

УДК 538.9:535.8

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СЛОЕВ $\text{SiO}_2$ И $\text{ZrO}_2$

Н.Н. Федосенко<sup>1</sup>, В.А. Емельянов<sup>2</sup>, Е.А. Кулеш<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск

## OPTICAL PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF POLARIZATION COATING BASED ON THE $\text{SiO}_2$ AND $\text{ZrO}_2$ LAYERS

N.N. Fedosenko<sup>1</sup>, V.A. Emelyanov<sup>2</sup>, E.A. Kulesh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>F. Scorina Gomel State University

<sup>2</sup>JSC «Integral», Minsk

Разработана конструкция 7-слойного поляризационного покрытия на основе слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ , осажденного методом электронно-лучевого испарения на подложки различного типа. Определение влияния природы подложки на степень поляризации покрытия показало, что максимальная степень поляризации 0,75 прошедшего излучения достигнута при угле падения  $75^\circ$  при напылении покрытия на подложку из полиэтилентерефталата. Установлено, что для поляризационного покрытия характерны низкие значения шероховатости 5,41 нм.

**Ключевые слова:** поляризатор, тугоплавкие оксиды, многослойное покрытие, электронно-лучевое испарение, морфология, степень поляризации.

The 7-layer polarization coating design based on  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  layers deposited by electron beam evaporation onto substrates of various types has been developed. Determination of the effect of the nature of the substrate on the degree of polarization of the coating showed that the maximum degree of polarization of 0,75 transmitted radiation was achieved at an angle of incidence of  $75^\circ$  when spraying the coating on a substrate of polyethylene terephthalate. It was found that the polarization coating is characterized by low roughness values of 5,41 nm.

**Keywords:** polarizer, refractory oxides, multilayer coating, electron beam evaporation, morphology, degree of polarization.

### Введение

Одним из направлений оптимизации лазерных устройств является создание компактных оптических схем и миниатюризация оптической системы [1]. Для получения линейно-поляризованного излучения эффективно использование пластинчатых интерференционных поляризаторов, представляющих собой многослойное четвертьволновое покрытие, состоящее из чередующихся тонких диэлектрических слоев с высоким и низким показателями преломления, осажденных на пластину из стекла, кварца, кремния или полимеров. Требования, предъявляемые к поляризационным покрытиям, кроме высокой пропускающей и отражающей способностей, включают также наличие низкой шероховатости поверхности для ограничения внутренних потерь за счет рассеяния излучения, высокую химическую и температурную стойкость.

Преимущество многослойного поляризационного покрытия заключается в возможности осуществления разделения и преобразования  $s$ - и  $p$ -поляризаций в одном устройстве. Принцип работы тонкопленочного поляризатора обусловлен его способностью пропускать одну из компонент естественного света, параллельную оси поляризатора, и задерживать другую, ортогональную компоненту, при этом степень поляризации

зависит от угла падения излучения к поверхности покрытия. Использование в качестве угла падения угла Брюстера способствует повышению эффективности работы поляризатора [2].

В качестве интерференционных слоев в тонкопленочном поляризаторе находят применение оксиды тугоплавких металлов. Поляризационные покрытия на основе тугоплавких оксидов формируются различными методами [3], однако можно выделить вакуумный электронно-лучевой синтез, который обеспечивает высокую однородность слоев на большой площади осаждения. В настоящее время повышенный интерес представляют покрытия на полимерных подложках, благодаря чему возможно достигнуть уменьшения размеров, веса и стоимости оптических устройств.

Целью данной работы являлась разработка и оптимизация конструкции поляризационного покрытия на основе тугоплавких оксидов с минимальным количеством слоев и максимальной степенью поляризации, осажденного с помощью технологии вакуумно-плазменного электронно-лучевого испарения на подложки различной природы, а также исследование их морфологии и оптических свойств.

### 1 Методика и объекты исследования

Формирование многослойных покрытий типа  $(\text{ZrO}_2 / \text{SiO}_2)_3 / \text{ZrO}_2$  на основе двуокисей циркония и кремния осуществлялось 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 568 нм. Разработанная конструкция поляризационного покрытия (таблица 1.1) представляет собой последовательно осажденные на подложку чередующиеся тонкие слои тугоплавких окислов  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  с количеством слоев  $N = 7$ , где заключительным слоем выступает  $\text{ZrO}_2$ .

Таблица 1.1 – Конструкция покрытия  $(\text{ZrO}_2 / \text{SiO}_2)_3 / \text{ZrO}_2$

Номер слоя	Материал	Физическая толщина, нм	Показатель преломления слоя
1	$\text{ZrO}_2$	71,3	2,04
2	$\text{SiO}_2$	95,6	1,46
3	$\text{ZrO}_2$	71,3	2,04
4	$\text{SiO}_2$	95,6	2,38
5	$\text{ZrO}_2$	71,3	1,46
6	$\text{SiO}_2$	95,6	2,38
7	$\text{ZrO}_2$	71,3	1,46

В качестве подложек использовали оптическое стекло марки К8, кварцевую пластину толщиной 1 мм, полиэтилентерефталат (ПЭТФ), полиметилметакрилат (ПММА), полированную пластину толщиной 0,5 мм из монокристалла кремния марки КДБ с ориентацией кристаллической структуры 100.

Оптические свойства покрытий, такие как коэффициент пропускания  $T$  и коэффициент отражения  $R$ , были определены с помощью спектрофотометра Cary-50 (Varian) в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм.

Исследование оптических свойств проводили на спектрофотометре Photon RT (Essent Optics, Беларусь), имеющим спектральный диапазон длин волн от 200 до 4000 нм. Спектры пропускания снимались в диапазоне длин волн от 350 до 950 нм при углах падения излучения от 0 до  $75^\circ$ , а спектр отражения – от 8 до  $75^\circ$  в режиме  $PS$ -поляризации. Степень поляризации рассчитывали по формуле:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная компоненты интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора  $E$ .

Исследование морфологии покрытий осуществляли методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO (NT-MDT, Россия). Статистические данные поверхности и анализ зёрен осуществлялся с помощью модульной программы анализа данных СЗМ Gwyddion.

### 2 Результаты и их обсуждение

Спектры пропускания многослойного покрытия  $\text{ZrO}_2 / \text{SiO}_2$  на прозрачных подложках из оптического стекла К8, кварца, ПЭТФ и ПММА, а также спектр отражения покрытия на кремниевой подложке, приведены на рисунке 2.1 и 2.2 соответственно.

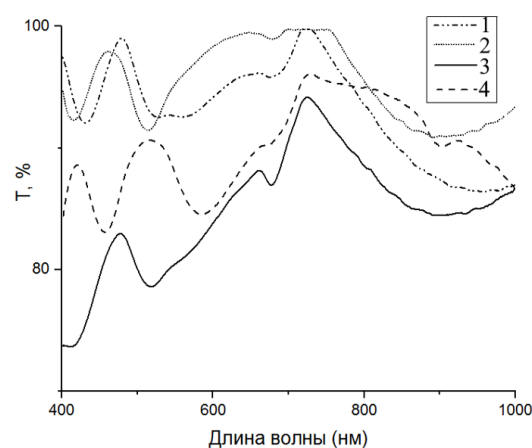


Рисунок 2.1 – Спектры пропускания покрытий  $\text{ZrO}_2 / \text{SiO}_2$  на прозрачных подложках: 1 – на стеклянной подложке, 2 – на кварцевой подложке, 3 – на подложке из ПЭТФ, 4 – на подложке из ПММА

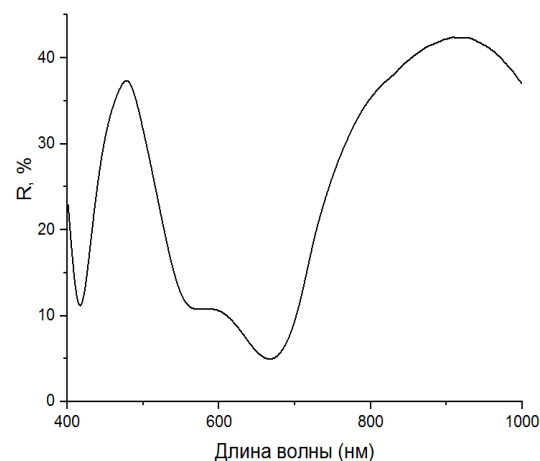


Рисунок 2.2 – Спектр отражения покрытия  $\text{ZrO}_2 / \text{SiO}_2$  на кремниевой подложке

Как видно из рисунка 2.1, многослойные покрытия на всех типах прозрачных подложек характеризуются высокими коэффициентами пропускания от 80 до 99% в видимой области спектра. Можно отметить два интерференционных

пика с максимумами пропускания на длинах волн около 500 нм и 740 нм, при этом на длине волны 740 нм коэффициент пропускания покрытий на подложках из стекла и кварца достигает 99%, а для покрытий на подложках из ПЭТФ и ПММА – около 93% и 95% соответственно.

Как видно из рисунка 2.2, коэффициент отражения многослойного покрытия на кремниевой подложке колеблется в диапазоне от 5 до 45%, при этом наблюдаются интерференционные пики с максимальными коэффициентами отражения 37% и 42% на длинах волн 500 нм и 900 нм соответственно.

Графики спектральной зависимости степени поляризации 7-слояного покрытия на основе двуокиси циркония и кремния для различных углов падения к поверхности излучения и прошедшего через покрытие излучения приведены на рисунках 2.3–2.5. Как видно из графиков поляризации прошедшего излучения (рисунки 2.3, 2.4) для 7-слояного покрытия ZrO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> наблюдается отсутствие поляризованного излучения

при углах падения от 0 до 45°, рост поляризации с двумя пиками максимума начинается при 75° (таблица 2.1):

1 – со значениями степени поляризации от 0,65 до 0,70, приходящихся на длины волн от 375 до 420 нм;

2 – со значениями степени поляризации от 0,52 до 0,65, приходящихся на длины волн от 700 до 800 нм.

Согласно данным таблицы 2.1, покрытие на подложке из ПЭТФ характеризуется максимальными значениями степени поляризации прошедшего излучения в сравнении с покрытиями на других подложках, а именно: 0,75 на длине волны 400 нм и 0,65 на 739 нм.

На основании данных графика зависимости степени поляризации отраженного излучения покрытия на кремниевой подложке (рисунок 2.5) можно отметить три пика максимума поляризации 0,50, 0,72 и 0,85 на длинах волн 400 нм, 532 нм и 780 нм соответственно.

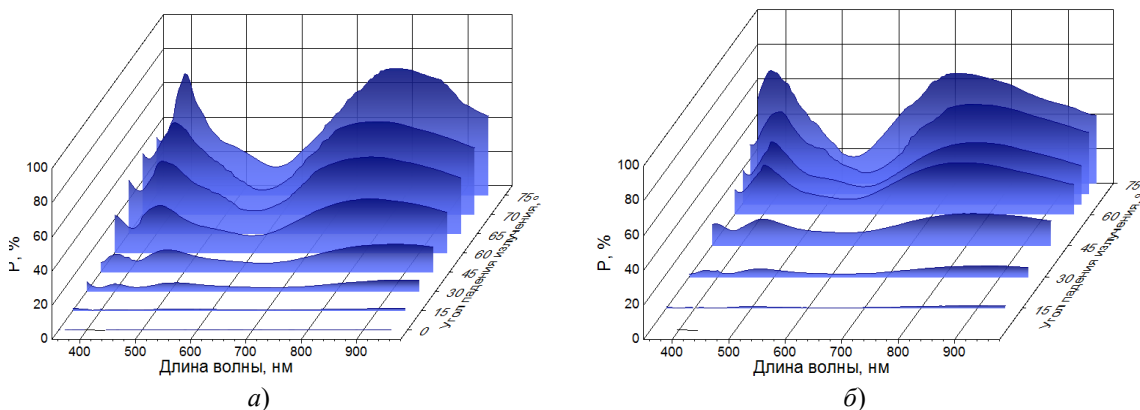


Рисунок 2.3 – Степень поляризации прошедшего через покрытие ZrO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> излучения для разных углов падения к поверхности: а) на стеклянной подложке, б) на кварцевой подложке

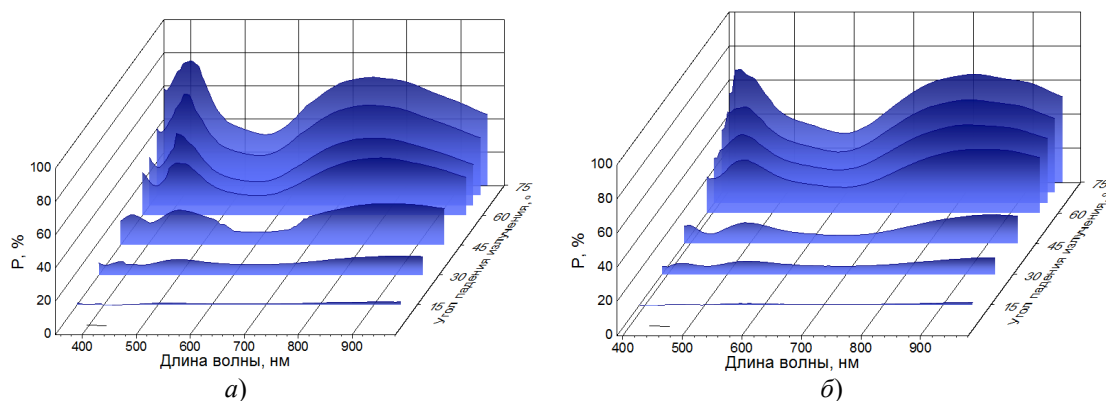


Рисунок 2.4 – Степень поляризации прошедшего через покрытие ZrO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> излучения для разных углов падения к поверхности: а) на подложке из ПЭТФ, б) на подложке из ПММА

Таблица 2.1 – Максимальные значения степени поляризации 7-слояного ZrO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> покрытия при угле 75° прошедшего и отраженного излучения

	ZrO <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub> на стекле		ZrO <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub> на кварце		ZrO <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub> на ПЭТФ		ZrO <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub> на ПММА		ZrO <sub>2</sub> / SiO <sub>2</sub> на кремнии		
λ, нм	400	780	375	704	400	739	400	780	400	532	780
R, %	70	53	65	53	75	65	66	52	50	72	85

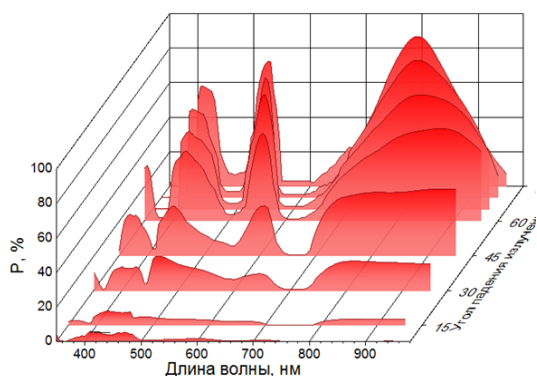


Рисунок 2.5 – Степень поляризации отраженного излучения для разных углов падения к поверхности покрытия  $ZrO_2 / SiO_2$  на кремниевой подложке

При сравнении данного 7-слойного поляризационного покрытия с 14-слойным покрытием, формируемым по аналогичной методике и работающего на длинах волн 532 нм и 633 нм [4], можно отметить, что на указанных длинах волн степень поляризации 7-слойного покрытия составляет порядка 0,2–0,5, что меньше в 2 раза степени поляризации 14-слойного покрытия.

Таким образом, в среднем можно выделить такие рабочие значения длин волн, как 400 нм и 700–780 нм, на которых 7-слойное покрытие  $ZrO_2 / SiO_2$  характеризуется максимальной степенью поляризации.

На рисунке 2.6 приведены данные атомно-силовой микроскопии для многослойного поляризационного покрытия. Статистические данные топологии поверхности покрытия приведены в таблице 2.2. На основе статистического анализа АСМ-изображений видно (таблица 2.2), что поверхность многослойного покрытия, имеющего

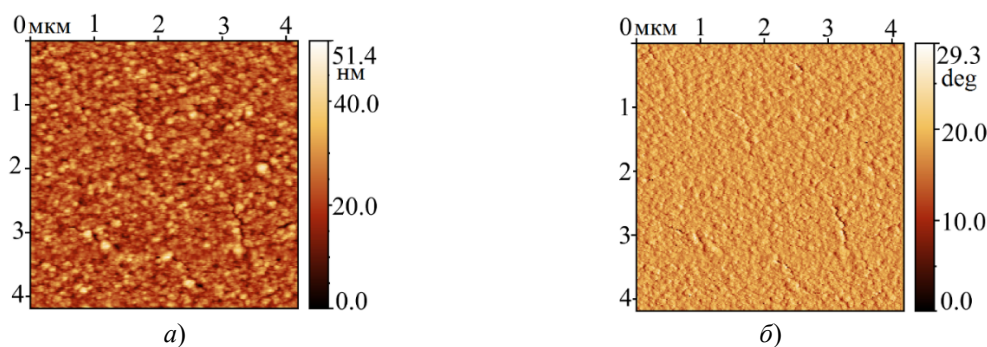


Рисунок 2.6 – Данные атомно-силовой микроскопии для 7-слойного покрытия на основе двуокиси циркония и кремния: а) топография, б) фазовый контраст

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hill, M.T. Advances in small lasers / M.T. Hill, M.C. Gather // Nature Photonics. – 2014. – Vol. 8. – P. 908–918.
2. Macleod, A. Optical Thin Films / A. Macleod // Handbook of Thin Film Deposition. – 2014. – P. 379–416.
3. Крылова, Т.Н. Интерференционные покрытия / Т.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение. – 1973. – 224 с.

последний закрывающий слой  $ZrO_2$ , имеет равномерную структуру, состоящую из зерен средним диаметром 50,03 нм и средней высотой 22,41 нм, а субшероховатость поверхности не превышает 5,5 нм, что не оказывает существенного влияния на спектральные свойства покрытий. Субшероховатость поверхности 7-слойного покрытия сопоставима с шероховатостью однослойного покрытия  $ZrO_2$  и в 2 раза превышает шероховатость 14-слойного покрытия  $ZrO_2/SiO_2$  [4], что объясняется довольно развитой поверхностью и выраженной структурой зерен верхнего закрывающего слоя оксида циркония.

Таблица 2.2 – Статистические данные топологии поверхности многослойного покрытия  $ZrO_2 / SiO_2$

Среднее значение неровностей по высоте, нм	22,69
Субшероховатость покрытия $R_a$ , нм	5,41
Фрактальная размерность покрытия	2,79
Средний диаметр зерна, нм	50,03
Средняя высота зерна, нм	22,41

#### Заключение

Поляризационное 7-слойное покрытие  $ZrO_2 / SiO_2$  характеризуется высокой пропускной и отражающей способностью в видимом диапазоне длин волн, а также высокой степенью поляризации на длинах волн 400 и 780 нм. Шероховатость поверхности многослойного покрытия не оказывает существенного влияния на оптические характеристики. Таким образом, покрытие разработанной конструкции может найти эффективное применение в качестве поляризаторов и отражающих элементов в лазерных и оптических системах.

4. Оптические свойства и морфология тонкоплёночного поляризатора для двух рабочих длин волн на основе тугоплавких оксидов / Н.Н. Федосенко [и др.] // Оптика неоднородных структур – 2019: материалы Международной конференции, 28–29 мая 2019 г., МГУ им. А.А. Кулешова. – Могилев, 2019. – С. 91–97.

Поступила в редакцию 14.03.2020.