

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА ДЛЯ ДВУХ РАБОЧИХ ДЛИН ВОЛН НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ ОКСИДОВ

Методом вакуумного электронно-лучевого испарения совместно с системой оптического контроля толщины сформирован опытный образец 14-слойного поляризационного покрытия для двух рабочих длин волн 532 нм и 633 нм на основе чередующихся слоев ZrO_2 и SiO_2 . Определены морфологические особенности поверхности и оптические свойства многослойных покрытий. Проведён анализ зависимости степени поляризации сформированных покрытий от природы материала подложки.

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

A prototype of a 14-layer polarization coating for two working wavelengths of 532 nm and 633 nm based on alternating ZrO_2 and SiO_2 layers was formed by vacuum electron-beam evaporation with the optical thickness control system. The morphological features of the surface and the optical properties of multilayer coatings are determined. The dependence of the degree of polarization of the formed coatings on the nature of the substrate material has been analyzed.

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

Введение. Многослойные покрытия на основе тугоплавких оксидов широко используются для создания поляризационных элементов современной оптики и лазерных систем [1]. Требования, предъявляемые к поляризатору, включают в себя не только конкретные спектральные характеристики, но и способность длительное время выдерживать лазерное воздействие, а также иметь высокие физико-механические свойства поверхности. Кроме того, обычно покрытие поляризатора имеет большую толщину, чем зеркальное покрытие, и более узкую полосу пропускания, которая удовлетворяет специфическим спектральным характеристикам, что усложняет проектирование и изготовление покрытия поляризатора в целом.

Интерференционный поляризатор представляет собой многослойное оптическое покрытие, спектральное пропускание которого различно для *p*- и *s*-поляризованного излучения при ненулевых углах падения. Толщина слоя и угол падения излучения могут быть выбраны для получения максимума пропускания для *p*-поляризации и минимума для *s*-поляризации в области назначенной длины волны.

В последние годы достигнуты значительные успехи в разработке методов получения многослойных интерференционных покрытий по тонкопленочным вакуумным технологиям. Хорошую эффективность показал метод использования вакуумного электронно-лучевого испарения совместно с методом оптического контроля толщины для формирования многослойных поляризационных покрытий на основе тугоплавких оксидов металлов [2].

Целью данной работы являлась разработка конструкции пленочного интерференционного поляризатора, способного работать одновременно для двух длин волн 532 нм и 660 нм на основе слоёв тугоплавких оксидов, а также последующее изготовление образца поляризационного покрытия на различных подложках методом электронно-лучевого испарения и исследование его морфологии поверхности и оптических свойств.

1. Методика эксперимента. Покрытия формировались на вакуумной установке ВУ-1А, оснащенной источником электронно-лучевого испарения УЭЛИ-1 и встраиваемой системой спектрального оптического контроля серии IRIS (Essent Optics, Беларусь). Осаждение покрытий осуществлялось с максимальным ускоряющим напряжением 12 кВ и током эмиссии от 15 до 150 мА при остаточном давлении в камере $6 \cdot 10^{-3}$ Па.

В качестве материалов для многослойного оптического покрытия выбраны чередующиеся слои на основе материалов двуокиси циркония ZrO_2 и двуокиси кремния SiO_2 . В качестве подложек для формируемых покрытий использовались полированные пластины кремния, кварца, полиметилметакрилата, политетрафторэтилена и предметного стекла. Перед нанесением

покрытия поверхность подложек предварительно подвергалась очистке с помощью низкоэнергетического ионного источника типа «АИДА» в вакууме и последующему нагреву с помощью ИК-ламп до температуры 200°C.

На основании измеренных спектров отражения однослойных покрытий SiO_2 и ZrO_2 [3] рассчитаны реальные показатели преломления отдельных слоев, и спроектирована конструкция 14-слойного поляризационного покрытия $[(\text{ZrO}_2)(\text{SiO}_2)]_7$ для двух рабочих длин волн 532 нм и 633 нм (рис. 1).

	Толщина, нм	Показатель преломления, n
КВАРЦ	×	1,45
ZrO ₂	95,6	2,0
SiO ₂	71,3	1,49
⋮	⋮	⋮
ZrO ₂	95,6	2,0
SiO ₂	71,3	1,49
ВОЗДУХ	×	1,0

Рис. 1. Схема многослойного поляризационного покрытия

Исследование морфологии покрытий осуществляли методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO (NT-MDT, Россия). В качестве зондов использовались кремниевые кантилеверы серии NSG11S с типичной силовой константой 5,5 Н/м. Статистические данные поверхности и анализ зёрен осуществлялся с помощью модульной программы анализа данных С3М Gwyddion.

Исследование оптических свойств покрытий проводилось с помощью спектрофотометра Photon RT (Essent Optics), предназначенного для измерения спектральных характеристик отражения, пропускания и оптической плотности в поляризованном свете в диапазоне длин волн от 200 нм до 4000 нм. На основании измеренных спектров рассчитывались степень поляризации отражённого излучения P_R для сформированного образца покрытия на непрозрачной кремниевой подложке и степень поляризации P_T на прозрачной стеклянной подложке при разных углах падения излучения, а именно: 0, 15, 30, 45, 75 градусов.

Также при исследовании оптических свойств использовались лазерный эллипсометр ЛЭФ-757 с рабочей длиной волны светового потока 635 нм и спектрофотометр видимого диапазона излучения Cary-50 (Varian).

2. Результаты и их обсуждение. Снимки морфологии поверхности сформированного многослойного покрытия, полученные методом атомно-силовой микроскопии, представлены на рисунке 2. Исследование топографии поверхности покрытия методом атомно-силовой микроскопии и анализ статистических данных показал, что покрытие $[(ZrO_2)(SiO_2)]_7$ характеризуется относительно гладкой поверхностью, имеет низкие значения субшероховатости поверхности около 2,64 нм и структурно сформированные малые зерна, средний диаметр которых достигает значения 36,2 нм, а средняя высота зерна составляет 11,3 нм. Таким образом, морфология поверхности сформированного покрытия имеет хорошие качественные показатели и не способна оказать существенного негативного влияния на оптические характеристики многослойной системы, связанные с рассеянием и поглощением излучения на дефектах и неровностях поверхности.

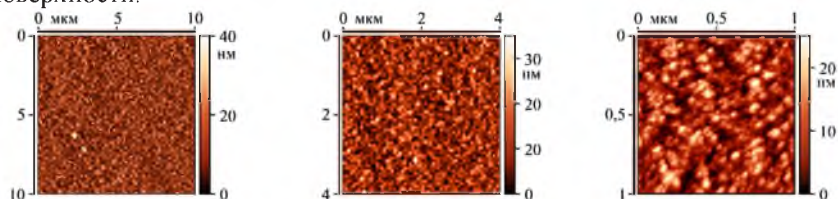


Рис. 2. Изображения поверхности покрытия с различным увеличением, полученные методом атомно-силовой микроскопии

С целью изучения влияния природы материала подложки для многослойного покрытия на его поляризационные свойства, измерена степень поляризации прошедшего излучения для образцов покрытия на кварце, стекле, политетрафторэтилене, полиметилметакрилате и отражённого излучения от покрытия на полированной пластине кремния.

Как видно из рисунка 3 (а), для длины волны 532 нм резкое увеличение степени поляризации до значения 0,67 достигается при угле падения 60° , а при угле 75° достигает значения 0,81, что свидетельствует о высоких поляризационных свойствах синтезированного покрытия. Степень поляризации прошедшего излучения от прозрачного образца с многослойным покрытием на длине волны 633 нм достигает значения 0,47 уже при угле падения в 45° , и увеличивается до значения 0,5 при углах падения $60^\circ - 75^\circ$.

На рисунке 3 (б) приведены значения степени поляризации прошедшего излучения для разных углов падения к поверхности многослойного покрытия на стеклянной подложке. Для длины волны 532 нм максимум поляризации составляет значение в 0,84 и приходится на угол падения из-

лучения в 75° . Для длины волны 633 нм максимум поляризации составляет значение в 0,55 и приходится на угол падения излучения в 60° .

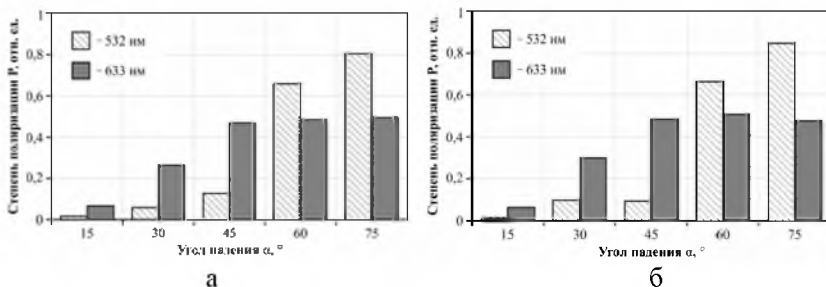


Рис. 3. Значения степени поляризации прошедшего излучения для разных углов падения к поверхности многослойного покрытия: а – на кварцевой подложке; б – на стеклянной подложке

Спектры пропускания многослойного покрытия на подложке из политетрафторэтилена подобны спектрам пропускания покрытия на подложке из стекла, однако имеют более низкие значения s-составляющей прошедшего через систему покрытие-подложка излучения, в результате чего измерения показывают более высокие значения поляризации для длины волны 633 нм (рис. 4 а).

В случае использования подложки из полиметилметакрилата (рис. 4 б) значения поляризации заметно снижаются, а максимум смещается на угол падения в 60° к поверхности образца, при этом пропускание излучения в видимой области значительно ухудшается и не превышает 50%.

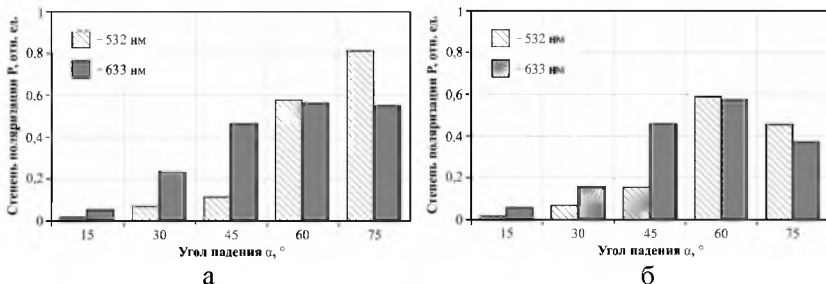


Рис. 4. Значения степени поляризации прошедшего излучения для разных углов падения к поверхности многослойного покрытия: а – на подложке из политетрафторэтилена; б – на подложке из полиметилметакрилата

На рисунке 5 приведены спектры отражения и значения степени поляризации отраженного излучения для разных углов падения к поверхности многослойного покрытия на непрозрачной кремниевой подложке.

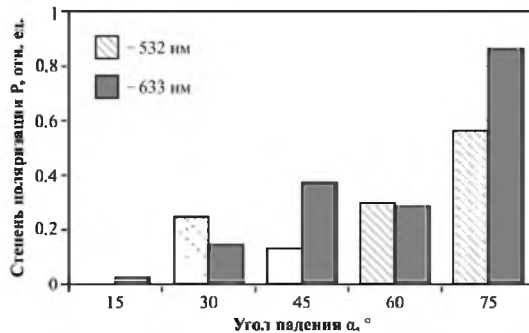


Рис. 5. Значения степени поляризации отраженного излучения для разных углов падения к поверхности многослойного покрытия на подложке из кремния

Для отраженного излучения от непрозрачной подложки на кремнии зафиксировано максимальное значение степени поляризации для длины волны 633 нм, которое составляет значение 0,85 при угле падения в 75° , что позволяет использовать данную многослойную систему одновременно как поляризатор и оптическое зеркало.

Выводы. Спроектирована конструкция, и сформирован опытный образец 14-слойного поляризационного покрытия для двух рабочих длин волн 532 нм и 633 нм на основе чередующихся слоев ZrO_2 и SiO_2 . Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что морфология поверхности сформированного покрытия не оказывает существенного влияния на оптические характеристики многослойной системы в целом. При изучении влияния природы подложки на поляризационные характеристики покрытия установлено, что образцы на стеклянных подложках обладают максимальным значением степени поляризации прошедшего излучения 0,84 при угле падения к поверхности в 75° .

Оптические характеристики и высокие физико-механические свойства материалов, используемых при изготовлении тонкопленочного поляризатора, позволяют применять разработанную конструкцию в широком спектре задач оптического и электронного приборостроения.

Литература:

1. Shao, J. Thin-film polarizer for high power laser system in China / J. Shao, K. Yia, M. Zhua // Conference: Pacific Rim Laser Damage 2016: Optical Materials for High Power Lasers. Proceedings of SPIE. – Vol. 9983. – P. 998308 (1-5).
2. Рогачёв, А.В. Многослойные плёночные поляризаторы на основе тугоплавких оксидов / А.В. Рогачёв, Н.Н. Федосенко, Д.Л. Горбачёв // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 4 (25). – С. 27–30.

3. Рогачёв, А.В. Морфология и оптические свойства многослойных покрытий из тугоплавких оксидов / А.В. Рогачёв, Н.Н. Федосенко, Н.Г. Арико, Д.Л. Горбачёв, А.С. Руденков // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 4 (17). – С. 21–27.