

УДК 538.9:535.8

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛЁНОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ ОКСИДОВ

А.В. Рогачёв, Н.Н. Федосенко, Д.Л. Горбачёв

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

MULTIFILM POLARIZERS BASED ON REFRACTORY OXIDES

A.V. Rogachev, N.N. Fedosenko, D.L. Gorbachev

F. Scorina Gomel State University

В работе показана эффективность использования вакуумного электронно-лучевого испарения совместно с методом оптического контроля толщины для формирования многослойных поляризационных покрытий на основе 12-слойной системы $\text{SiO}_2+\text{ZrO}_2$ с высокими значениями степени поляризации. Разработанная конструкция поляризационного покрытия на основе тугоплавких оксидов для длины волны $\lambda = 660$ нм может быть использована для формирования поляризаторов, работающих как на отражение, так и на пропускание при создании оптических элементов лазерных систем.

Ключевые слова: поляризатор, электронно-лучевое испарение, тугоплавкие оксиды, многослойные оптические покрытия.

The effectiveness of using an electron beam vacuum evaporation method is shown together with the optical thickness monitoring for formation of multilayer coatings based on twelve layers of $\text{SiO}_2+\text{ZrO}_2$ with high degree of polarization. The developed design of the polarization coating is based on refractory oxides for the wavelength $\lambda = 660$ nm. It can be used to form polarizers operating as reflective and transmissive optical elements as parts of laser systems.

Keywords: polarizer, electron beam evaporation, refractory oxides, multilayer optical coatings.

Введение

В настоящее время совершенствование конструкции и миниатюризация лазерных систем продолжают являться актуальной задачей современной науки и техники, благодаря всё расширяющимся областям применения лазеров [1], [2]. Такие уникальные свойства лазерного излучения, как монохроматичность, когерентность и малая расходимость луча наряду с возможностью создания большой плотности мощности определяют широкие возможности для применения лазеров в контрольно-измерительном оборудовании, различных датчиках, технологиях бесконтактной резки материалов, передачи данных, формирования проекций изображений и многих других областях деятельности человека.

Ещё одним уникальным свойством лазерного излучения является его линейная поляризация. Благодаря такому свойству лазерный луч по-разному воздействует на поверхность материалов с разной отражательной способностью. Известно, что материал хорошо поглощает линейно поляризованный свет, вектор напряжённости поля E которого параллелен плоскости поверхности при лазерной резке материалов, что увеличивает эффективность данного процесса и улучшает геометрию профиля реза. Кроме этого эффект поляризованности лазерного излучения применяется в интерферометрах, оптических усилителях и модуляторах, а также при создании сложных комбинированных пучков для реализации

точной обработки материалов и формирования фотонных структур.

Однако некоторые типы лазеров изначально не имеют линейно поляризованного выходного излучения (например, волоконные). К тому же оптические параметры поляризации луча могут быть неустойчивыми благодаря температурному дрейфу и другим технологическим факторам работы квантового генератора. Для преобразования частично поляризованного в линейно-поляризованное излучение в оптических схемах используют специальные элементы – поляризаторы. Различают призмные и пластинчатые поляризаторы, причём призмные из-за сложности изготовления и дороговизны всё больше уступают миниатюрным плёночным интерференционным поляризаторам.

Целью данной работы являлась разработка и оптимизация конструкции плёночного интерференционного поляризатора для длины волны 660 нм на основе слоёв тугоплавких оксидов, а также последующее изготовление образцов поляризационного покрытия методом электронно-лучевого вакуумно-плазменного синтеза и изучение его оптических характеристик.

1 Методика и объекты исследования

Нанесение покрытий производилось на установке вакуумного напыления ВУ-1А (рисунок 1.1), оснащенной источником электронно-лучевого испарения УЭЛИ-1 и встраиваемой системой

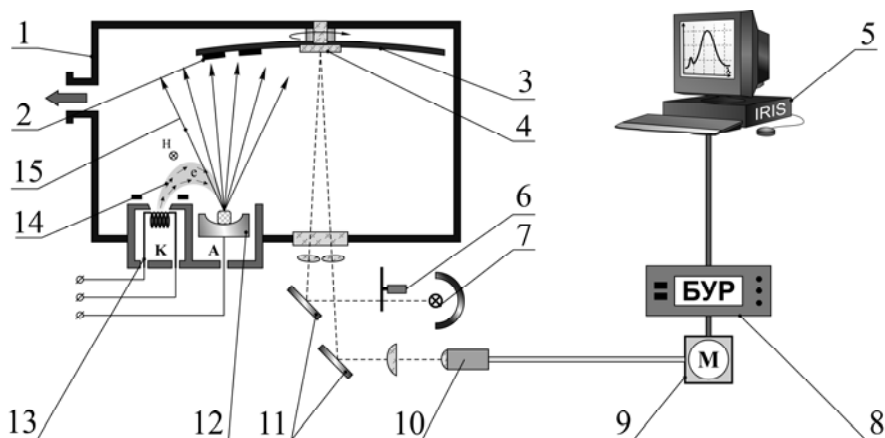


Рисунок 1.1 – Структура вакуумной установки электронно-лучевого нанесения покрытий:
 1 – вакуумная камера; 2 – подложки; 3 – вращающаяся оснастка; 4 – образец-свидетель;
 5 – компьютер с программой «IrisSoft»; 6 – модулятор; 7 – источник излучения галогенный;
 8 – блок управления и регистрации; 9 – монохроматор M250; 10 – световод; 11 – плоские зеркала;
 12 – анод источника ЭЛИ с испаряемым веществом; 12 – катод источника ЭЛИ;
 14 – электронный луч; 15 – поток распылённого вещества

контроля оптических характеристик, модель Iris-0211 (СОК Iris). Источник электронно-лучевого испарения УЭЛИ-I специально предназначен для испарения в вакууме тугоплавких окислов, полупроводниковых материалов и металлов с максимальным ускоряющим напряжением 12 кВ и максимальным током нагрузки 500 мА.

При исследовании оптических свойств покрытий использовали спектрофотометр Photon RT (Essent Optics, Беларусь), предназначенный для измерения спектральных характеристик отражения, пропускания и оптической плотности в поляризованном свете в диапазоне длин волн от 200 до 4000 нм. Так же в программе для работы со спектрофотометром реализован математический алгоритм расчёта показателя преломления по отношению интенсивности поляризационных компонент в спектре отражения. Исследование морфологии покрытий осуществляли методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO (NT-MDT, Россия). В качестве зондов применялись кремниевые кантилеверы серии NSG11S с типичной силовой константой 5,5 Н/м. В качестве подложек для формируемых экспериментальных покрытий использовались полированные пластины кремния и оптического стекла К8.

2 Результаты и их обсуждение

В качестве материалов для многослойного покрытия выбраны чередующиеся слои ZrO_2 и SiO_2 . Для точного определения значения оптической толщины отдельных слоёв, необходимого для проектирования многослойного покрытия, по спектрам отражения однослойных покрытий рассчитаны показатели преломления. Для ZrO_2 показатель преломления составляет $n = 1,924$ (при

табличном значении 2,039) и для SiO_2 $n = 1,475$ (при табличном значении 1,456). Различие табличных показателей преломления с полученными на практике связано с условиями вакуумного-электронно-лучевого формирования покрытий, влияющих на их структуру.

На основании полученных данных проведено проектирование конструкции покрытия для рабочей длины волны красного лазерного излучения 660 нм с помощью специализированной программы Multispectrum, входящей в комплект системы оптического контроля толщины Iris (Essent Optics, Беларусь). Покрытие состоит из чередующихся слоёв с малым и большим показателем преломления с оптической толщиной 165,7 нм, причём оптимальным количеством слоёв является 12, т. к. при этом наблюдаются максимальные значения отражённой s -поляризованной и прошедшей p -поляризованной компонент излучения на длине волны 660 нм при угле падения 75° (рисунок 2.1).

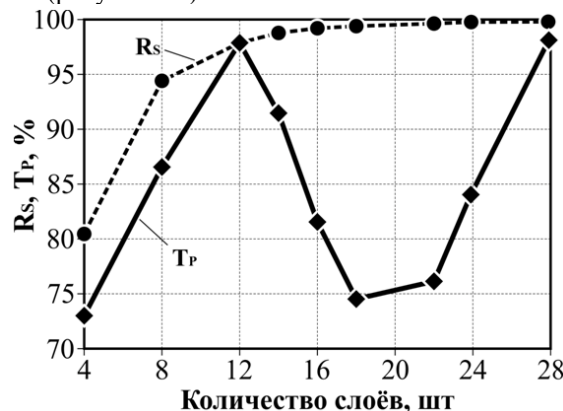


Рисунок 2.1 – Зависимость параметров поляризованных компонент излучения от количества слоёв интерференционного покрытия

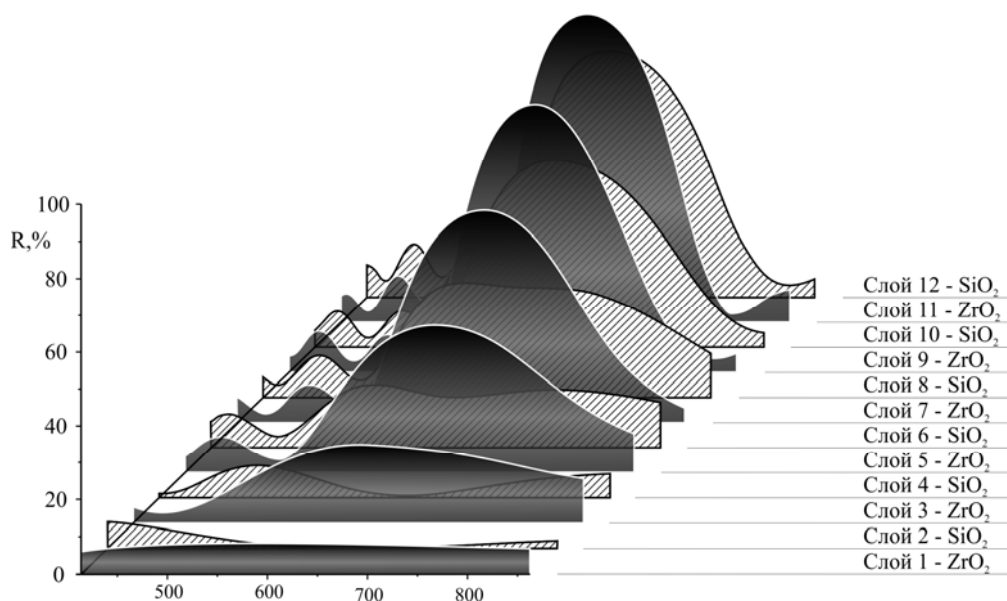


Рисунок 2.2 – Изменение коэффициента отражения при послойном формировании покрытия

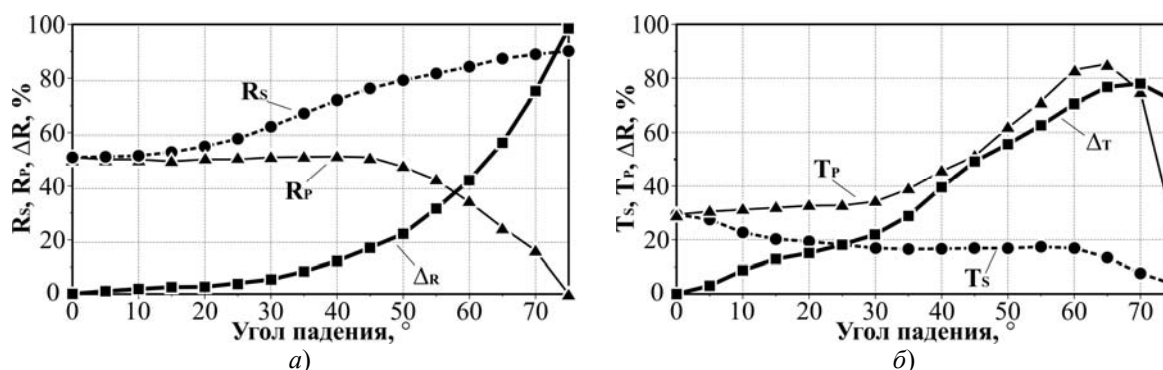


Рисунок 2.3 – Зависимости изменения степени поляризации Δ , а также интенсивностей p - и s - компонент от угла падения для:
 а) отражённого излучения от покрытия на непрозрачной подложке;
 б) прошедшего излучения через покрытие на прозрачной подложке

На рисунке 2.2 приведены расчётные значения коэффициента отражения на разных стадиях формирования покрытия, полученные в ходе оптического контроля толщины отдельных слоёв. Как видно из рисунка, с увеличением числа слоёв происходит усиление коэффициента отражения излучения в рабочем диапазоне длин волн с максимумом при $\lambda = 660$ нм.

С помощью спектрофотометра Photon RT измерена степень поляризации отражённого излучения Δ_R для покрытия на непрозрачной кремниевой подложке и степень поляризации Δ_T излучения, прошедшего через покрытие на прозрачной подложке из оптического стекла К8 при различных от 0 до 75° углах падения на длине волны 660 нм (рисунок 2.3).

Как видно из графиков, максимальная степень поляризации для покрытия, работающего в качестве зеркала (рисунок 2.3, а) составляет 97% при угле падения 75° за счёт полного отсутствия при данном угле отражения p -компоненты излучения.

При этом значение s -компоненты на 9% ниже расчётной и составляет $R_s = 89\%$.

Покрытие, сформированное на прозрачной подложке из оптического стекла К8, показало несколько большее расхождение расчётных и экспериментально полученных оптических параметров (рисунок 2.3, б). Максимум степени поляризации излучения, прошедшего через образец с покрытием, наблюдается в диапазоне углов падения 68–70°, причём после 70° происходит резкий спад интенсивности как s -, так и p -компоненты. Значение максимальной поляризации составляет 79%, а максимум интенсивности p -компоненты – $T_p = 84\%$.

Для определения чистоты поверхности сформированных покрытий изучена морфология поверхности как сформированных однослойных ZrO_2 и SiO_2 , так и 12-слоистого поляризационного покрытия ZrO_2+SiO_2 . Результаты исследований, полученные методом АСМ, приведены в таблице 2.1 и на рисунке 2.4.

Таблица 2.1 – Среднестатистические параметры морфологии покрытий

Тип покрытия	Субшероховатость R_a , нм	Диаметр зёрен у основания D , нм	Соотношение высоты зерна к его диаметру, h / D
SiO_2	0,97	50	0,040
ZrO_2	0,86	30	0,083
$(\text{ZrO}_2+\text{SiO}_2)\cdot 6$	1,8	115	0,060

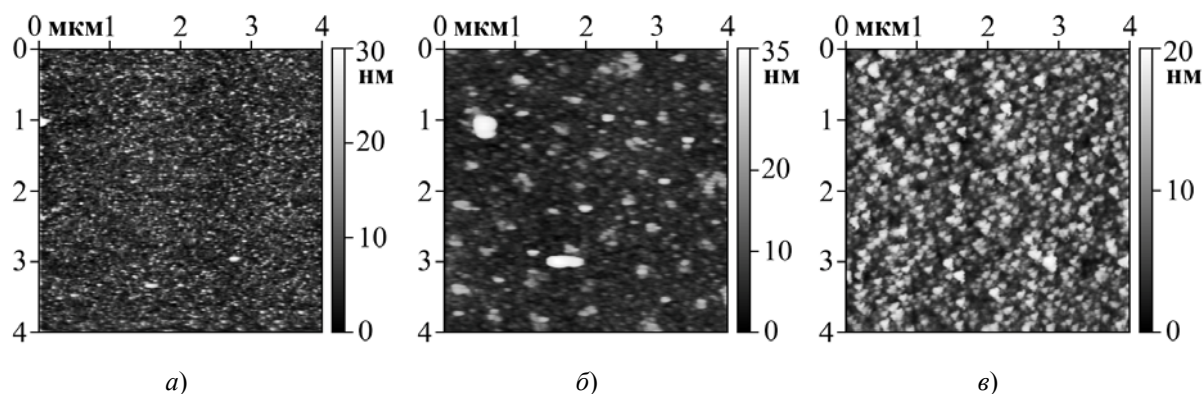


Рисунок 2.4 – Морфология поверхности покрытий полученная методом АСМ по полю сканирования 4x4 мкм: а) ZrO_2 ; б) SiO_2 ; в) $(\text{ZrO}_2+\text{SiO}_2)\cdot 6$

Из рисунка 2.4, в) видно, что поверхность многослойного поляризационного покрытия, имеющего последний закрывающий слой SiO_2 , имеет равномерную структуру, состоящую из зёрен со средним размером у основания около 115 нм, а субшероховатость поверхности сформированных покрытий не превышает 2 нм, что позволяет применять данные покрытия для создания оптических элементов видимого и инфракрасного спектрального диапазона.

Заключение

Таким образом, экспериментально полученные поляризационные покрытия имеют хорошо согласующиеся с теоретическими расчётами оптические характеристики, что определяет возможность их применения в конструкции оптических элементов реальных лазерных систем с

рабочей длиной волны 660 нм. Высокая лучевая стойкость, прозрачность, миниатюрность конструкции, простота и дешевизна изготовления определяют широкую область применения таких тонкоплёночных систем в различных технических решениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mourou, G. Development and applications of compact highintensity lasers / G. Mourou, D. Umstadter // Physics of Fluids B: Plasma Physics. – 1992. – Vol. 4, № 7. – P. 2315–2325.
2. Крылова, Т.Н. Интерференционные покрытия / Т.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение. – 1973. – 224 с.

Поступила в редакцию 22.11.15.