцией технологии создания лазерного зеркала является формирование многослойной структуры из тонких пленок оксидов с разными показателями преломления.



Целью работы является обобщение информации и отработка режимов формирования слоев диэлектрического лазерного зеркала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор материалов для брэгговского лазерного зеркала сделан на основании обзора источников информации и связан с задачами, которые решаются в лаборатории "Нано- и микротехнологии" кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Основным требованием к материалу заготовки является высокое пропускание в УФ-спектре, так как излишнее отражение будет вносить помехи в отражаемый луч, а излишнее поглощение излучения может привести к разрушению зеркала. Наиболее распространенным материалом подложки диэлектрических зеркал является кварцевое стекло (SiO_2) [6, 7]. Оно обладает высоким коэффициентом пропускания света и диапазоном пропускаемых волн. Однако для работы с УФ- и ИК-спектрами необходимо подбирать соответствующие марки зеркал, так как пропускание в этих диапазонах сильно зависит от технологии изготовления [6–8]. В табл.1 представлены основные марки кварцевых стекол и их пропускная способность в различных областях спектра длин волн от экстремального УФ- до ИК-диапазонов.

Из данных табл.1 видно, что для работы в ИК-спектре предпочтительно использовать марку IR Vitreosil, а для работы в УФ-спектре целесообразно применять стекла марки Spectrosil и OH Vitreosil. С учетом потребности в создании зеркала для УФ-спектра следует привести российские аналоги этих стекол. Для Spectrosil ближайшим аналогом является стекло марки КУ-1, с тем уточнением, что

пропускание свыше 90% начинается на длине волны в 180 нм, свыше 99% – на длине в 220 нм. Аналогом для OH Vitreosil может выступать стекло марки КУ-2, его характеристики примерно соответствуют указанным в табл.1 значениям пропускания [7, 8].

Наиболее распространенными материалами для формирования функциональных слоев брэгговских зеркал являются прозрачные L- и H-оксиды [4]. Наибольшее распространение среди L-оксидов получил оксид кремния SiO_2 . Его повсеместное использование в лазерных зеркалах обуславливается одним из самых низких показателей преломления в видимом спектре ($n = 1,44\text{--}1,50$) [1, 3, 4]. Альтернативой может выступать оксид алюминия Al_2O_3 , ввиду меньших потерь на поглощение и большей термостойчивости [9, 10]. Сведения о различных физических свойствах оксидов кремния и алюминия приведены в табл.2 [3, 4, 9–13].

Наиболее подходящим L-оксидом для проектируемого изделия был определен оксид кремния SiO_2 . Такой выбор был сделан исходя из ряда преимуществ SiO_2 перед Al_2O_3 . Во-первых, низкий показатель преломления обеспечит более широкую ФЗЗ для выбранной длины волны излучения и лучшую отражательную способность одного периода зеркала. Во-вторых, низкая диэлектрическая проницаемость и меньший тангенс угла диэлектрических потерь позволит напылять пленки оксида кремния быстрее, чем пленки оксида алюминия при одинаковой толщине. При этом большие потери на поглощение компенсируются большей теплоемкостью, что обеспечит соответствующую оксиду алюминия термическую устойчивость.

Среди материалов, подходящих для изготовления H-слоев, встречаются следующие оксиды: ZrO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , Nb_2O_5 . Оксид

Таблица 1. Пропускающая способность кварцевого стекла различных марок

Table 1. Transmittance of quartz glass of various brands

Марка стекла Glass type	170–200 нм nm	200–280 нм nm	280–1000 нм nm	1000–2000 нм nm	2000–2500 нм nm	2500–3000 нм nm	3000–3500 нм nm
Spectrosil	99%			85–99%	60–90%	0–70%	70–85%
OH Vitreosil	<60%	60–95%	95–99%	90–99%	80–95%	0–80%	80–85%
OG Vitreosil	<40%	40–90%					
IR Vitreosil		4–90%	90–95%	95%		85–95%	85%



циркония ZrO_2 является наиболее термически устойчивым и обладает показателем преломления $n = 1,8-2,1$ [4]. Однако наиболее распространенным является оксид титана TiO_2 . Он менее термически стабилен, однако обладает достаточно высоким показателем преломления $n = 2,3 \div 2,5$ и может улучшить свои характеристики после термической обработки [7, 9]. Оксид ниобия Nb_2O_5 также используется для создания лазерных зеркал, и обладает сравнительно высоким показателем преломления $n = 2,15-2,50$ [14-16]. Сведения о различных физических свойствах Н-оксидов приведены в табл.3 [14-17].

В качестве Н-оксида планируется использовать оксид титана TiO_2 . Такой выбор обусловлен высоким показателем преломления материала, который может быть повышен при проведении технологической операции термического отжига. Несмотря на то, что оксид титана обладает худшими диэлектрическими свойствами по сравнению с аналогами, например, с ZrO_2 , отжиг пленок которого потребует более мощного источника нагрева; термическая обработка пленок TiO_2 является более простым в реализации процессом, так как необходимый фазовый переход осуществляется при наименьшей температуре. Кроме того, TiO_2 обладает меньшей, по сравнению с другими Н-оксидами, но достаточно высокой теплоемкостью. В совокупности эти два свойства позволяют использовать менее мощное нагревательное оборудование для получения наиболее высокого показателя преломления для получения высоких оптических характеристик зеркала.

Основные требования, предъявляемые к технологическому оборудованию, делятся на требования к вакуумному оборудованию, к равномерности получаемых покрытий, а также к мощности нагревательного оборудования.

Для того чтобы соблюсти условие равенства длин оптических путей лазерного луча в L- и H-слоях зеркала, суммарное отклонение толщины многослойной структуры не выходило за пределы рассчитанных границ ФЗЗ, которые составляют 285-452 нм для длины волны 350 нм. По результатам расчетов предельные отклонения для L-слоя составляют - 5,2 и 8,5 нм, а для H-слоя - от -10,8 до 15,5 нм. Таким образом, допуск для каждого функционального слоя зеркала ограничивается этими значениями.

Кроме того, для достижения необходимых оптических свойств получаемых покрытий необходимо провести термообработку посредством термического отжига изделия.

Таблица 2. Физические свойства L-оксидов

Table 2. Physical properties of L-oxides

Свойства Properties	L-оксиды L-oxides	
	SiO_2	Al_2O_3
Показатель преломления	1,44-1,50	1,60-1,70
α , ppm ¹	95	53
Диэлектрическая проницаемость ²	2,5 3,9	7 10
Тангенс угла диэлектрических потерь ³ , 10 ³	0,1	0,3
Температура фазового перехода ⁴ , К	393 436 503 848	1143 1743 2001
Теплоемкость ⁵ , Дж/(моль · К)	79,0-82,7	44,0-44,6
КТР, К ⁻¹ · 10 ⁻⁶	5-7	4-6

1 Потери рассчитывались в защитном слое L-оксида на зеркале SiO_2/Ta_2O_5 .

2 Верхнее значение - для 20 °С, нижнее значение - для 300 °С.

3 Значения взяты для пленок, полученных методами реактивного магнетронного распыления (Al_2O_3) и магнетронного распыления в ВЧ-разряде (SiO_2).

4 Фазы кремния по возрастанию температуры: γ -тридимит, β -тридимит, β -кristобалит, β -кварц, α -тридимит, α -кristобалит, α -кварц, расплав. Фазы алюминия по возрастанию температуры: низкотемпературные фазы (γ -, η -, χ - Al_2O_3), высокотемпературные фазы, α - Al_2O_3 (корунд).

5 Молярная изобарная теплоемкость при температуре 298,15 К. Зависит от фазы оксида.

Мощностные характеристики нагревателя должны быть достаточными, чтобы осуществлять нагрев подложки до 500 °С в течение часа для каждого слоя.

Апробация технологии производилась в лабораторных условиях на вакуумной установке MBTU-11-1МС [18]. Многослойную структуру лазерного зеркала из чередующихся слоев SiO_2 и TiO_2 формируют методом ВЧ-магнетронного распыления в вакууме при давлении в камере $(6,8-4,4) \cdot 10^{-1}$ Па, потоке рабочего газа 20-40 сссм (ст. см³/мин) и мощности источника 60 Вт. Размер мишеней - $\varnothing 51 \times 6$ мм, расстояние мишень-подложка - 81 мм. Время осаждения для материалов варьируется, так как требуются разные толщины слоев, а скорости распыления мишеней SiO_2 и TiO_2 отличаются. Так,



Таблица 3. Физические свойства H-оксидов

Table 3. Physical properties of H-oxides

Свойства Properties	H-оксиды H-oxides				
	ZrO ₂	TiO ₂	Ta ₂ O ₅	HfO ₂	Nb ₂ O ₅
Показатель преломления ¹	1,8–2,1	2,2–2,5 2,5–3	2,02–2,24	1,90–2,05	2,15–2,5
Диэлектрическая проницаемость ²	10 12	10–80	12–30 35,4	14–18 25	100
Тангенс угла диэлектрических потерь ³ , 10 ³	0,3–1,0	5–6	0,9	0,3–0,7	1,0–2,0
Температура фазового перехода, К	723	523	1470	1033	653 1323 1423
Теплоемкость ⁴ , Дж/(моль · К)	55,9	55,1–55,3	134,9	60,3	132,0
КТР, К ⁻¹ · 10 ⁻⁶	4–8	7–10	8	-1–5	6

- 1 Для TiO₂ верхнее значение – для аморфной фазы (анатаз), нижнее – для кристаллической фазы (рутил). Для ZrO₂ зависит от фазового перехода при термообработке. Для Ta₂O₅ и HfO₂ – от напуска реактивного газа при распылении.
- 2 Для ZrO₂, HfO₂ верхнее значение – для 20 °С, нижнее значение – для 300 °С. Для TiO₂ и Ta₂O₅ значение обратно пропорционально концентрации реактивного газа при распылении.
- 3 Значения взяты для пленок, полученных методами реактивного магнетронного распыления (ZrO₂) и магнетронного распыления в ВЧ-разряде (TiO₂, HfO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅).
- 4 Молярная изобарная теплоемкость при температуре 298,15 К. Зависит от фазы оксида.

время процесса для SiO₂ от 90 до 210 мин, для TiO₂ от 140 до 280 мин. Для проверки воспроизводимости процессов и получения экспериментальной зависимости толщины покрытий от режимов осаждения был проставлен и проведен полный факторный эксперимент.

При отработке скоростей слоев SiO₂ и TiO₂ измеряли толщины полученных покрытий на сколе кремниевой подложки и использовали сканирующий электронный микроскоп CROSSBEAM 550 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия). Толщины серии покрытий для метода полного факторного эксперимента оценивались с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 (ОАО "ЛОМО", Санкт-Петербург, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Абсолютные значения скоростей осаждения были определены путем измерения толщины покрытий по поперечному сколу подложки и деления значений толщины на время процесса осаждения. На рис.2 представлен вид поперечного скола SiO₂ и TiO₂.

Покрытие SiO₂ не имеет ярко выраженных границ кристаллов. Покрытие TiO₂ характеризуется наличием столбчатой структуры, формирование которой происходит при толщине покрытия более 170 нм. Такая анизотропия объема покрытия имеет иную ориентацию молекул, что может оказывать влияние на функциональные характеристики (коэффициент преломления и пропускания). Поэтому одиночные TiO₂ слои далее не превышают толщину ~150 нм. На рис.3 представлены результаты скоростей осаждения SiO₂ и TiO₂.

Скорость осаждения (фактически скорость распыления) SiO₂ от 180 до 270 мин увеличивается с 130 до 158 нм/ч за счет увеличения зоны обработки новой мишени. Средние значения скоростей осаждения для SiO₂ и TiO₂ равны 158 и 89 нм/ч соответственно.

Контроль равномерности толщины по площади подложки является важным и необходимым параметром. Формирование покрытий происходит в ограниченной области системы "мишень – подложка". Оценка распределения

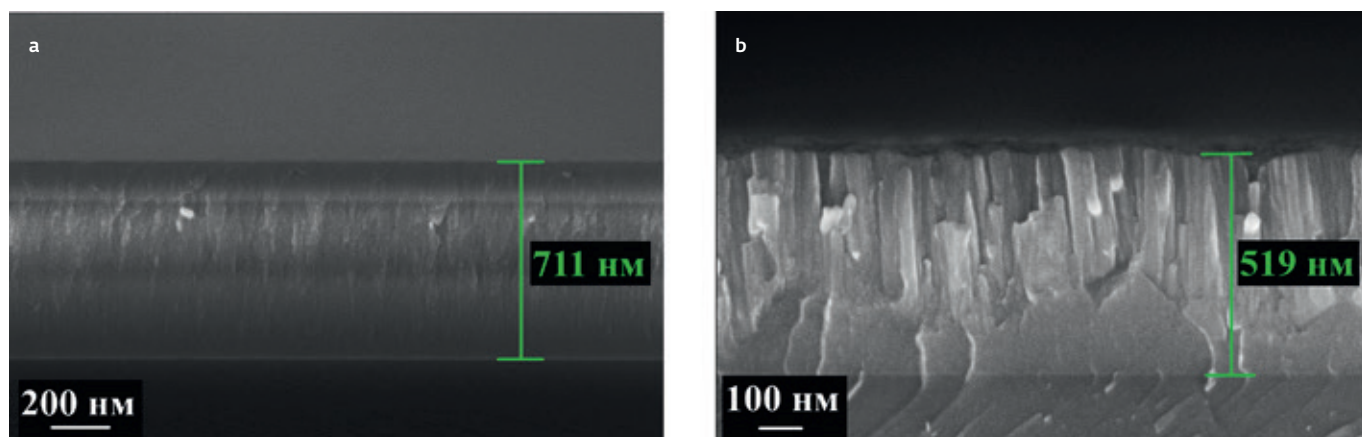


Рис.2. СЭМ-изображение поперечного скола покрытий SiO_2 (a) и TiO_2 (b)

Fig.2. SEM image of SiO_2 (a) and TiO_2 (b) coatings the transverse fracture

толщины по диаметру подложки происходит по закону Кнудсена (2) [19]:

$$V_o = \frac{V_p \cdot S_{\Pi} \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \cdot \alpha_M}{\pi \cdot h^2}, \text{ нм/мин}, \quad (2)$$

где V_p – скорость распыления, нм/мин; S_{Π} – площадь распыления, м^2 (с учетом геометрии – $855 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$); ϕ , θ – углы распыления и осаждения соответственно, град; α_M – коэффициент прилипания материала к подложке, б/р (принято за 1); h – расстояние "мишень – подложка", м (с учетом геометрии: от 51 до 81 мм с шагом 10 мм).

Скорость распыления, коэффициент прилипания частиц и постоянная π определяют абсолютное значение скорости осаждения и не влияют на ее распределение. Площадь распыления в меньшей степени участвует в формировании неравномерности скорости осаждения. Учитывается, что из каждой элементарной ячейки кольца зоны эрозии происходит распыление. Косинусы углов распыления и осаждения напрямую связаны с изменением скорости осаждения по поверхности подложки.

Таким образом, равномерность скорости и толщины по критерию средних значений составляет 92, 90, 88 и 85 % для соответствующих расстояний 81, 71, 61 и 51 мм; по критерию максимум/минимум – 85, 82, 78 и 73 % для тех же расстояний.

После отработки скоростей осаждения покрытий SiO_2 и TiO_2 были получены серии образцов тонкопленочных покрытий SiO_2 и TiO_2 . Результаты измерения толщин приведены в табл.4.

Для экспериментальных значений толщин были определены значение критерия Кохрена $G_{кр}$ (для доверительной вероятности 0,05, числа степеней свободы 6, количества опытов 8). При сравнении экспериментального значения критерия Кохрена с табличным показано, что экспериментальное значение критерия Кохрена меньше критического $0,1960 < 0,3362$, а значит, дисперсии являются однородными и эксперименты воспроизводимы.

После обработки результатов методом полного факторного эксперимента интервалы варьирования входных параметров переведены

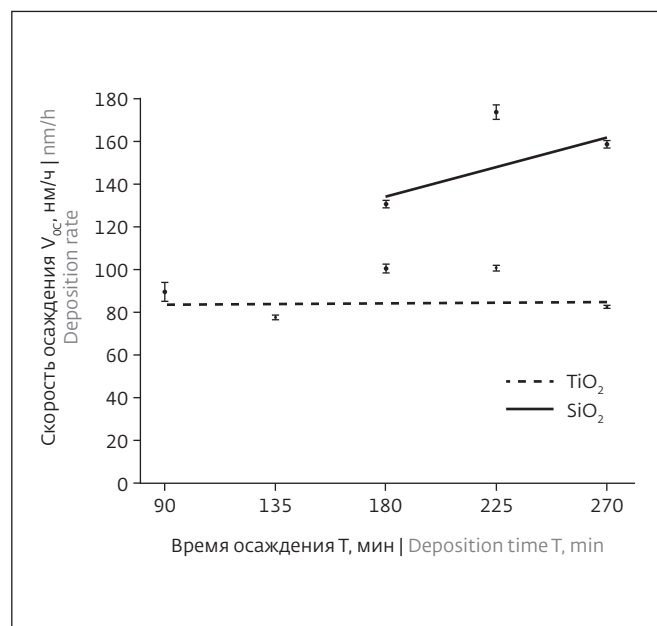


Рис.3. Зависимости скорости осаждения SiO_2 и TiO_2 от времени

Fig.3. Dependence of the deposition rate SiO_2 and TiO_2 on time

Таблица 4. Толщины покрытий SiO_2 и TiO_2 при разных режимах формированияTable 4. Thicknesses of SiO_2 and TiO_2 coatings under different formation modes

Давление·10, Р Па Pressure·10	Поток р.г., Q, sccm Flow	Время осаждения, Т, мин min Deposition time	Н ₁ , нм nm	Н ₂ , нм nm	Н ₃ , нм nm	Н ₄ , нм nm	Н ₅ , нм nm	Н ₆ , нм nm	Н _{ср} , нм nm
SiO ₂									
4,4	20	90	238	183	186	238	238	249	222
		210	354	516	443	531	472	511	471
6,8		90	177	236	295	286	177	132	217
		210	440	407	440	407	440	327	410
4,4	40	90	236	295	236	177	354	295	266
		210	649	649	590	554	558	518	586
6,8		90	231	231	187	289	231	219	232
		210	445	396	476	531	393	413	442
TiO ₂									
4,4	20	140	586	663	550	663	687	756	651
		280	893	1028	893	721	1120	714	895
6,8		140	590	590	501	413	590	668	559
		280	1040	894	1702	615	932	740	987
4,4	40	140	296	507	633	477	368	665	491
		280	1082	983	1358	760	935	796	986
6,8		140	982	1023	1142	662	921	755	914
		280	782	747	1244	846	1018	1086	782

в безразмерную систему (значения от -1 до $+1$) и получены уравнения регрессии, описывающие зависимость толщины тонкопленочного слоя SiO_2 (H_{SiO_2} , нм) и TiO_2 (H_{TiO_2} , нм) от времени процесса (T , б/р), потока рабочего газа (Q , б/р) и давления (P , б/р):

$$H_{\text{SiO}_2} = 356 + 122 \cdot T + 26 \cdot Q - 31 \cdot P - 21 \cdot T \cdot P, \quad (3)$$

$$H_{\text{TiO}_2} = 805 + 151 \cdot T + 49 \cdot P + 49 \cdot Q \cdot P - 80 \cdot T \cdot Q \cdot P. \quad (4)$$

Полученная зависимость (3) показывает, что на толщину пленки SiO_2 влияют все три варьируемых фактора, а также взаимодействие факторов времени распыления и остаточное давление в камере.

Полученная зависимость (4) показывает, что на толщину пленки TiO_2 влияет время распыления, а также остаточное давление газов, причем положительно. Это вероятно связано с высоким парциальным давлением аргона в камере, а также большой массой молекул оксида титана, из-за чего потери кинетической энергии от взаимодействия с молекулами остаточных газов оказываются значительно меньше, чем в случае более легких молекул оксида кремния.

Разница во влиянии входных факторов для покрытий SiO_2 и TiO_2 может быть объяснена разным диапазоном варьирования фактора времени (это единственный отличающийся диапазон входных параметров). Так, для слоя TiO_2 время процесса дольше, покрытие меняет свою структуру, немного уплотняется. Поэтому влияние времени отмечается как при отдельном воздействии фактора, так и при взаимодействии с двумя другими входными параметрами. Следует отметить, что поток рабочего газа существенного влияния не оказывает на толщину TiO_2 в выбранном интервале варьирования, однако, отмечается взаимное влияние факторов потока и давления, а также потока, давления и времени.

Полученные модели (3) и (4) подтвердили свою адекватность по критерию Фишера для уровня значимости 0,05, числа степеней свободы дисперсии адекватности 3 и воспроизводимости 40. Рассчитанные значения критерия Фишера меньше критического (2,10 < 2,84 и 2,00 < 2,84 для SiO_2 и TiO_2 соответственно).

Полученные уравнения регрессии позволили определить режимы магнетронного распыления и сформировать многослойную структуру $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, состоящую из восьми чередующихся слоев (рис.4).

Несмотря на высокий разброс значений скорости осаждения SiO_2 , при установившемся

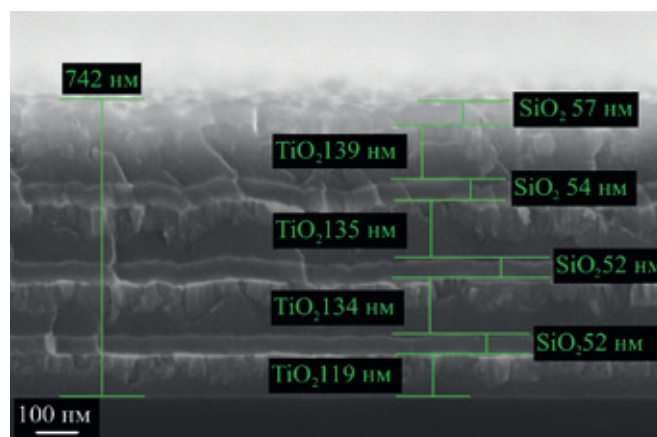


Рис.4. СЭМ-изображение поперечного скола многослойной структуры ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) · 4

Fig.4. SEM image of multi-layered structure coating ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) · 4 the transverse fracture

режиме удается прогнозируемо формировать покрытия толщиной (53 ± 2) нм. Покрытия TiO_2 имеют толщину (135 ± 9) нм.

ВЫВОДЫ

Проведенный обзор источников информации по лазерным зеркалам позволил обобщить информацию о материалах для изготовления конечного изделия – брэгговского зеркала для УФ-диапазона. В качестве основы было выбрано кварцевое стекло марки КУ-2. Для создания многослойной структуры выбраны оксиды кремния и титана – для формирования функциональных L- и H-слоев зеркала, ввиду их оптических свойств в ближнем УФ-диапазоне. Выявлена возможность стабилизации их структуры посредством термической обработки.

Ключевой операцией технологического процесса создания лазерного зеркала по принципу брэгговской решетки была выбрана операция нанесения оксидных пленок методом магнетронного распыления, позволяющая получать достаточно чистые и равномерные оксидные покрытия нанометрового диапазона толщин.

Абсолютные значения скоростей осаждения покрытий SiO_2 и TiO_2 методом магнетронного распыления в вакууме были рассчитаны путем измерения толщины покрытий по поперечному сколу подложки на сканирующем электронном микроскопе. После чего значение толщины слоев делили на время осаждения. Такие измерения были проведены для нескольких толщин образцов рассматриваемых покрытий. Отмечено, что скорость осаждения покрытия TiO_2 на всем интервале исследования (от 90 до 280 мин) сохраняется



постоянной – 89 нм/ч. Тогда как скорость осаждения покрытия SiO_2 носит постоянный характер от 90 до 180 мин и составляет 130 нм/ч, а от 180 до 280 мин значение скорости осаждения увеличивается и составляет 158 нм/ч. Данную особенность авторы связывают с увеличением зоны выработки мишени SiO_2 .

Полученные уравнения регрессии позволили определить режимы магнетронного распыления и сформировать многослойную структуру $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Планируется исследование функциональных характеристик полученной многослойной структуры и их сравнение с аналогичной многослойной структурой, формирование слоев которой проводили с отжигом.

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. Кульчин Ю.Н. Современная оптика и фотоника нано- и микросистем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 440 с.
2. Ворзобова Н.Д., Денисюк И.Ю. Оптические методы формирования микроэлементов информационных систем. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. 82 с.
3. Bertilsson F. Design of Multilayer Dielectric Mirrors Optimized for Femtosecond Laser Pulses. Lund Reports on Atomic Physics. 2015. 28 p.
4. Yepuri V., Dubey R.S., Kumar B. Rapid and economic fabrication approach of dielectric reflectors for energy harvesting applications. Sci Rep. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73052-w>
5. Papatryfonos K. et al. Effects of surface roughness and top layer thickness on the performance of Fabry-Perot cavities and responsive open resonators based on distributed Bragg reflectors. Physics.Optics. Preprint arXiv:2309.13649. 2023. Vol.1. PP. 1–11.
6. Немилов С.В. Оптическое материаловедение: оптические стекла СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 175 с.
7. Jena S. et al. Omnidirectional photonic band gap in magnetron sputtered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ one dimensional photonic crystal. Thin Solid Films. 2016. Vol. 599. PP.138–144.
8. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 30 с.
9. Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П., Панков М.А. Многослойные диэлектрические зеркала для мощных полупроводниковых лазеров. Computational nanotechnology. 2017. № 2. С. 94–96.
10. Азарова В.В., Данилов А.С. Исследование возможности применения оксида алюминия в качестве материала с низким показателем преломления для напыления диэлектрических зеркал лазерных гироскопов. Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 26-й Всероссийской молодежной научной конференции, Ульяновск: УГТУ, 2023. С. 249–251.
11. Бачериков Ю.Ю. и др. Влияние быстрого термического отжига на свойства тонких диэлектрических пленок оксидов гадолиния, титана и эрбия на поверхности карбида кремния. Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 107–112.
12. Вилья Н., Голосов Д.А., Нгуен Т.Д. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления. Доклады БГУИР. 2019. № 5 (123). С.87–93.
13. Morohashi S. et al. SiO_2 Insulation Layer Fabricated using RF Magnetron Facing Target Sputtering and Conventional RF Magnetron Sputtering. Japanese Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 40. Part 1. No. 8. PP. 4876–4877.
14. Robertson J. High dielectric constant oxides. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. Vol. 28. PP. 265–291.
15. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В.Корницкого. М.: Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
16. Kruschwitz D.T., Pawlewicz W.T. Optical and durability properties of infrared transmitting thin films. Applied Optics. 2017. Vol. 36. PP. 2157–2159.
17. Химическая энциклопедия / Под ред. Кнунянц И.Л. М.: Советская энциклопедия, 1995. Т. 4. 639 с.
18. Сидорова С.В. и др. Оценка влияния толщины покрытия на величину остаточных механических напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 6. С. 372–381.
19. Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970; пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко, Т. 2. М.: Советское Радио. 1977. 768 с.