

Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий

*О.Ф. ПРОСОВСКИЙ¹, А.Ю. БУДНЕВ¹, **Д.Г. ДЕНИСОВ²,
Н.В. БАРЫШНИКОВ², Ю.О. ПРОСОВСКИЙ²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Калужская обл.

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», Москва

E-mail: *pof@mail.ru, **denisov_dg@mail.ru

Аннотация

Проанализированы схемотехнические решения построения систем прямого и косвенного контроля создаваемых светофильтров и предложено принципиально новое решение системы контроля, обеспечивающее высокие эксплуатационные характеристики этих изделий. Предложен оригинальный подход к созданию и реализации современной широкополосной системы по методу прямого оптического контроля толщины наносимых оптических покрытий. Проведена апробация разработанной системы контроля, результатами которой (выходными характеристиками) являются спектральные зависимости коэффициента пропускания. Проведён анализ таких зависимостей для интерференционных светофильтров, полученных с использованием разных систем оптического контроля. Сделаны прогнозы по дальнейшей модернизации системы прямого широкополосного оптического контроля толщины напыляемых покрытий.

Ключевые слова: интерференционные светофильтры, оптический прямой широкополосный контроль, толщина покрытий, вакуумная установка, спектр, спектральная зависимость коэффициента пропускания (отражения).

Предисловие

Сегодня трудно найти изделия конструкционной и приборной оптики, изготавливаемые без тех или иных покрытий на их поверхности. Так, например, прочно вошли в жизнь покрытия, модифицирующие поверхность изделий для их большей устойчивости к влиянию внешних факторов (истиранию, воздействию агрессивных веществ), улучшения оптических

свойств (просветление) и придания принципиально новых оптических свойств (поляризация и фильтрация излучения и др.).

При этом один из самых ответственных элементов напылительного оборудования – система контроля толщины наносимых плёнок, определяющая (в основном) технологические возможности напылительного оборудования при нанесении многослойных интерференционных структур. Кроме того, напрямую с качеством и воспроизводимостью процесса формирования многослойных оптических покрытий связан контроль оптических констант [1].

Современные методы контроля толщины оптических покрытий

Современное напылительное оборудование базируется на методах прямого и косвенного контроля, вследствие чего точность измерения толщины плёнок наносимых оптических покрытий не всегда удовлетворяет требованиям заказчика. В настоящее время оптические системы контроля можно разделить на 2 основных типа [2]:

1. Системы косвенного оптического контроля, использующие образцы-спутники (свидетели) для измерения спектрального коэффициента пропускания (отражения) наносимого по-

крытия (обычно располагаемые в центре подложкодержателя).

2. Системы прямого оптического контроля, в которых измерение спектрального коэффициента пропускания (отражения) производится непосредственно на изделии, закреплённом на вращающемся подложкодержателе.

Наиболее полную информацию о конструкции наносимой плёнки может обеспечивать только система прямого широкополосного оптического контроля [3]. Она анализирует информацию о спектральной зависимости коэффициента пропускания (СЗКП) покрытия в заданном диапазоне длин волн, позволяет определять дисперсию оптических констант (показателей преломления и поглощения) и толщину напыляемых плёнок непосредственно во время формирования покрытия на изделии в вакууме. Как правило, современное оборудование комплектуется ионными источниками ассистирования процесса напыления, что, в свою очередь, обеспечивает неизменность оптических констант при извлечении изделия с покрытием на воздух из вакуумной камеры. Данный факт показывает неоспоримое преимущество современного напылительного оборудования.

Функционирование рассматриваемой современной широкополосной системы прямого оптического контроля подразумевает проведение трёх циклов измерения на каждом обороте подложкодержателя, что обусловлено необходимостью получения высокоточных измерений [4]. На рис. 1 показан подложкодержатель, на котором выделено 3 области, имеющие отношения к системе прямого оптического контроля:

– Область 1 – изделие, по которому производится измерение СЗКП напыляемого покрытия.

– Область 2 – участок подложкодержателя, не пропускающий излуче-

Рис. 1. Пример действующей широкополосной системы оптического контроля



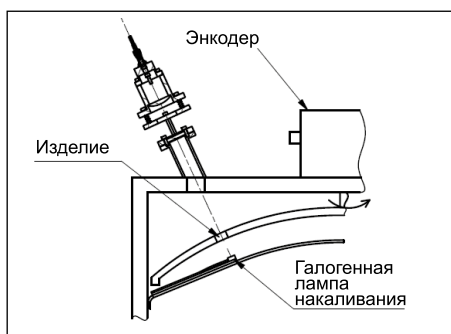


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой системы прямого широкополосного оптического контроля толщины напыляемых покрытий

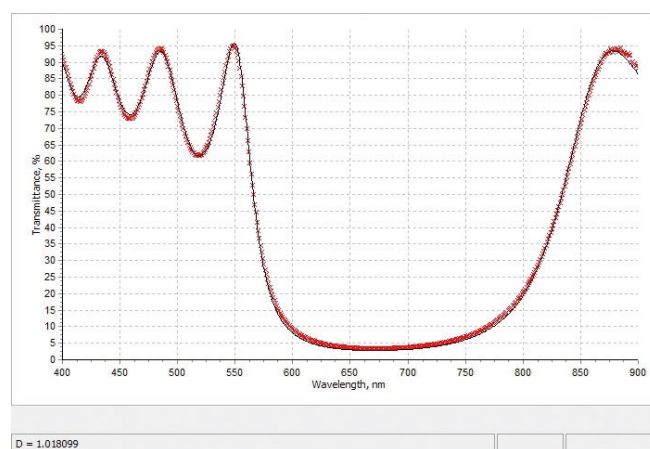


Рис. 3. Пример расчётной и экспериментальной СЗКП многослойного оптического покрытия

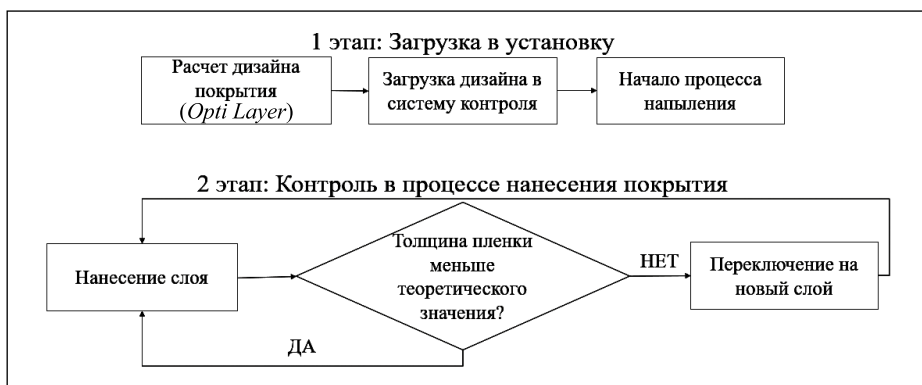


Рис. 4. Процесс контроля толщины напыляемого покрытия

– Широкий спектральный диапазон измерений: 400–1100 нм.

– Применение математического аппарата для обработки информации о СЗКП наносимых покрытий в широком спектральном диапазоне, который позволяет проводить реанализ конструкции напыляемого покрытия и в ходе технологического процесса нанесения оставшимися ненапылёнными слоями покрытия нивелировать ошибки, возникшие при напылении предыдущих слоёв.

– Обеспечение практически полного совпадения получаемых расчётных и экспериментальных СЗКП.

На основе предложенного метода, авторами проведена апробация разработанной ими системы контроля, результатом которой явились её выходные характеристики – СЗКП. На рис. 3 приведены графики СЗКП, характеризующие точность системы контроля, посредством которой производилось измерение толщины напыляемых плёнок при изготовлении 9-слойного интерференционного покрытия. Как видно из рисунка, СЗКП изготовленного светофильтра (красная кривая) практически полностью совпадает с СЗКП, рассчитанной с помощью программы «OptiLayer»¹ (чёрная кривая).

В ходе производства контроль толщины оптического покрытия выполняется оператором на основе анализа расчётной СЗКП, вычисляемой посредством указанной программы для каждого слоя покрытия.

В процессе напыления СЗКП, которая измеряется на изделии долж-

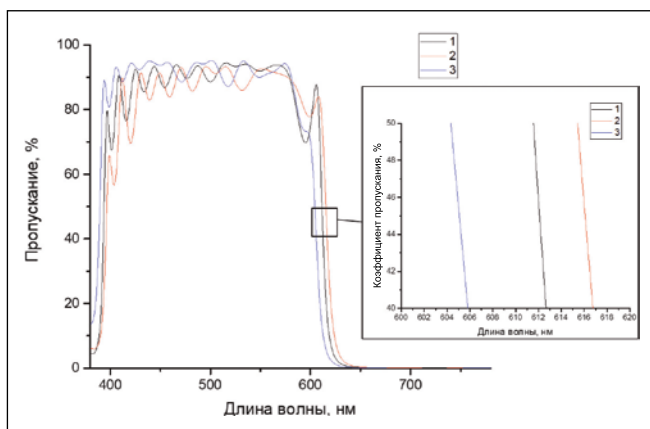


Рис. 5. СЗКП отрезающего светофильтра, полученного в ходе трёх технологических процессов с использованием системы контроля с оптическим свидетелем в центре камеры

ние (0 %-ное пропускание), для измерения темнового тока.

– Область 3 – отверстие (100 %-ное пропускание), в котором производится измерение коэффициента пропускания.

Особенности предлагаемого современного метода системы прямого широкополосного оптического контроля толщин слоёв следующие.

– Измерение коэффициента пропускания выполняется прямо на изделии, закреплённом на вращающемся подложкодержателе.

– Для обеспечения высокой точности измерения применяется цифровой

энкодер (рис. 2), что позволяет производить измерения практически в одной и той же физической точке изделия.

– Измерение на каждом обороте подложкодержателя выполняется в 2 основных этапа: калибровка и измерение. Калибровка состоит в измерении пропускания в 0 и 100 % (области 2 и 3 на рис. 1), после чего производится измерение на самом изделии (область 1 на рис. 1).

¹ «OptiLayer» – программный продукт, предназначенный для моделирования, оптимизации и расчёта оптических покрытий и их характеристик. Область применения – тонкоплёночные покрытия. Он позволяет пересчёт параметров слоёв покрытия для нивелирования ошибок уже нанесённых слоёв [5].

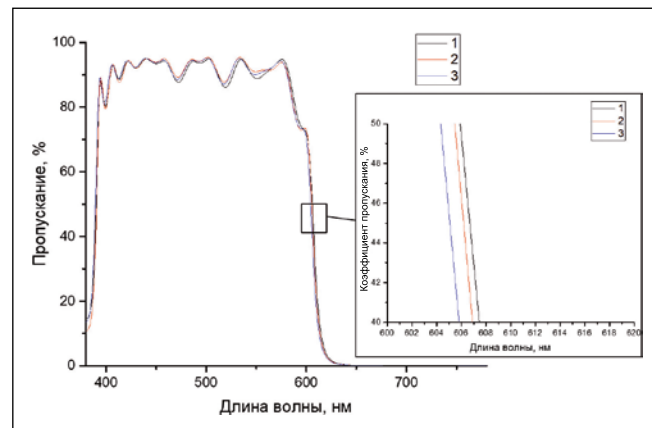
на совпасть с расчётной (теоретической) СЗКП, которая задана у оператора. В случае наложения двух графиков СЗКП, оператор останавливает напыление текущего слоя и запускает напыление следующего. На рис. 4 приведён комплексный алгоритм действия разрабатываемой системы контроля толщины наносимых покрытий и системы автоматизированного проектирования «*OptiLayer*» в виде блок-диаграммы.

Сравнение точностных характеристик разработанной системы прямого контроля и системы косвенного контроля толщины оптических покрытий

На рис. 5 приведены спектральные характеристики светофильтров, полученных в 3-х разных процессах при использовании системы косвенного контроля с оптическим свидетелем в центре. На вставке на этом рисунке более детально показан разброс параметров $\lambda_{0,5}$ в спектральном диапазоне 605–620 нм, равный 14 нм. Такой разброс на практике приводит к тому, что часть изготовленных деталей оказывается бракованной. Более детальный анализ хода кривых на вставке с помощью программы «*OptiRe*»² показывает значения случайных отклонений толщин слоёв при воспроизводстве оптической конструкции в 3–5 %. Разный ход кривых в каждом из процессов свидетельствует о присутствии несистематической погрешности, что существенно осложняет автоматизацию процесса нанесения и контроля покрытия технологом.

Причиной возникновения столь больших ошибок воспроизводства толщин слоёв, скорее всего, является изменение телесного угла потока паров испаряемого вещества из тигля, ввиду изменения формы кратера вещества в тигле в ходе длительного технологического процесса, который занимает 4–5 ч. В результате этого на свидетеля и изделие наносятся плёнки, отличающиеся друг от друга по толщине. Данные погрешности носят несистематический характер, зависят от многих факторов и в боль-

Рис. 6. СЗКП отрезающего светофильтра, полученного в ходе трёх технологических процессов с использованием прямого оптического контроля



шинстве случаев крайне сложно прогнозируемы.

С целью минимизации погрешностей системы косвенного контроля была разработана и экспериментально исследована система прямого широкополосного оптического контроля, конструктивные элементы которой схематично показаны на рис. 2, а результаты экспериментальных исследований – на рис. 6, где показаны графики СЗКП светофильтров, полученных в ходе трёх разных технологических процессов с использованием прямого оптического контроля толщины наносимых покрытий.

Вставка на рис. 6 более детально показывает разброс параметра $\lambda_{0,5}$ – он составляет всего лишь 3 нм. При этом анализ хода кривых на этой вставке позволяет утверждать, что в ходе нанесения слоёв оптической конструкции благодаря использованию прямого оптического контроля в серии из трёх процессов соблюдается высокая точность воспроизводства отдельных слоёв от процесса к процессу. Анализ полученных результатов с помощью программно-вычислительного модуля «*OptiRe*» показывает наличие отклонений реально нанесённых слоёв от расчётных менее 0,5 %.

Обсуждение полученных результатов

На сегодня рассмотренная выше система прямого широкополосного оптического контроля находится в состоянии тестирования в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Планируется внедрение в неё программного модуля «*OptiReopt*» (входит в программный продукт «*OptiLayer*»), служащего библиотекой для поддержки контроля напыления оптических покрытий.

Так как в процессе напыления всё равно накапливаются погрешности (определяемые временем закрытия заслонки, неидеальностью условий работы и т.д.), то при нанесении большого (≥ 30) числа слоёв эти погрешности оказываются существенными, что может приводить к неудовлетворительности качества изделия. При этом планируется реализовать полностью автоматический процесс напыления, исключающий человеческий фактор.

Итак, в результате проведённых исследований:

- разработана перспективная система оптического контроля – система прямого широкополосного оптического контроля. Она продемонстрировала в производственных условиях высокую воспроизводимость толщин слоёв интерференционных покрытий;
- осуществлена практическая реализация системы широкополосного прямого оптического контроля на установке электронно-лучевого испарения;
- произведено внедрение системы прямого широкополосного оптического контроля в технологический процесс производства интерференционных светофильтров для нужд приборной оптики (отрезающие, узкополосные и др. виды светофильтров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lequime M., Nadj S., Stojcevski D., Koc C., Grèzes-Besset C., Lumeau J. Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. C181–C187.

² Программно-вычислительный модуль «*OptiRe*» направлен на определение параметров слоёв напылённых оптических покрытий на основе данных спектральной фотометрии и (или) эллипсометрии. Результаты, получаемые с помощью «*OptiRe*», обеспечивают обратную связь с процессом напыления. С помощью этих результатов можно вносить коррективы в параметры процесса напыления или в процесс контроля слоёв и повышать тем самым качество напыляемых покрытий. Входит в программный продукт «*OptiLayer*».

2. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. Справочник технолога-оптика. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

3. Nadjji S.L., Lequime M., Begou T., Koc C., Grézes-Besset C., Lumeau J. Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer // Appl. Opt. – 2018. – Vol. 57. – P. 877–883.

4. Zhupanov V.G., Kozlov I.V., Fedoseev V.N., Kononov P., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V. Production of Brewster angle thin film polarizers using a ZrO₂/SiO₂ pair of materials // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. C30–C34.

5. URL: <https://www.optilayer.com/> (дата обращения: 20.01.2020).



Просовский Олег Фёдорович, инженер. Начальник лаборатории оптических покрытий АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»



Буднев Александр Юрьевич, инженер. Инженер-технолог 3-й категории лаборатории оптических покрытий АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»



Денисов Дмитрий Геннадьевич, инженер. Доцент кафедры РЛ-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»



Барышников Николай Васильевич, инженер. Доцент кафедры РЛ-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»



Просовский Юрий Олегович, студент 1 курса магистратуры ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»

Готовится к выходу книга «Утилитарное наружное освещение»

В настоящее время готовится к выходу в свет книга А.А. Коробко «Утилитарное наружное освещение», посвящённая вопросам освещения транспортно-пешеходной сети дорог в городских и сельских населённых пунктах, а также автомобильных дорог общего пользования, расположенных вне населённых пунктов.

Книга состоит из четырёх глав. В первой главе дано развёрнутое определение понятию «Утилитарное наружное освещение» (УНО); показана взаимосвязь стационарного искусственного освещения с безопасностью дорожного движения; освещены различные аспекты видимости в условиях сумеречного зрения, характерного для УНО; определены основные показатели, регламентирующие дорожное освещение. Вторая глава посвящена основной области применения УНО – освещению дорог и улиц. Подробно освещены вопросы классификации освещаемых объектов (транспортных и пешеходных зон) и нормативные требования к освещению. Достаточно полно изложены такие разделы как методология расчёта дорожного освещения, техника и средства освещения объектов УНО. В третью главу вынесены вопросы освещения автодорожных тоннелей. Это связано со специфика-

ческими особенностями данного вида освещения, главная из которых обусловлена необходимостью учёта переадаптации зрения водителя при въезде в тоннель в дневное время. В заключительной главе излагаются вопросы контроля и измерения параметров дорожного освещения на основе как традиционных (стационарных), так и новых (мобильных) методов измерения.

Важно отметить, что весь материал изложен в соответствии с современными требованиями к УНО, регламентируемыми соответствующими национальными стандартами и базирующимися на международных нормативно-технических документах и мировой практике.

Автор монографии является ведущим специалистом в области нормирования и расчёта установок дорожного освещения. Принимал непосредственное участие в разработке действующей национальной нормативной базы в области УНО, а также в написании разделов по дорожному и тоннельному освещению в третьем и четвёртом изданиях Справочной книги по светотехнике. Является основным разработчиком российской компьютерной программы *Light-in-Night* для проектирования дорожного освещения, представляет Россию в Международной комиссии по освещению (МКО), являясь членом отделения 4, деятельность которого охватывает вопросы наружного освещения.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся вопросами проектирования, монтажа и эксплуатации установок дорожного освещения, а также будет полезна студентам технических вузов, обучающимся по специальностям, связанным с дорожным освещением.

Заказать книгу можно в Редакции журнала «Светотехника», направив заявку на адрес электронной почты bulgakova@l-e-journal.com. Заявки на издание принимаются до 30 сентября 2020 года. Выпуск книги запланирован на IV квартал текущего года, её ориентировочная цена не превысит 700 рублей.

А.А. КОРОБКО

УТИЛИТАРНОЕ НАРУЖНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Москва
Редакция журнала «Светотехника»
2020