

УДК 539.234

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ ОКСИДОВ**

В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ», г. Минск, Республика Беларусь*

А. С. ЧАУС

Словацкий технический университет, г. Трнава

Н. Н. ФЕДОСЕНКО, Е. А. КУЛЕШ, А. Г. БЕРДИЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь*

Установлены оптические свойства и лучевая прочность поляризационных покрытий на основе оксидов кремния и циркония. Разработана архитектура многослойных покрытий на основе чередующихся слоев ZrO_2 и SiO_2 . Покрытия были нанесены на подложки различного типа методом электронно-лучевого испарения мишеней. С помощью метода спектрофотометрии определены спектры пропускания покрытий. В зависимости от архитектуры покрытий проведена оценка эффективности поляризационных свойств покрытий и лучевой прочности. Наиболее высокую лучевую стойкость показали 14-слойные покрытия ZrO_2/SiO_2 на подложке из кварца и стекла. Выявлено, что сформированные покрытия обладают высокой поляризационной способностью, что определяет их эффективное применение в оптических и лазерных системах с рабочей длиной волны от 450 до 640 нм.

Ключевые слова: поляризационные покрытия, тугоплавкие оксиды, электронно-лучевое испарение, спектр пропускания, лучевая прочность.

**DETERMINATION OF OPTICAL PROPERTIES
AND RADIAL STRENGTH OF POLARIZATION
COATINGS BASED ON REFRACTORY OXIDES**

V. A. EMEL'YANOV

*OJSC "INTEGRAL" – management company
of the holding "INTEGRAL", Minsk, the Republic of Belarus*

A. S. CHAUS

Slovak Technical University, Trnava

N. N. FEDOSENKO, E. A. KULESH, A. G. BERDIEV

*Francisk Skorina Gomel State University,
the Republic of Belarus*

The article considers optical properties and radial strength of polarization coatings based on silicon and zirconium oxides. The architecture of multilayer coatings based on alternating layers of ZrO_2 and SiO_2 has been developed. Coatings were applied to various types of substrates by electron beam evaporation of the targets. Using the spectrophotometry method, the transmission spectra of the coatings were determined. Depending on the architecture of the coatings, the efficiency of the polarization properties

of the coatings and the radial strength were assessed. The highest radial resistance was shown by 14-layer ZrO₂/SiO₂ coatings on a quartz and glass substrate. It has been found that the formed coatings have a high polarization capacity, which determines their effective use in optical and laser systems with an operating wavelength of 450 to 640 nm.

Keywords: polarization coatings, refractory oxides, electron-beam evaporation, transmission spectrum, radial strength.

Введение

Интерес к изучению взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с веществом и поверхностью оптических покрытий обоснован необходимостью использования данных покрытий в лазерных системах в течение длительного времени без заметного ухудшения характеристик [1]. Оптические покрытия, используемые в высокомошных лазерах, отличаются высокой стоимостью и оказывают сильное влияние не только на конструкцию, но и на работу этих систем. Появление даже небольших участков повреждения в оптическом покрытии приводит к снижению качества луча и, как следствие, негативно отражается на оптимальной работе лазера. Поэтому к оптическим тонкопленочным покрытиям предъявляются следующие требования: устойчивость физико-химических свойств покрытия к лазерному излучению в рабочем диапазоне интенсивности и стабильность спектральных свойств. Очень часто лучевая прочность оптических покрытий является ограничивающим фактором, учитываемым при разработке мощных лазеров, особенно в УФ-диапазоне длин волн.

Порог пробоя (разрушения) относится к одной из основных характеристик покрытий оптического назначения, определяющих возможность их использования в лазерных системах [2]. Однако факторы, влияющие на лазерное повреждение покрытий, до настоящего времени все еще недостаточно изучены [1]. Наиболее часто процессы разрушения покрытия, вызванные энергией в импульсе лазерного излучения, зависят от состава и структуры покрытия, которые инициируют развитие лавинообразной и многофотонной ионизации. Также разрушения возникают за счет термоэффектов, вызванных усилением поглощения излучения примесями внутри покрытия.

В последние десятилетия в качестве перспективного оптического покрытия с высоким порогом лазерно-индуцированного разрушения рассматриваются оксидные покрытия на основе HfO₂ как материала с высоким показателем преломления в сочетании с SiO₂ [3, 4]. Другим многообещающим материалом с высоким показателем преломления является оксид скандия Sc₂O₃ [5], который характеризуется большей шириной оптической запрещенной зоны (5,7 эВ) по сравнению с оксидом гафния (5,6 эВ). В частности, исследованию оптических и физических свойств однослойных покрытий на основе оксида скандия с целью применения в УФ-диапазоне длин волн посвящена работа [5]. Оптические свойства и пороги фемтосекундного лазерного разрушения монослоев чистого скандия, осажденного методом ионно-лучевого распыления, обсуждаются в еще одной работе [1]. При исследовании лазерного повреждения композиционных покрытий на основе оксидных слоев Ta₂O₅/HfO₂/SiO₂ [2] и Sc₂O₃/SiO₂ [4–6] показана их высокая лучевая стойкость при нано- и фемтосекундных длительностях импульсов и различных длинах волн. Однако авторы этих работ не предпринимали попытки оптимизировать структуру и свойства данных покрытий с целью повышения их лучевой прочности.

Целью настоящей работы является исследование влияния толщины (композиции) и природы подложки поляризационных покрытий на основе тугоплавких оксидов на их оптические свойства и лучевую прочность.

Методика проведения эксперимента

Формирование поляризационных 7-слойных [7] и 14-слойных покрытий на основе чередующихся слоев ZrO₂ и SiO₂ проводилось с помощью установки вакуумного

напыления ВУ-1А, оборудованной источником электронно-лучевого испарения УЭЛИ-1 и системой контроля оптических характеристик модели Iris 0211 (ООО «ЭссентОптикс», Республика Беларусь). Осаждение покрытий осуществлялось при максимальном ускоряющем напряжении 12 кВ и токе эмиссии от 10 до 200 мА при остаточном давлении в камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Длина волны контроля слоев составляла 569 нм для 7-слойных и 452 нм – для 14-слойных покрытий.

На рис. 1 приведены схемы расположения слоев сформированных многослойных покрытий. Разработанные конструкции поляризационных покрытий представляет собой последовательно осажденные на подложку чередующиеся тонкие слои тугоплавких окислов ZrO_2 и SiO_2 с количеством слоев $N_1 = 7$ (верхний слой – ZrO_2) и $N_1 = 14$ (верхний слой – SiO_2). Были получены покрытия со следующими значениями толщин: ZrO_2 – 71,3 нм; SiO_2 – 95,6 нм; $[ZrO_2/SiO_2]_3/ZrO_2$ – 570 нм; $[ZrO_2/SiO_2]_7$ – 980 нм. В качестве подложек были использованы полированные кремниевые пластины, стекло К8, пластины кварца, полиметилметакрилат (ПММА) и полиэтилентерефталат (ПЭТ).

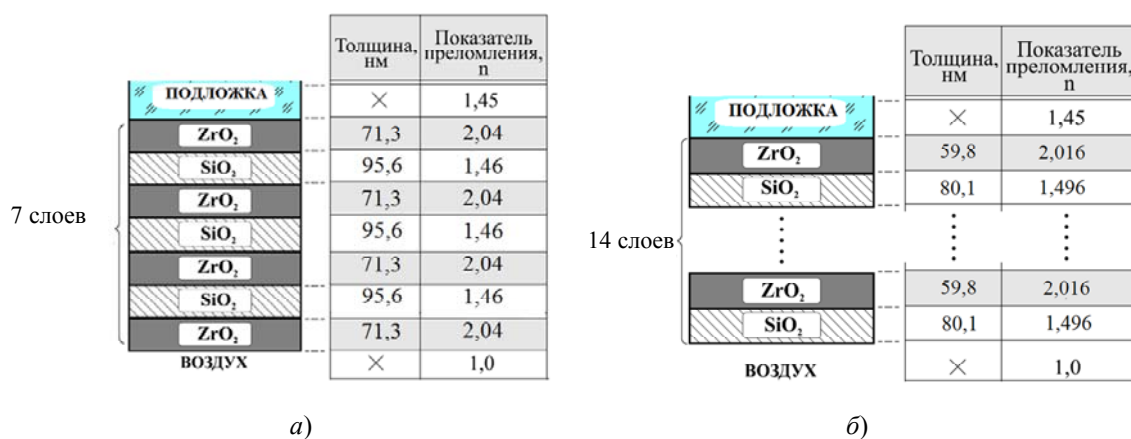


Рис. 1. Схемы осажденных покрытий:
 а – 14-слойное поляризационное покрытие $[ZrO_2/SiO_2]_7$;
 б – 7-слойное поляризационное покрытие $[ZrO_2/SiO_2]_3/ZrO_2$

Оптические характеристики, спектры отражения и пропускания определяли в естественном и поляризованном свете (режим *PS*-поляризации) в диапазоне длин волн от 380 до 980 нм с использованием спектрофотометра Photon RT (EssentOptics). Полученные спектры отображали и обрабатывали с использованием программного обеспечения EssentSoft 3.15. Анализ и изучение спектров проводили с помощью программы Origin 2018. Спектры пропускания снимали при углах падения излучения от 0 до 75° , а спектр отражения – от 8 до 75° в режиме *PS*-поляризации.

Оценку эффективности поляризационных свойств покрытий характеризовали поляризующей способностью P , рассчитанной по методике, приведенной в работе [8]:

$$P = \frac{|T_p + T_s|}{T_p + T_s}, \tag{1}$$

где T_p – значение коэффициента пропускания p -компоненты поляризованного излучения; T_s – значение коэффициента пропускания s -компоненты поляризованного излучения.

Согласно формуле (1), значения поляризующей способности P могут принимать значения от 0 до 1; соответственно, чем больше данное значение, тем покрытие наиболее эффективно разделяет p - и s -компоненты поляризованного излучения.

Для изучения процессов воздействия импульсного лазерного излучения использовали лазерную установку (рис. 2), изготовленную на базе алюмоиттриевого граната с неодимом (YAG : Nd⁺³).

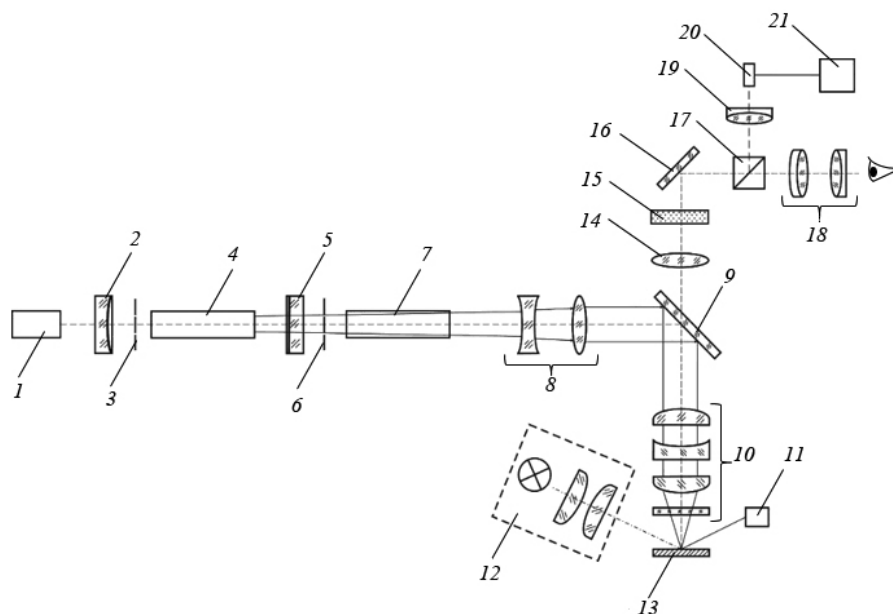


Рис. 2. Оптическая схема лазерной технологической установки:

- 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – зеркало резонатора; 3 – электромеханический шаттер; 4 – активный элемент генератора из АИГ: Nd⁺³; 5 – зеркало резонатора; 6 – электромеханический шаттер; 7 – активный элемент усилителя; 8 – телескопическая система; 9 – поворотное интерференционное зеркало; 10 – фокусирующий объектив; 11 – устройство подачи газа; 12 – система подсветки; 13 – плоскость обработки; 14 – корректирующая линза; 15 – светофильтр; 16 – поворотное зеркало и бинокляр; 17 – светоделительная призма; 18 – окуляр; 19, 20 – объектив и видеокамера; 21 – монитор

Основной характеристикой источника питания лазера, входящего в состав установки, является возможность управления энергетической и временной формой импульса тока, проходящего через лампу накачки. Источником питания обеспечивается работа двух импульсных ламп с разрядным промежутком до 120×10^{-3} м. При проведении исследования диапазон регулировки амплитуды выходного тока принимал значения от 50 до 500 А; напряжение заряда накопительной батареи конденсаторов было не менее 650 В, а максимальная частота повторения импульсов тока – не менее 100 Гц. Диапазон изменения длительности импульсов тока принимал значения от 0,25 до 20×10^{-3} с. Максимальная энергия импульсов на фундаментальной длине волны $\lambda = 1,064$ мкм превышала 6 Дж. Используемые в измерениях импульсы близки к гауссовым по распределению как по времени, так и в пространстве. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора составлял $5 \cdot 10^{-3}$ м. Несмотря на то, что данные оптические покрытия предназначены для работы на длинах волн лазера 532 нм, выбор длины волны 1,064 нм в качестве исследования лучевой стойкости покрытия на пропускание является обоснованным, так как лазерное излучение с данной длиной волны, как правило, – результат нелинейных преобразований, заключающихся в удвоении частоты основного излучения, т. е. излучения YAG : Nd⁺³ лазера, генери-

рующего длину волны 1,064 мкм. В случае разрушения нелинейного преобразователя-кристалла необходимо обеспечить работу элементов на длине волны основной генерации. Также термическое действие ИК-излучения гораздо выше, чем для видимой области спектра, что позволит косвенно оценить температурную стойкость разработанных покрытий. Кроме того, известно [7–9], что запас лучевой прочности оптических элементов должен превышать в 1,5–2 раза плотность выходной энергии лазерной установки.

Определение лучевой прочности осуществляли по следующей методологической схеме: одно испытание на конкретном образце покрытия при длительности импульса 5 мс и длине волны 1,064 нм включало от 10 до 15 лазерных облучений, а именно: первый импульс – повреждающий; следующие пять импульсов были равномерно распределены в диапазоне от очень низкой энергии до энергии, при которой едва лишь обнаруживается визуально пятно повреждения (лазерный отпечаток), и далее при этой энергии – еще около пяти лазерных импульсов для статистических данных. Таким образом, была установлена самая низкая сила тока импульса накачки, при которой происходило повреждение. Затем по градуировочному графику определяли энергию ЛИ при данных силе тока и длительности импульса ЛИ. Площадь пятна повреждения рассчитывали по формуле площади круга исходя из диаметра пятна повреждения, определяемого при помощи микроскопа при увеличении $\times 300$. Лучевую прочность Q (см. таблицу) покрытия рассчитывали по следующей формуле:

$$Q = \frac{E}{\tau S}, \quad (2)$$

где E – энергия лазерного излучения, Дж; τ – длительность лазерного излучения, мс; S – площадь пятна разрушения, см².

Результаты и их обсуждение

На рис. 3–6 приведены спектры пропускания неполяризованного и поляризованного излучения при различных углах падения к поверхности многослойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$, осажденного на различные подложки.

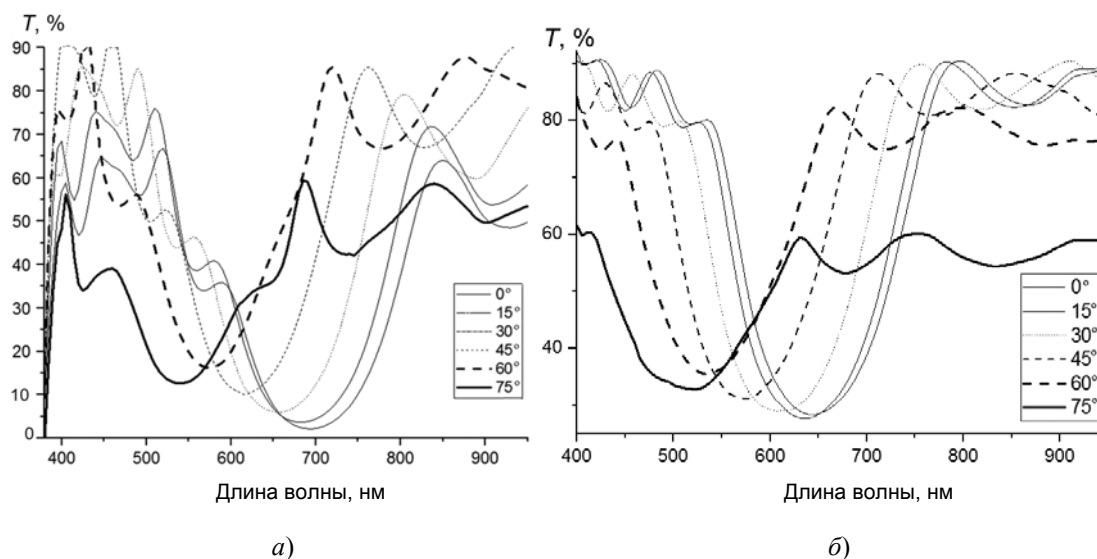


Рис. 3. Спектры пропускания неполяризованного излучения (а) и поляризованного излучения (б) при различных углах падения к поверхности многослойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$ на подложке из кварца

Как видно из графиков, изображенных на рис. 3, с увеличением угла падения излучения к поверхности 14-слойного покрытия, осажденного на подложку из кварца, происходит смещение максимумов пропускания в коротковолновую область спектра, что объясняется изменением оптической толщины каждого слоя в многослойном покрытии. Как следствие, происходит изменение порядка интерференционного максимума, влияющего на изменение положения области спектра, характеризующегося длиной волны с максимальным пропусканием излучения.

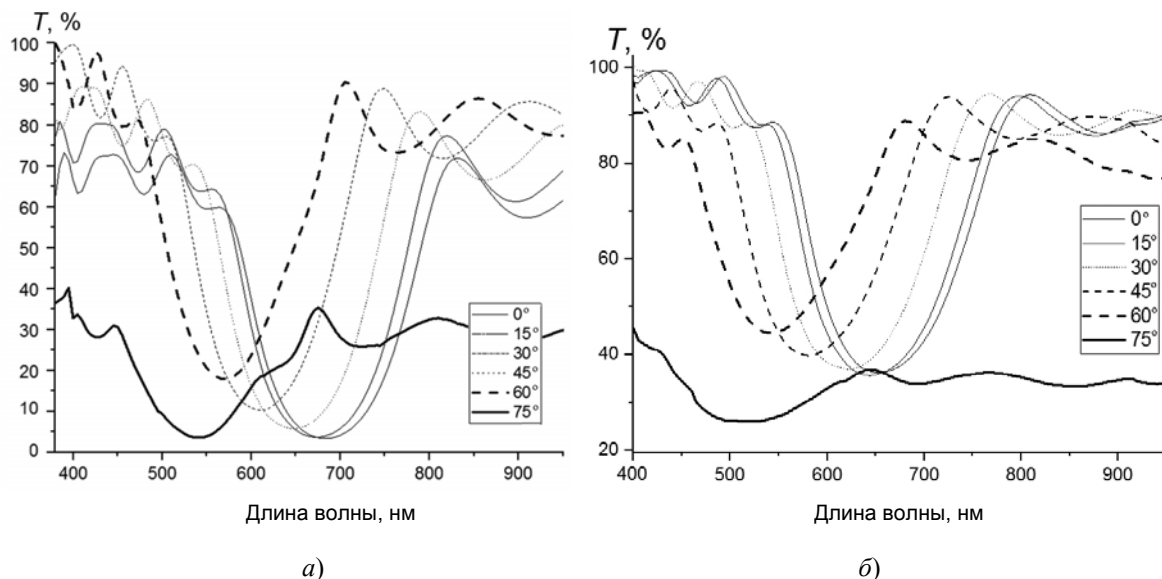


Рис. 4. Спектры пропускания неполяризованного излучения (а) и поляризованного излучения (б) при различных углах падения к поверхности многослойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$ на подложке из стекла К8

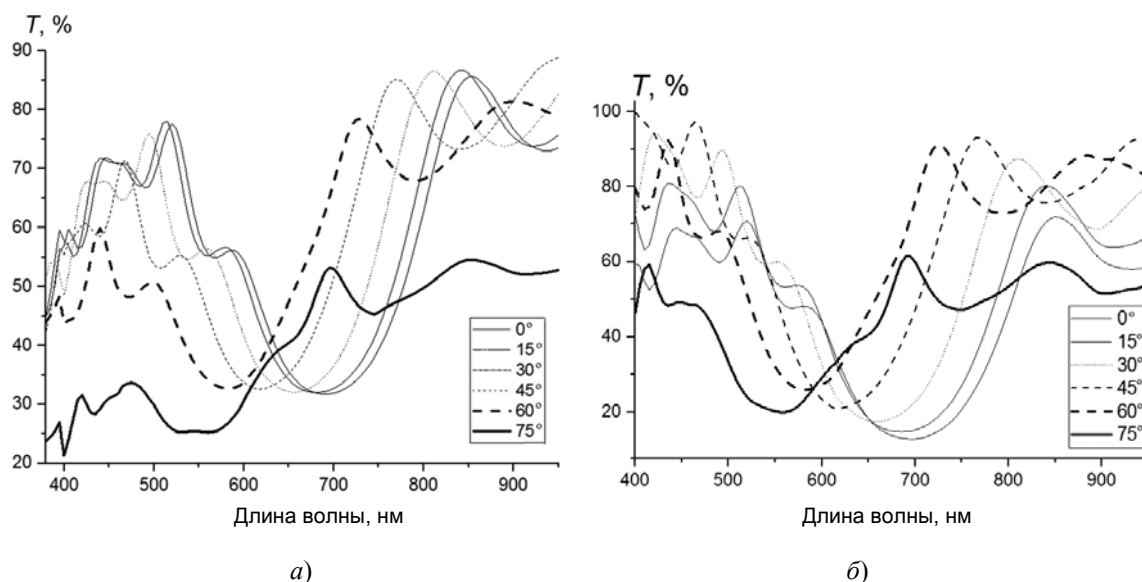


Рис. 5. Спектры пропускания неполяризованного излучения (а) и поляризованного излучения (б) при различных углах падения к поверхности многослойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$ на подложке из полиметилметакрилата

Спектральные зависимости, представленные на рис. 4–6 и установленные для 14-слойных покрытий $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$, нанесенных на подложках из другого материала нежели кварц, т. е. из стекла К8, ПММА и ПЭТ соответственно, также показывают, что пропускающая способность неполяризованного и поляризационного излучения зависит от угла падения излучения к поверхности подложки. В общем, при угле наклона подложки, равном 75° наблюдается минимальный средний коэффициент пропускания от 20 до 60 %, зависящий от природы подложки; в поляризованном свете происходит увеличение пропускающей способности на 20 % по сравнению со спектром пропускания данного покрытия в неполяризованном излучении.

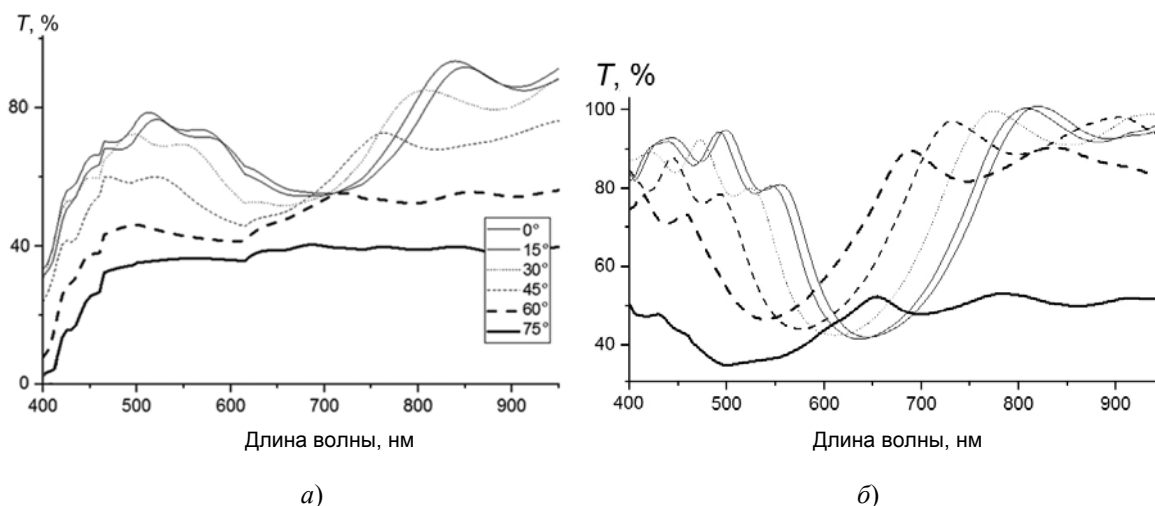


Рис. 6. Спектры пропускания неполяризованного излучения (а) и поляризованного излучения (б) при различных углах падения к поверхности многослойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$ на подложке из полиэтилентерефталата

Таким образом, многослойное покрытие обладает просветляющими свойствами. Также спектр пропускания характеризуется интерференционным минимумом, который расположен в зависимости от типа подложки в диапазоне от 550 до 750 нм. При угле падения неполяризованного и поляризованного излучения, равном 60° , наблюдается интерференционный минимум. Также при данном угле падения можно наблюдать наиболее высокую пропускающую способность, что предполагает высокую эффективность использования данного покрытия.

На основе значений, рассчитанных по формуле (1), были построены диаграммы распределения поляризующей способности для 14-слойного покрытия $[\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2]_7$, в зависимости от угла наклона падающего к поверхности покрытия излучения в диапазоне длин волн от 380 до 980 нм (рис. 7 и 8).

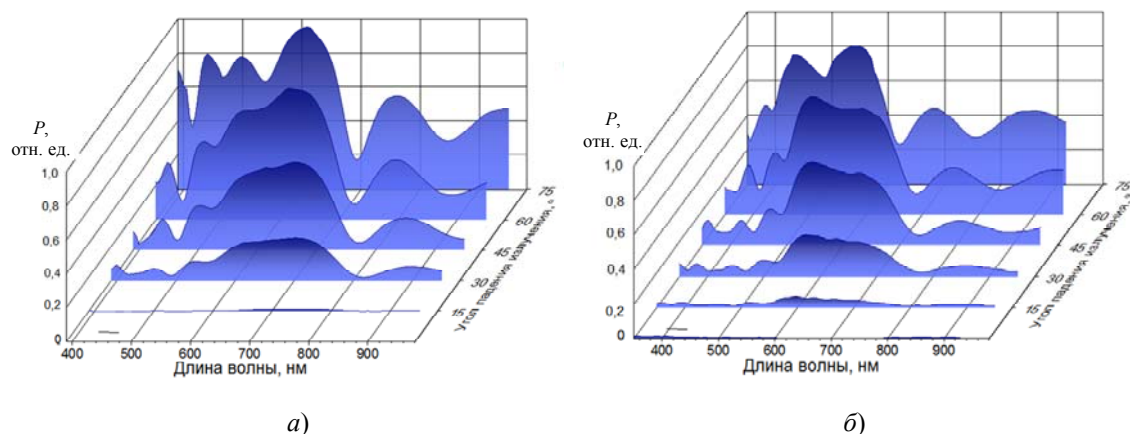


Рис. 7. Распределение поляризующей способности P для прошедшего излучения многослойных покрытий, полученных при различных углах падения излучения к поверхности покрытия, осажденного на подложки из полиметилметакрилата (а) и полиэтилентерефталата (б)

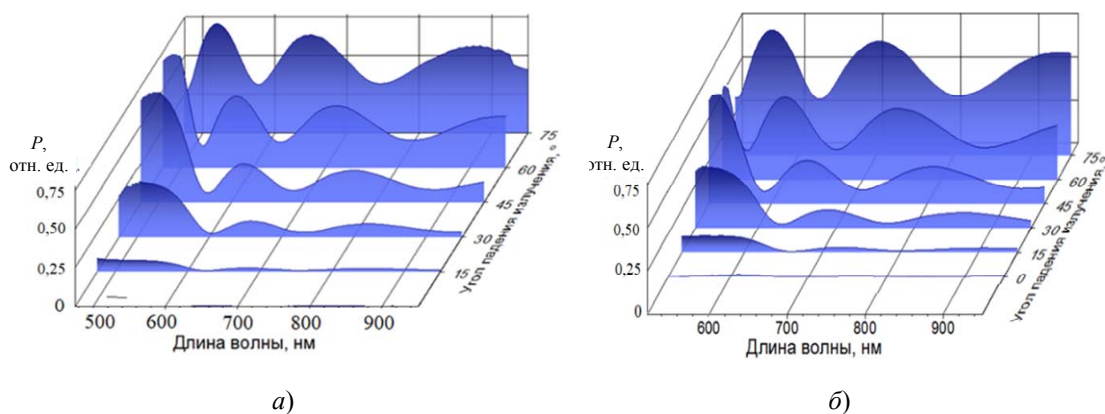


Рис. 8. Распределение поляризующей способности P для прошедшего излучения многослойных покрытий, полученные при различных углах падения излучения к поверхности покрытия, осажденного на подложки из стекла К8 (а) и кварца (б)

На основе анализа данных рис. 3–8 выявлено, что максимумы интерференционных пиков спектров пропускания и отражения смещаются в коротковолновую область излучения с увеличением угла падения. Различие между s - и p -поляризационными компонентами заметно возрастает при углах падения более 45° , и при 75° наблюдается максимальный эффект. Установлено, что для длины волны 532 нм максимальные значения отраженной s -поляризованной и прошедшей p -поляризованной компонент излучения наблюдаются при угле падения 75° . Определение влияния природы подложки на поляризационные характеристики показало, что максимальная поляризующая способность прошедшего излучения при угле падения 75° составила 0,85 – для кварцевой подложки и 0,80 – для пластиковых подложек (полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат). При этом в случае покрытия на подложке из полиметилметакрилата максимум поляризации сместился на длину волны 610 нм и составил 0,95. Значение поляризующей способности отраженного излучения при угле падения 75° к поверхности покрытия на кремниевой подложке составило 0,91.

Результаты измерения спектральных характеристик для 7-слойных покрытий были приведены ранее в работе [7].

В результате проведенных исследований лучевой прочности были рассчитаны параметры порога разрушения сформированных оптических покрытий (см. таблицу). На основе данных измерения лучевой прочности можно отметить существенную разницу в пороге пробоя в зависимости от типа подложки. Так, для 7-слойного покрытия на кремниевой подложке наблюдается минимальная лучевая прочность $5,1 \cdot 10^5$ Вт/см², что объясняется высоким коэффициентом поглощения подложки и низким коэффициентом пропускания. Покрытия на прозрачных пластиковых подложках и 7-слойные покрытия на стекле и кварце характеризуются средней лучевой прочностью – от $6,0 \cdot 10^5$ до $2,5 \cdot 10^5$ Вт/см². Высокой лучевой прочностью $9,7 \cdot 10^7$ Вт/см² обладает 14-слойное покрытие на стеклянной подложке, а максимальной (очень высокой) – $7,0 \cdot 10^8$ Вт/см² – 14-слойное покрытие на кварцевой подложке.

Определено, что существенное влияние количества слоев и соответственно толщины покрытия проявляется, прежде всего, при использовании подложек на основе стекла и кварца (см. таблицу) – лучевая прочность увеличивается в 28 раз. Влияние природы подложки и толщины покрытия может быть объяснено смещением центра тепловых процессов в системе «покрытие – подложка» [4–6].

Лучевая прочность покрытий и параметры порога разрушения

Тип подложки	Параметры				
	Сила тока ЛИ I, А	Энергия ЛИ E, Дж	Площадь лазерного отпечатка S, 10 ⁻⁵ см ²	Лучевая прочность покрытия Q, Вт/см ²	Характеристика лучевой прочности
SiO ₂ (стекло К8)	160	1,8	17,5	$1,7 \cdot 10^6$	Низкая
ZrO ₂ (стекло К8)	150	1,4	13,8	$1,6 \cdot 10^6$	Средняя
<i>7-слойное покрытие ZrO₂/SiO₂</i>					
Кремний	80	0,5	19,3	$5,1 \cdot 10^5$	Средняя
ПММА	180	2,5	7,8	$6,4 \cdot 10^6$	Средняя
ПЭТ	90	0,6	17,6	$6,8 \cdot 10^5$	Средняя
Стекло К8	290	6	21,0	$3,5 \cdot 10^6$	Средняя
Кварц	90	0,6	0,49	$2,5 \cdot 10^7$	Средняя
<i>14-слойное покрытие ZrO₂/SiO₂</i>					
Кремний	100	0,7	24,0	$5,8 \cdot 10^5$	Средняя
ПММА	100	0,7	1,9	$7,1 \cdot 10^6$	Средняя
ПЭТ	90	0,6	20,0	$6,0 \cdot 10^5$	Средняя
Стекло К8	310	6,1	1,2	$9,7 \cdot 10^7$	Высокая
Кварц	100	0,7	0,02	$7,0 \cdot 10^8$	Очень высокая

Факторами, влияющими на лучевую прочность покрытий, нанесенных на оптические элементы, также являются размер пор покрытий, длительность импульса и диаметр фокального пятна лазерного излучения. В зависимости от размера пор в покрытии адсорбируется некоторое количество молекул воды из окружающей среды, и при лазерном нагреве поверхности и объема системы «покрытие–подложка» вода испаряется, что приводит к деформации и изменению физико-химических и оптических свойств системы. При большей длительности импульса лазерного излучения происходит перегрев и расплав поверхности и объема системы, поэтому наиболее перспективно использование сверхкоротких лазерных импульсов. При воздействии фемто- и пикосекундных импульсов на прозрачное диэлектрическое покрытие наблюдаемый порог абляции выше порога абляции металлов по причине необходимости ионизации

всех атомов в зоне воздействия [4–6]. В момент достижения концентрации и энергии свободных электронов, достаточной для начала абляции, происходит разрушение диэлектрического покрытия. Частота импульса также оказывает влияние на нагрев системы, так как после каждого импульса изменяется температура материала.

Отметим, что при проектировании оптических элементов для работы в лазерных системах выбор подложки является важным фактором. По результатам исследования сформулированы следующие особенности влияния подложек на оптическую систему «подложка – покрытие»:

1) подложка на основе полиэтилентерефталата – небольшая масса; обладает низкой термической стойкостью; деформируется при осаждении покрытия; средняя лучевая стойкость; границы пятна контакта имеют расплавленные очертания; после лазерного облучения по толщине подложки не наблюдаются трещины; обладает высокой упругостью;

2) подложка на основе полиметилметакрилата – небольшая масса; обладает различным с покрытием коэффициентом термического расширения; по этой причине во время процесса осаждения подложка расширяется, а после остывания сужается, что приводит к образованию нанотрещин; покрытие на подложке из ПММА характеризуется средней лучевой стойкостью, которая тем не менее на порядок выше, чем у покрытия на подложке из ПЭТ. Однако в связи с внутренними тепловыми процессами по объему подложки при лазерном воздействии высокой мощности наблюдаются микротрещины, расколы;

3) стеклянные и кварцевые подложки обладают повышенной лучевой стойкостью. Так, 14-слойное покрытие обладает едва визуальным различимым пятном разрушения в $0,02 \cdot 10^{-5}$ см² при силе тока до 400 А, однако, начиная со 100 А, в объеме кварцевой подложки наблюдаются деформации вследствие внутренних тепловых процессов.

Исходя из полученных результатов очевидно, что для понимания зависимости порога разрушения от структурных свойств и состава покрытия необходимо учитывать внутренние тепловые эффекты в покрытии. Покрытия разработанной конструкции на кварцевой подложке перспективно использовать в качестве защитно-просветляющих покрытий в лазерных системах.

Заключение

С использованием метода электронно-лучевого испарения получены покрытия на основе оксидов циркония и кремния. Определено влияние архитектуры многослойных покрытий на величину лучевой стойкости покрытий. Максимальными значениями лучевой стойкости ($9,7 \cdot 10^7$ Вт/см² и $7,0 \cdot 10^8$ Вт/см²) характеризуются 14-слойные покрытия на подложке из стекла К8 и кварца соответственно.

Установлено, что экспериментально осажденные образцы многослойных покрытий обладают высокими поляризационными свойствами, что предполагает возможность их применения в конструкции оптических элементов реальных лазерных систем с рабочей длиной волны от 450 до 640 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке выполнения НИР по теме М 21-18/3 «Разработка основ технологии магнетронного, ионного осаждения покрытий из сложных нитридов, карбонитридов на основе титана, алюминия, хрома и кремния для повышения износостойкости, ресурса работы инструмента», в рамках задания 1.12 на 2021–2025 гг.

Литература

1. Femtosecond laser damage resistance of oxide and mixture oxide optical coatings / B. Mangote [et al.] // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37 (9). – P. 1478–1480.
2. Velpula, P. K. Femtosecond Laser-Induced Damage Characterization of Multilayer Dielectric Coatings / P. K. Velpula, D. Kramer, B. Rus // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – P. 603.
3. Qualitative evaluation of sol-gel SiO₂ as a protective layer for soft surfaces / L. L. Diaz-Flores [et al.] // *Surface Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 148. – P. 1–7.
4. Role of nano-precursors in ultraviolet-laser damage of HfO₂/SiO₂ mixture coatings / Q. Zhou [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2021. – Vol. 739. – P. 138963.
5. Increased optical damage resistance in Sc₂O₃-doped LiNbO₃ / J. K. Yamamoto [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 1992. – Vol. 61. – P. 2156–2159.
6. Малов, А. М. Сравнительные характеристики применения импульсно-периодического CO₂-, волоконного наносекундного и фемтосекундного лазеров для изготовления микроотверстий / А. М. Малов // *Приклад. фотоника*. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 166–182.
7. Fedosenko, N. N. Optical properties and morphology of polarization coating based on the SiO₂ and ZrO₂ layers / N. N. Fedosenko, V. A. Emelyanov, E. A. Kulesh // *PFMT*. – 2020. – Vol. 2 (43). – P. 39–42.
8. Поляризаторы на основе поливинилового спирта и пленки с наночастицами серебра: получение и применение (обзор) / В. Е. Агабеков [и др.] // *Полимер. материалы и технологии*. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 6–35.
9. Walker, T. W. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings. Part I: Experimental / T. W. Walker, A. H. Guenther, P. E. Nielsen // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1981. – Vol. QE-17, N 10. – P. 2041–2052.

References

1. Mangote B., Gallais L., Commandre M., Mende M., Jensen L., Ehlers H., Jupe M., Ristau D., Melninkaitis A., Mirauskas J., Sirutkaitis V., Kicas S., Tolenis T., Drazdys R. Femtosecond laser damage resistance of oxide and mixture oxide optical coatings. *Optics Letters*, 2012, vol. 37 (9), pp. 1478–1480.
2. Velpula P. K., Kramer D., Rus B. Femtosecond Laser-Induced Damage Characterization of Multilayer Dielectric Coatings. *Coatings*, 2020, vol. 10, p. 603.
3. Diaz-Flores L. L., Espinoza-Beltran F. J., Yanez-Limon J. M., Mendoza-Galvan A., Ramirez-Bon R., Gonzalez-Hernandez J. Qualitative evaluation of sol-gel SiO₂ as a protective layer for soft surfaces. *Surface Coatings Technology*, 2001, vol. 148, pp. 1–7.
4. Yin C., Zhu M., Zeng T., Song C., Chai Y., Shao Y., Zhang R., Zhao J., Li D., Shao J. Role of nano-precursors in ultraviolet-laser damage of HfO₂/SiO₂ mixture coatings. *Thin Solid Films*, 2021, vol. 739, p. 138–963.
5. Yamamoto J. K., Kitamura K., Iyi N., Kimura S. Increased optical damage resistance in Sc₂O₃-doped LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 1992, vol. 61, pp. 2156–2159.
6. Malov A. M. Comparative characteristics of the use of repetitively pulsed CO₂-, nanosecond fiber and femtosecond lasers for the manufacture of microholes. *Prikladnaja fotonika = Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 166–182 (in Russian).

7. Fedosenko N. N., Emelyanov V. A., Kulesh E. A. Optical properties and morphology of polarization coating based on the SiO₂ and ZrO₂ layers. *PFMT*, 2020, vol. 2 (43), pp. 39–42.
8. Agabekov V. E., Potapov A. L., Shahab S. N., Ivanova N. A. Polarizers based on polyvinyl alcohol and films with silver nanoparticles: preparation and application (review). *Polimernyye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 6–35 (in Russian).
9. Walker T. W., Guenther A. H., Nielsen P. E. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings. Part I. Experimental. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981. – vol. QE-17, no. 10, pp. 2041–2052.

Поступила 04.07.2023 г.