

УДК 621.793.18

О связи технологических режимов и функциональных параметров тонких пленок оксида кремния в диэлектрических лазерных зеркалах

Трекушевский Данил Сергеевич

dtrekusevskij@gmail.com

Купцов Алексей Дмитриевич

alex-kouptsov@bmstu.ru

Сидорова Светлана Владимировна

sidorova@bmstu.ru

SPIN-код: 5780-4905

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен процесс нанесения тонких пленок оксида кремния при изготовлении лазерных диэлектрических зеркал. Показана актуальность применения диэлектрических зеркал для УФ-лазерной резки. Представлены результаты расчетов конструкции лазерного зеркала для ближнего УФ-диапазона. Приведены результаты эксперимента по напылению тонких пленок оксида кремния ВЧ-магнетронным распылением. Получена математическая модель процесса. Сделаны выводы о значимости факторов процесса и их взаимодействия. Дальнейшее направление исследований связано с исследованием процесса нанесения тонких пленок оксида титана и влияния термической обработки на получаемые покрытия.

Ключевые слова: лазерные зеркала, многослойные тонкие пленки, магнетронное распыление, оксидные пленки, фотонный кристалл

On the relationship between technological conditions and functional parameters of silicon oxide thin films in dielectric laser mirrors

Trekushevskiy Danil Sergeyevich

dtrekusevskij@gmail.com

Kouptsov Aleksey Dmitriyevich

alex-kouptsov@bmstu.ru

Sidorova Svetlana Vladimirovna

sidorova@bmstu.ru

SPIN-code: 5780-4905

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The process of silicon oxide thin film deposition for the fabrication of laser dielectric mirrors is considered. The relevance of using dielectric mirrors for UV laser cutting is highlighted. The results of the design calculations for a near-UV laser mirror are presented. The results of an experiment on the deposition of silicon oxide thin films by RF magnetron sputtering are provided. A mathematical model of the process has been developed. Conclusions are drawn on the significance of the process factors and their interaction. The future research direction involves the study of the titanium oxide thin film deposition process and the influence of thermal treatment on the resulting coatings.

Keywords: laser mirrors, multilayer thin films, magnetron sputtering, oxide films, photonic crystal

Введение. Диэлектрические зеркала играют важную роль в лазерных технологиях, участвуя в формировании и позиционировании лазерного луча. Много-слойная структура таких зеркал представляет собой брэгговскую решетку — фотонный кристалл, состоящий из нескольких пар слоев прозрачных материалов с различными показателями преломления [1], что позволяет достичь коэффициента отражения, близкого к единице. Особый интерес представляют зеркала для лазерного излучения УФ-спектра, используемые в биомедицинских технологиях [2], спектроскопии [3, 4], микро- и наноэлектронике [4, 5]. В последней лазеры ближнего УФ-диапазона (355 нм) используются для обработки и нарезания печатных плат, позволяя получать более точные размеры по сравнению с механическим и ИК-лазерным резанием [5].

Устройство диэлектрического зеркала предполагает наличие множества пар слоев двух прозрачных материалов с низким и высоким показателями преломления (L- и H-слои соответственно). Чем больше разница между показателями преломления — тем выше коэффициент отражения и шире фотонная запрещенная зона (ФЗЗ) — диапазон эффективно отражаемого лазерного излучения [6]. Распространенным материалом для формирования L-слоя является оксид кремния SiO_2 ввиду совокупности диэлектрических и оптических свойств [4]. Также оксид кремния имеет один из самых низких показателей преломления, который остается относительно стабильным в ближнем УФ-диапазоне после предварительной термообработки [4]. При этом изготовление зеркала требует строгого соблюдения толщин оксидных слоев, что влияет на суммарный коэффициент отражения. Поэтому для изготовления диэлектрического зеркала необходимо не только спроектировать конструкцию, но и составить математическую модель процесса нанесения оксидных покрытий, определив наиболее существенные факторы процесса.

Таким образом, целью работы является проектирование диэлектрического лазерного зеркала для ближнего УФ-диапазона и построение математической модели процесса формирования функционального L-слоя оксида кремния для последующего изготовления зеркала. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: рассчитать конструкционные и оптические параметры будущего зеркала, определить варьируемые факторы для проведения эксперимента, провести полный факторный эксперимент по напылению тонких пленок оксида кремния, обработать его результаты и получить уравнение регрессии.

Материалы и методы. Для проектирования зеркала необходимо определить материалы функциональных слоев и подложки. Кроме оксида кремния, используемого для создания L-слоев, необходимо выбрать материал H-слоев зеркала с наиболее высоким показателем преломления. К таковым относится оксид титана TiO_2 , чей показатель преломления находится в диапазоне 2,2–2,5; который можно увеличить до 3 и выше, и стабилизировать в ближнем УФ-спектре посредством термообработки [4]. Основным требованием к материалу подложки является высокое пропускание излучения в ближнем УФ-спектре, во избежание перегрева зеркала и влияния на суммарный коэффици-

ент отражения. Подходящий материал — кварцевое стекло марки КУ-1, обладающее пропусканием в ближнем УФ-диапазоне порядка 99 % [7].

В качестве метода формирования функциональных слоев было выбрано ВЧ-магнетронное распыление из оксидной мишени. Данный метод позволяет получить тонкие оксидные пленки с достаточной точностью, при этом является более безопасным, чем реактивное распыление [8].

Для обработки результатов использовался метод полного факторного эксперимента. Метод позволяет определить наиболее существенные факторы процесса, влияющие на выходной параметр, а также значение взаимодействия факторов друг с другом.

Результаты. При проектировании диэлектрического зеркала для определенной длины волны необходимо рассчитать конструктивные и оптические параметры зеркала: толщину каждого слоя, количество периодов зеркала, коэффициент отражения и границы ФЗЗ. Границы ближнего УФ-диапазона составляют 300–400 нм. Мы задались достаточно высоким коэффициентом отражения 0,9999. Это позволяет учесть переменность показателей преломления и возрастающие потери на поглощение в ближнем УФ-диапазоне. Кроме того, мы включили в конструкцию зеркала внешний защитный слой TiO_2 , что обусловлено требованием к его наличию в некоторых областях лазерной техники [2–4].

Первоначально необходимо определить линейные размеры зеркала, а также толщины функциональных слоев. К линейным размерам относятся диаметр зеркала и толщина подложки. Диаметр принимаем $D = 48$ мм, толщину подложки принимаем $H = 6$ мм. Такие размеры соответствуют нормальному ряду величин Ra40, обеспечивают удобство процесса обработки заготовки, а соотношение $D/H = 8$ удовлетворяет требованиям ГОСТ [7]. Толщины функциональных слоев определяются по формуле [1]:

$$n_H d_H = n_L d_L = \frac{\lambda_0}{4}.$$

При средней длине волны диапазона $\lambda_0 = 350$ нм и показателях преломления $n_H = 3,1$ для слоев TiO_2 и $n_L = 1,5$ для SiO_2 составляют [3]:

$$d_H = \frac{\lambda_0}{4n_H} = \frac{350 \text{ нм}}{4 \cdot 3,1} = 28 \text{ нм для слоя } \text{TiO}_2;$$

$$d_L = \frac{\lambda_0}{4n_L} = \frac{350 \text{ нм}}{4 \cdot 1,5} = 58 \text{ нм для слоя } \text{SiO}_2.$$

Формула для коэффициента отражения многослойного тонкопленочного отражателя выводится из уравнений Френеля и уравнений Максвелла методом матриц переноса [6, 9]. Волны света на границе каждого из периодов (рис. 1) рассматриваются как векторы с комплексными координатами (амплитуда и фаза волны).

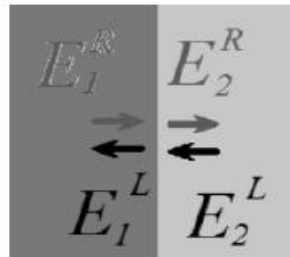


Рис. 1. Поведение волн на границе раздела периодов кристалла

Наиболее удобно представить векторы в виде матриц:

$$\begin{pmatrix} E_1^R \\ E_1^L \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} E_2^R \\ E_2^L \end{pmatrix}.$$

Поскольку фотонный кристалл является периодической структурой, то каждые два периода можно связать между собой соотношением M . Чтобы получить результат всех отражений и преломлений в структуре зеркала, нужно только правильно задать вектор волн на границах кристалла и умножить на матрицу M в степени N , где N — число периодов зеркала.

Результаты расчетов оптические параметры зеркала (рис. 2): число периодов зеркала $N = 9$; коэффициент отражения $R_{2N+1} = 0,999945$; границы ФЗЗ 285,5–452,2 нм.

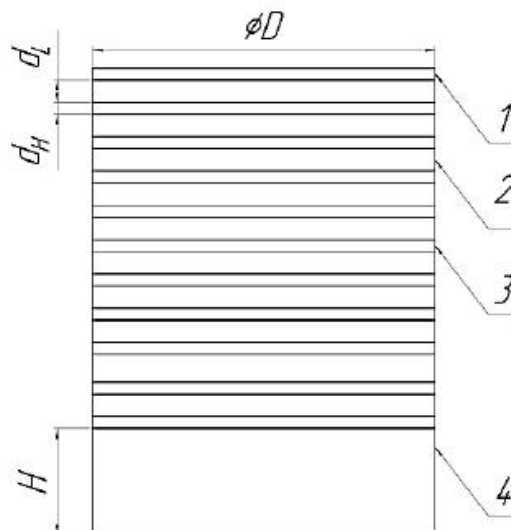


Рис. 2. Конструкция спроектированного диэлектрического зеркала:

- 1 — внешний защитный слой TiO_2 ; 2 — L-слой SiO_2 ; 3 — H-слой TiO_2 ;
- 4 — подложка из кварцевого стекла марки КУ-1

Для соблюдения полученных параметров слоя SiO_2 и определения наиболее существенных факторов, влияющих на скорость роста пленки, был проведен эксперимент с варьированием следующих факторов процесса магне-

тронного распыления из оксидной мишени: время распыления (X_1 , мин), поток натекания рабочего газа (X_2 , сссм). Полные данные о варьируемых факторах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазон варьируемых входных факторов

Уровень	Время распыления, мин [X_1]	Поток натекания рабочего газа, сссм [X_2]	В безразмерной системе координат уровни факторов
Верхний	210	40	+1
Нижний	90	20	–1

Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке МТВУ-11-1МС на кремниевые подложки с применением ионного ассистирования, в среде рабочего газа аргона. Измерение толщин образцов пленок оксида кремния осуществлялось на микроинтерферометре МИИ-4М. Для каждого образца делалось по два снимка, на каждом снимке — по три измерения. Результаты экспериментов приведены в табл. 2, значения толщин при каждом замере обозначены как Y_j , варьируемые факторы (X_k) представлены в безразмерном виде.

Таблица 2

Результаты экспериментов по нанесению тонких пленок оксида кремния

№ образца	Снимок 1			Снимок 2			$\bar{Y}_i$, нм	S_i^2	X_1	X_2
	Y_1 , нм	Y_2 , нм	Y_3 , нм	Y_4 , нм	Y_5 , нм	Y_6 , нм				
1	213	197	183	251	132	156	189	1773	–1	–1
2	247	247	213	200	200	184	215	701	–1	+1
3	548	421	476	589	425	507	494	4509	+1	–1
4	589	589	435	589	507	638	558	5405	+1	+1

Полученные данные были обработаны методом полного факторного эксперимента. В результате обработки получено уравнение регрессии, описывающее процесс нанесения оксида кремния ВЧ-магнетронным распылением на вакуумной установке МТВУ-11-1МС:

$$Y = 364 + 162 \cdot X_1 + 24 \cdot X_2. \quad (1)$$

Для того, чтобы подтвердить адекватность модели была проведена проверка однородности дисперсий адекватности и воспроизводимости по критерию Фишера. Экспериментальное значение критерия $F_{\Sigma} = 0,717$ оказалось меньше критического $F_{кр} (f_1 = 1, f_2 = 20, \alpha = 0,05) = 4,35$. То есть модель (1) является адекватной.

Обсуждение. Исходя из результатов полного факторного эксперимента и полученного уравнения регрессии можно сказать, что на толщину оксидных пленок (Y_1), получаемых методом ВЧ-магнетронного распыления из оксидной мишени, влияют оба варьируемых фактора — время процесса и поток рабочего газа. При этом в заданном диапазоне варьируемых факторов от 90 до 210 мин. время распыления влияет значительно больше, чем поток натекания рабочего газа от 20 до 40 ссст. В то же время, влияние физических явлений, связанных со взаимодействием этих двух факторов друг на друга пренебрежимо мало даже при продолжительном процессе распыления, что позволяет не учитывать их при последующем изготовлении зеркала.

Заключение. В ходе исследования показана актуальность применения диэлектрических зеркал для УФ-лазеров. По заданным требованиям спроектирована конструкция диэлектрического зеркала для лазеров ближнего УФ-диапазона. Проведен эксперимент по напылению тонких пленок оксида кремния SiO_2 методом ВЧ-магнетронного распыления из оксидной мишени. По результатам полного факторного эксперимента с варьированием двух факторов (время и поток натекания рабочего газа) построена модель процесса, подтверждена воспроизводимость эксперимента и адекватность полученной модели. Дальнейшее направление исследований будет связано с процессом напыления тонких пленок оксида титана TiO_2 и термической обработкой функциональных слоев спроектированного зеркала.

Список источников

- [1] Кульчин Ю.Н. *Современная оптика и фотоника нано- и микросистем*. Москва, Физматлит, 2016, 440 с.
- [2] Паршина А.А., Филиппова Е.М. Применение лазерного излучения в медицине: обзор и перспективы. *Тенденции развития науки и образования*, 2023, № 93, с. 194–197. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2023-288>
- [3] Yepuri V., Dubey R.S., Kumar B. Rapid and economic fabrication approach of dielectric reflectors for energy harvesting applications. *Scientific Reports*, 2020, no. 10, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73052-w>
- [4] Mao Y., Zhao D., Yan S. et al. A vacuum ultraviolet laser with a submicrometer spot for spatially resolved photoemission spectroscopy. *Light: Science & Applications*, 2021, no. 10, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00463-3>
- [5] Шелыгина С.Н., Акимов А.А., Буров Н.В., Шаймадиева Д.С., Рао К. Ультрафиолетовая лазерная резка. *Фотоника*, 2019, № 3, с. 252–261. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.3.252.261>
- [6] Macleod H.A. *Thin-Film Optical Filters*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 696 p.
- [7] ГОСТ 15130–86. *Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия*. Москва, ИПК Издательство стандартов, 1999.
- [8] Панфилов Ю.В. *Формирование функциональных слоев*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 92 с.
- [9] Born M., Wolf E., Bhatia A.B. et al. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge, Cambridge University Press, 1999, 992 p.