

НАНЕСЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

П. А. Новиков, В. Г. Жупанов, В. Н. Федосеев, П. А. Конотопов

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»»

Тонкопленочные поляризаторы являются важными компонентами мощных лазерных систем из-за необходимости перекрывать оптический тракт на время действия импульса накачки (в сочетании с ячейкой Погкельса), а также создания линейной поляризации для эффективного преобразования частоты и защиты системы от отраженного назад света. Изготовление поляризаторов для импульсных лазерных систем является особенно сложной задачей из-за необходимости обеспечения высокой лазерной стойкости [1] и высоких требований к коэффициентам отражения и пропускания.

Для нанесения многослойных поляризационных покрытий с высокой лучевой прочностью очень привлекательна комбинация материалов ZrO_2/SiO_2 , которая обладает большей разницей показателей преломления, чем широко используемая комбинация HfO_2/SiO_2 [2]. Таким образом, комбинация материалов ZrO_2/SiO_2 позволяет достигать требуемых оптических свойств покрытия путем нанесения меньшего количества слоев. Но есть серьезные сложности, связанные с использованием ZrO_2 в качестве материала с высоким показателем преломления. В первую очередь они связаны с оптической и кристаллической неоднородностью пленок ZrO_2 .

Принципиальным моментом для обеспечения точности фотометрического контроля толщин слоев покрытия является максимально точное определение дисперсионных зависимостей показателей преломления, используемых для напыления тонкопленочных материалов. Для определения оптических параметров ZrO_2 были проведены тестовые напыления пленки ZrO_2 на подложку из стекла К8. Толщина пленки при этом была близкой к значениям толщин слоев разрабатываемого поляризатора. Затем для уточнения найденных дисперсионных зависимостей показателя преломления было проведено тестовое напыление 14-слойного зеркала на основе ZrO_2 и SiO_2 с толщинами слоев, близкими к охарактеризованным. При расчете теоретической спектральной кривой данного зеркала были использованы данные о показателе преломления, определенные из одиночных пленок.

Экспериментальные данные для коэффициента пропускания напыленного зеркала были получены с помощью спектрофотометра Perkin-Elmer Lambda 950 (рис. 1). Сравнение экспериментальных и теоретических данных для коэффициента пропускания указывает на присутствие систематических ошибок в толщинах слоев с высоким и низким показателями преломления (пик измененного коэффициента пропускания в районе 530 нм). Кроме того, экспериментальная спектральная характеристика имеет заметно более узкую зону высокого отражения по сравнению с теоретической кривой. Это связано с отличием показателя преломления слоев ZrO_2 , находящихся в структуре отражающего покрытия, и слоев ZrO_2 , нанесенных по отдельности (рис. 2). Решить проблему отличия расчетных спектральных характеристик и фактических теоретически должен контроль спектральных свойств покрытия в процессе его нанесения.

Контроль толщин слоев в процессе нанесения до сих пор является достаточно сложной задачей, не имеющей простого и однозначного решения. Все многообразие методов измерения толщин существовавших ранее, на современном напылительном оборудовании свелось к двум. Это метод фотометрического контроля и метод кварцевых микровесов. В первом случае для измерения используется зависимость коэффициента отражения и/или пропускания от оптических свойств и толщины напыляемых пленок [3], во втором измеряется масса осаждаемого вещества. Фотометрические методы разделяют на два основных – монохроматический и широкополосный спектральный. Широкополосный спектральный метод является более информативным, но данному методу присущи определенные недостатки [4].

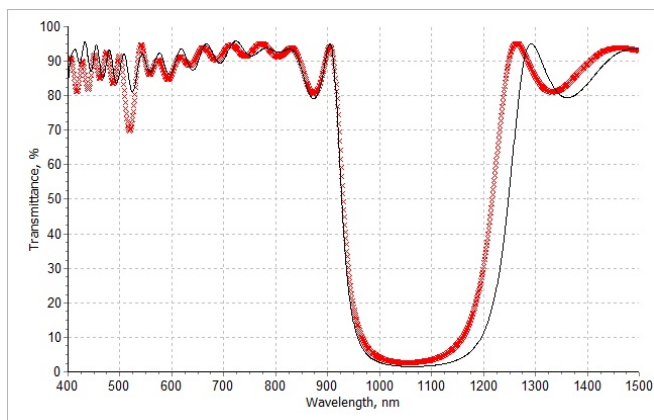


Рис. 1. Спектр пропускания 14-слойного зеркала на основе ZrO_2 и SiO_2 : красная кривая – экспериментальные данные, черная кривая – расчетные данные

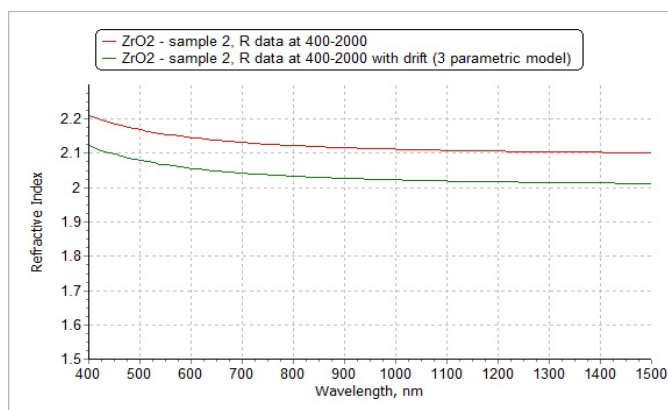


Рис. 2. Дисперсионные зависимости показателя преломления ZrO_2 : красная кривая – показатель преломления пленки с физической толщиной 368 нм, зеленая кривая – уточненный показатель преломления, найденный методом обратного проектирования тестового 14-слойного четвертьволнового зеркала

Методика широкополосного контроля обрабатывалась на установке размером 1100 мм. Для этого было собрано устройство фотометрического контроля (рис. 3). Моделирование контроля толщины пленок непосредственно на изделии проводилось следующим образом. На вращающийся подложкодержатель помещали образец из стекла марки К8 диаметром 40 мм. При помощи системы фотометрического контроля при каждом обороте подложкодержателя измерялся спектр пропускания, на длине 20 мм проводилось 4 измерения, что вполне достаточно для получения усредненного спектра пропускания, приемлемого для проведения контроля. При средней скорости роста пленки (3–5) ангстрем в секунду, за это время толщина покрытия увеличится на 0,1 ангстрема, что практически не скажется на спектральном коэффициенте пропускания.

Для проверки эффективности работы созданной системы фотометрического контроля были проведены тестовые напыления поляризаторов для длины волны 1054 нм. При этом материалом подложки было стекло К8, материалами слоев были оксид кремния SiO_2 и оксид циркония ZrO_2 с показателями преломления, найденными на основе тестовых напылений отдельных слоев и четвертьволновых зеркал. В качестве теоретической конструкции поляризатора использовалась многослойная система с 28 слоями, теоретические спектральные характеристики которой представлены на рис. 4.

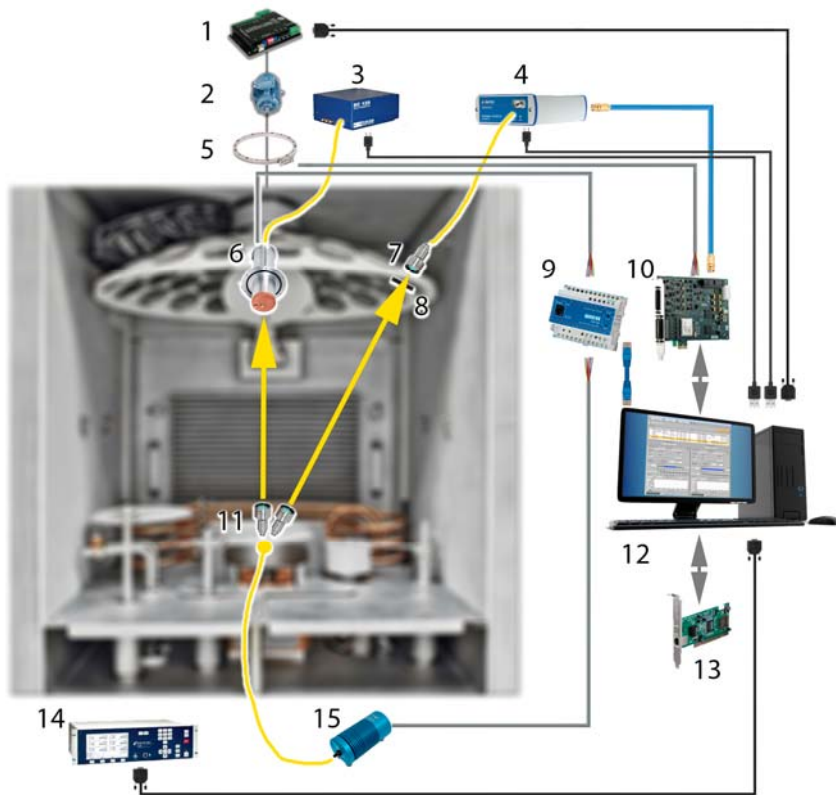


Рис. 3. Общая схема устройства фотометрического контроля

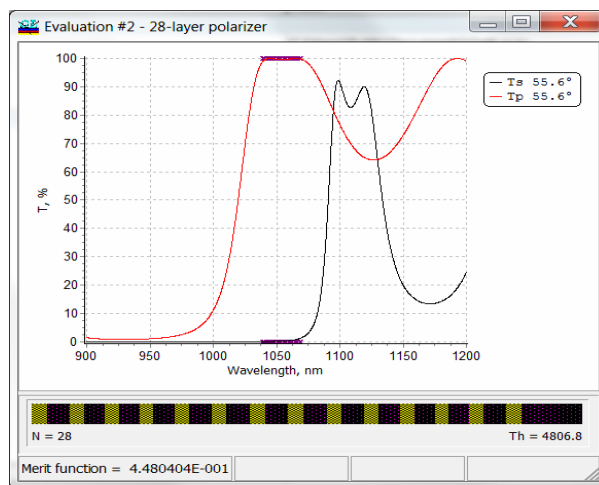


Рис. 4. Целевые значения (крестики) и теоретические спектральные коэффициенты пропускания поляризатора с 28 слоями для *S*- и *P*-поляризованного света при угле падения $55,6^\circ$

Для проведения исследований сначала была выбрана модель, учитывающая наличие случайных ошибок в толщинах всех слоев поляризатора, а также возможный дрейф показателей преломления материалов слоев покрытия. Затем – модель со случайными ошибками в толщинах всех слоев покрытия и при возможном дрейфе показателя преломления только первого от подложки слоя (рис. 5).

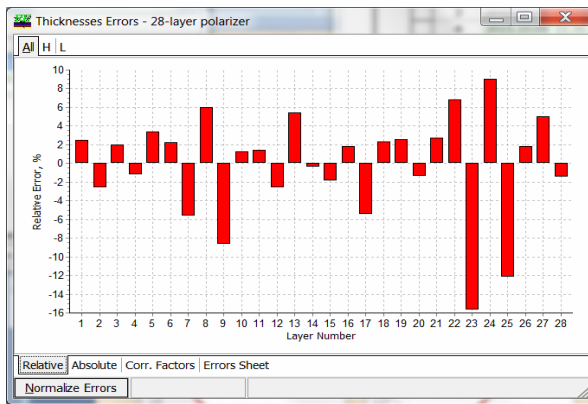


Рис. 5. Ошибки в толщинах слоев для поляризатора с 28 слоями; модель учитывает наличие случайных ошибок в толщинах всех слоев и возможный дрейфт показателя преломления первого от подложки слоя

С большой вероятностью большие ошибки в толщинах последних слоев связаны с кумулятивным эффектом накопления ошибок. В случае прямого оптического мониторинга малые ошибки, возникающие при напылении первых слоев покрытия, оказывают влияние на измеренные значения спектральных характеристик для последующих слоев. Таким образом создается кумулятивный эффект влияния ошибок в уже напылённых слоях на точность мониторинга напыляемого в текущий момент слоя [5].

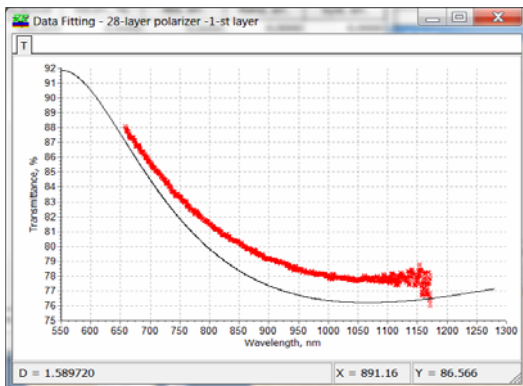
Следует отметить, что модель с одним дополнительным неизвестным параметром (дрейфт показателя преломления первого после подложки слоя ZrO_2) обеспечивает лучшее совпадение расчетных и фактических спектральных характеристик, чем модель с дрейфом показателей преломления материалов слоев. Данный факт указывает на то, что с большой вероятностью существуют ошибки в показателе преломления при напылении первого слоя покрытия.

Рассмотрим более детально соответствие экспериментальных данных и теоретической зависимости коэффициента пропускания для первого слоя поляризатора.

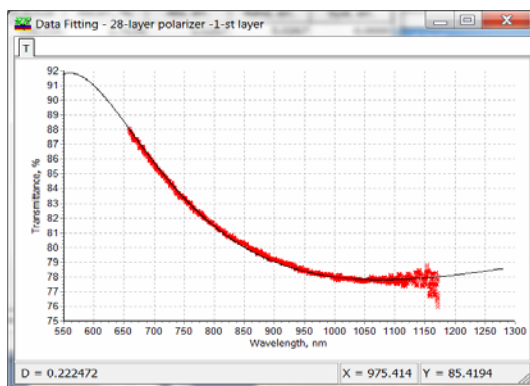
Имеющийся опыт по напылению покрытий позволяет предположить, что расхождение между экспериментальными и теоретическими данными может быть связано не с ошибками измерений, а с вариациями показателя преломления первого слоя покрытия. Для 28-слойного поляризатора была проведена процедура оптимизации с двумя неизвестными параметрами – возможной ошибкой в толщине и изменении показателя преломления первого слоя. Найденная при этом физическая толщина первого слоя поляризатора оказалась равной 133,57 нм, а найденная оптическая толщина – 269,88 нм. Результаты показаны на рис.6. После оптимизации были получены следующие значения параметров: изменение толщины 3,76 %, дрейфт показателя преломления 2,34 %.

Скорректированные значения параметров первого слоя были использованы для пересчета теоретических спектральных кривых коэффициента пропускания после нанесения первого слоя. В результате коррекции параметров первого слоя было получено заметно лучшее соответствие экспериментальных и теоретических кривых коэффициента пропускания на первых слоях. Однако для дальнейших слоев расхождение становится более заметным в силу эффекта накопления ошибок.

Более сложные модели покрытий, учитывающие дрейфт показателей преломления слоев, например, модель с линейным изменением показателей преломления в слоях циркония, дают аналогичные результаты и не оказывают существенного влияния на значение функционала невязки. Все это говорит о том, что учет смещения показателя преломления важен только для первого слоя. Дрейфт показателей преломления последующих слоев, если и имеет место, то является незначительным и не оказывает существенного влияния на процесс контроля толщин слоев покрытия.



а



б

Рис. 6. Экспериментальный и теоретически рассчитанный коэффициент пропускания 28-слойного поляризатора на первом слое, до (а) и после (б) проведения процедуры оптимизации с двумя неизвестными параметрами

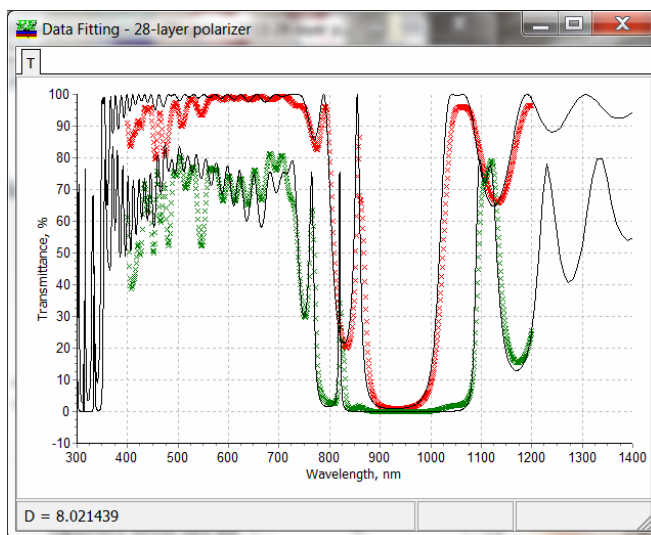


Рис. 7. Измеренные значения (крестики) и теоретические спектральные коэффициенты пропускания поляризатора для *S*- и *P*-поляризованного света при угле падения 56°

В ходе дальнейших исследований было проведено сравнение полученных данных с результатами измерений на спектрофотометре Perkin-Elmer Lambda 950. Полученные результаты представлены на рис. 7. На рисунке показано соответствие теоретического (черные кривые) и экспериментально полученного (крестики) коэффициента пропускания для теоретической конструкции покрытия и для покрытия со скорректированными параметрами первого слоя. Для данной модели было получено существенно лучшее соответствие экспериментальной и теоретической зависимостей, что является дополнительным свидетельством правильности полученных выше результатов.

Таким образом существует общая проблема, которую можно назвать «проблемой первого слоя». В силу ряда технологических факторов параметры первого слоя могут заметно отличаться от заданных значений. Если это происходит, то точность контроля толщин слоев заметно ухудшается. Для преодоления этого эффекта необходимо корректировать параметры первого слоя на основе данных измерений, полученных в конце его напыления. Соответствующие алгоритмы разрабатываются.

Разработанная система фотометрического контроля была проверена на серии тестовых напылений и доказала свою эффективность. Прямой широкополосный оптический контроль на изделиях позволяет напылять сложные покрытия с высокой точностью воспроизведения требуемых спек-

тральных характеристик покрытия. В ходе работы был выявлен ряд факторов, влияющих на точность контроля процесса напыления (например, проблема первого слоя), и в систему контроля были введены функции, позволяющие уменьшить влияние этих факторов и повысить точность контроля процесса напыления.

Система фотометрического контроля и ее программное обеспечение разработаны таким образом, что позволят в дальнейшем включать новые подходы к контролю процессов напыления, не запланированные в рамках настоящей работы. Предусмотрена возможность использования в системе и других алгоритмов поддержки контроля напыления, которые будут появляться в дальнейшем в силу широкого международного внимания исследователей к тематике широкополосного оптического мониторинга.

В качестве возможного дальнейшего развития работ в области высокоточного контроля процессов напыления целесообразно обратить внимание на развитие систем контроля, объединяющих преимущества широкополосного оптического контроля и монохроматического контроля на заданной последовательности длин волн контролирующего излучения. В разработанной системе предусмотрены возможности такого развития.

Другим направлением развития работ может являться развитие системы в плане одновременного использования прямого оптического мониторинга и косвенного контроля по тест-слайдам. На этом пути предстоит решить ряд серьезных задач, в частности, задач создания новых алгоритмов расчета параметров слоев напыленных покрытий в режиме онлайн.

Список литературы

1. Свечников М. Б. Лучевая прочность диэлектрических покрытий в диапазоне длин волн 0,25–1,06 мкм. // ГОИ им. С. И. Вавилова, 1992. С. 214.
2. Технология тонких пленок (справочник). Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Нью-Йорк. 1970. Пер. с англ. Под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. Т. 1: М., «Сов. радио», 1977. С. 664.
3. Тихонравов А. В. и Трубецков М. К. Стабилизация вычислительных алгоритмов для расчета оптических свойств тонких пленок // Численные методы и программирование, 2005. Т. 6. С. 96–104.
4. Тихонравов А. В., Трубецков М. К., Амочкина Т. В. Исследование эффекта самокомпенсации ошибок в методе широкополосного оптического контроля. Прикладная оптика, том 50, № 9, с. С111-С112.
5. Маклеод А. Контроль оптических покрытий // Прикладная оптика, 1989. Т. 20, с. 82–89,