



## ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И НАНЕСЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. С. Кабанов, Бюлер Leybold Optics, <http://ВакуумноеНапыление.рф>, Троицк, Москва

11–12 октября в Троицком наноцентре "Технопарк" прошел международный технологический семинар "Современные подходы к производству точной оптики, прогрессивные методы расчета и нанесения сложных покрытий". Организаторами семинара выступили компания "ОптиСпарк" – резидент "Технопарка" – и швейцарская компания Bühler AG.

При помощи оборудования Бюлер Leybold Optics – установки электронно-лучевого испарения SYRUSpro710 – в "ОптиСпарке" по заказам российских компаний производят уникальные оптические покрытия для зеркал различного назначения, лазерной оптики, оптических фильтров для широкого круга применений. Вакуумная напылительная установка SYRUSpro710 эксплуатировалась здесь с начала 2016 года. Но настоящего технологического скачка предприятию удалось добиться только в конце 2017 года – после модернизации напылительной установки системой прямого оптического контроля по сменному пролетающему свидетелю.

Встречаться в стенах Троицкого Наноцентра становится доброй традицией: первое подобное мероприятие состоялось в Технопарке в октябре 2016 года и носило статус официального открытия Шоу-Рума Бюлер – полноценной производственной площадки, где потенциальные заказчики Бюлера получили возможность на практикезнакомиться с напылительным оборудованием.

Семинар 2018 года был в основном посвящен технологиям оптимизации покрытий, причем не во время напыления, когда уже обычно поздно что-либо регулировать, а на этапе проектирования. На мероприятии собралось больше семи десятков представителей предприятий из России и Бела-

руси. В первый день семинара прозвучали сообщения представителей фирм-организаторов, а также лекция специального гостя – профессора НИВЦ МГУ Александра Тихонравова – разработчика программно-вычислительного комплекса OptiLayer, которым пользуются на подавляющем большинстве оптических предприятий России. Второй день прошел в режиме открытого диалога участников. Обсуждались результаты работы вакуумной напылительной установки, которая в ночь с 11 на 12 октября в автоматическом режиме наносила покрытие узкополосного режекторного фильтра. На рисунке представлена его оптическая характеристика. Розовая кривая показывает пропускание излучения, приходящего на фильтр по нормали, а синяя – под углом 45 градусов. Практическое значение этого фильтра не столь показательно, как его исполнение: из 98 слоев покрытия, процесс нанесения которого занял 11 часов, половина имеет толщину менее 6 нм. Визуальный эффект выглядит тоже интересно: фильтр работает как затвор, пропуская излучение зеленой лазерной указки на всех углах кроме того, при котором оно попадает в диапазон блокировки около 530 нм.

11 октября, в первый день семинара, представитель российского отделения компании Бюлер Leybold Optics Алексей Кабанов кратко представил концерн Бюлер, в состав которого с 2012 года входит

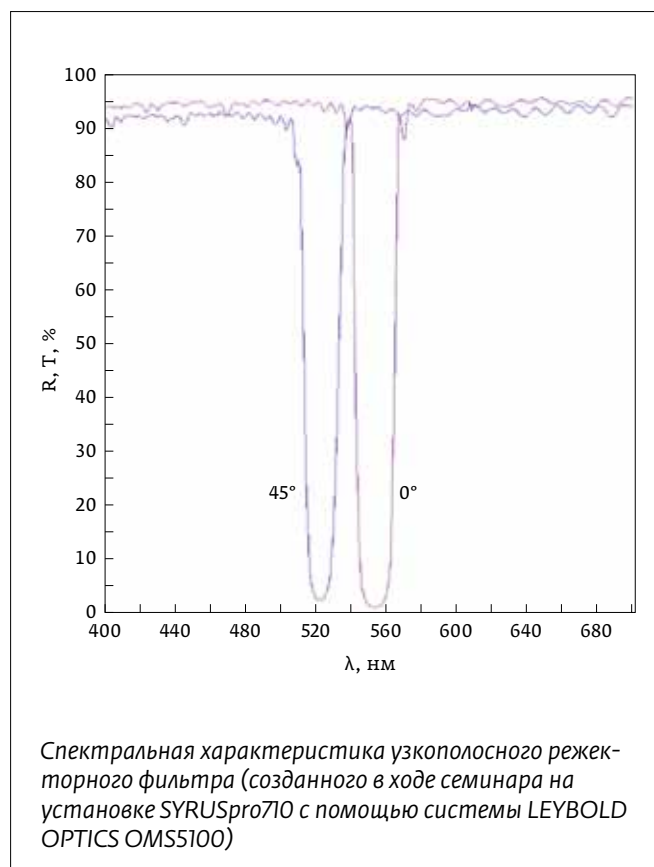




немецкая фирма Leybold Optics – разработчик технологий и оборудования вакуумного нанесения функциональных покрытий. В Бюлере, который более полутора веков занимается технологиями и оборудованием для переработки продуктов питания "от поля до стола" и прогрессивными материалами, Leybold Optics нашлось достойное место в отделе Advanced Materials. Предприятия этого отдела занимают лидирующие позиции во многих отраслях промышленности: так около половины всех автомобильных компонентов, что производятся по технологии литья под давлением, выпускается на оборудовании Бюлер. Более 60% красок для офсетной печати и примерно 75% объема металлосодержащих паст для солнечных батарей производится на мельницах Бюлер. До 60% мирового рынка систем напыления архитектурного стекла, дисплеев и других поверхностей большой площади выпускается Leybold Optics – то есть опять же Бюлером.

Продукция Leybold Optics применяется в 6 отраслях, где используется вакуумная техника. Это очковая и прецизионная оптика, производство автомобильных фар и фонарей, гибкая упаковка для продуктов питания и электроника, стекло большого размера. Ноу-хау, созданные в компании, а затем внедренные в машины для высоковакуумного нанесения тонких пленок, задают мировые стандарты производства и качества уникальных оптических покрытий.

Говоря о прецизионной оптике, стоит отметить, что оборудование Бюлер Leybold Optics является не просто системами вакуумного напыления, но надежным автоматическим инструментом для выполнения технологических задач производства любого уровня. В портфолио фирмы есть вакуумные напылительные установки всех традиционных типов: электронно-лучевого (семейство SYRUSpro с диаметром вакуумных камер от 700 до 2800 мм), магнетронного (HELIOS с технологией PARMS – магнетронное распыление с ионно-плазменным асситированием, которые способны нано-



Спектральная характеристика узкополосного режекторного фильтра (созданного в ходе семинара на установке SYRUSpro710 с помощью системы LEYBOLD OPTICS OMS5100)

сить сложные покрытия, состоящие из сотен слоев), ионно-лучевого (IBS, которые используются для производства зеркал с коэффициентом отражения до 99,997% и распределением толщины покрытия в пределах 0,4% по подложкам диаметром больше полуметра).

Благодаря ответственной инвестиционной политике Бюлер (5% прибыли компания вкладывает в НИОКР) за прошедшие годы отдел Leybold Optics вывел на рынок несколько новых позиций оборудования. Среди них установки ионно-лучевого напыления (IBS) и ионно-лучевого травления (IBF), о которых участникам семинара рассказали представители соответствующих подразделений.





Вакуумные установки ионно-лучевого травления (профилирования) или полировки (по-английски "Ion Beam Figuring" – IBF) для обработки деталей диаметром до 1200 мм были представлены Кристианом Кеттманном – специалистом Лейпцигского подразделения Бюлер. В основе этих систем ионный источник, оснащенный 6-координатной системой позиционирования, который потоком генерируемых частиц снимает материал с вершин неровностей подложек, улучшая таким образом качество обрабатываемых поверхностей на 1...2 порядка. Зачастую на оптических производствах системы IBF располагаются в непосредственной близости с установками IBS, а подложки передаются из одной системы в другую при помощи роботов.

Ионно-лучевым установкам был посвящен доклад Юргена Кришера – специалиста из штаб-квартиры в Альценау. Системы IBS присутствовали в модельном ряду Leybold еще в 80-х годах, но за невостребованностью метода в те далекие годы ушли в небытие. К воссозданию системы ионно-лучевого напыления на современном технологическом уровне фирма вернулась в 2013 году. В 2016 были созданы пилотные образцы оборудования, а в начале 2018 года две первые серийные машины были отгружены заказчиком.

В основе конструкции ионно-лучевых установок вакуумная камера с двумя дверями: одна смотрит в чистое помещение, через нее загружаются подложки. Другая – что смотрит в "серую зону" – предназначена для технологического обслуживания. Системы комплектуются безмасляной откачкой, подложки располагаются в них горизонтально, система оптического контроля работает по пролетающим свидетелям. Напыление происходит снизу-вверх с одной из трех сменных металлических или диэлектрических мишеней. Мишени смонтированы на сборке, которую можно перемещать в двух направлениях по горизонтали. Это позволяет оптимизировать профиль износа мишеней,

добиваясь высочайшего коэффициента использования – до 55%. Во время процесса распыления мишени вращаются вокруг своей оси, обеспечивая равномерную доставку снимаемого с них материала к подложкам. Для получения более плотных и однородных слоев с низкими напряжениями система оборудована дополнительным ионным источником-ассистентом.

Типичным негативным фактором при нанесении покрытий является их загрязнение посторонними материалами. Результаты спектральных испытаний показали, что на 1000 000 частиц в покрытиях встречается менее 5 частиц Mo, K, Fe, и Cu, что является превосходным результатом. Машина позволяет наносить покрытия ионно-лучевым методом с воспроизводимостью результатов до 0,05%.

Вакуумные установки ионно-лучевого напыления предлагаются в двух типоразмерах: с вакуумной камерой диаметром 1400 или 1600 мм. Доступны два исполнения держателей подложек: планетарное и прецизионное. В последнем держатель всего один, его диаметр 600 мм, и он может перемещаться под потолком камеры по сложной траектории. Такая конструкция позволяет задавать специальный сценарий движения подложки относительно мишени и добиваться нужного профиля толщины покрытий без использования масок. Стандартно установки IBS комплектуются системой прямого одноволнового оптического контроля OMS5100, широкополосный контроль предлагается опционально. Использование держателей подложек различных конструкций делает систему универсальным инструментом для производства деталей лазерной оптики.

Будучи одним из самых прогрессивных методов нанесения вакуумных покрытий, IBS является отличным инструментом для демонстрации возможностей системы оптического контроля OMS5100. Этим уникальным программно-аппаратным комплексом оснащено большинство установок напыления Бюлер, т.к. он явля-





ется ключом к созданию сложных покрытий. Это не просто система, которая управляет процессом нанесения покрытий. OMS используется при проектировании, оптимизации, обработке и нанесении покрытий, работает в тесной связке с вакуумными установками. Ее использование выводит эксплуатацию напылительного оборудования на совершенно новый уровень. И этому была посвящена практическая часть семинара.

Функционирование системы OMS во время работы вакуумной установки – это вершина айсберга: в процессе напыления OMS, отслеживая программный код покрытия, управляет исполнительными механизмами системы так, чтобы слои отключались в строго определенные моменты. Основная работа по подготовке рецепта к загрузке в вакуумную установку осуществляется в вычислительном эксперименте, при помощи симулятора работы той же OMS. Как же это происходит?

Современная парадигма решения задач проектирования покрытий состоит в выборе структуры, которая имеет наилучшую с практической точки зрения, реализацию, то есть в которой можно безошибочно определить необходимый момент отключения слоев и управлять им. В зависимости от структуры покрытия бывает так, что оптимальный момент отключения слоев контролируется на различных длинах волн. Подобрать оптимальную для каждого слоя контрольную длину волны – сложная и ресурсозатратная задача. Решить ее помогает симулятор, основанный на программном обеспечении OMS. Он моделирует работу вакуумной установки, т.е. учитывает скорости осаждения, индексы преломления испаряемых материалов, задержки закрытия заслонок источников, систематические и статистические ошибки техпроцесса, генерирует шумы сигнала, выставляет реальную полосу пропускания монохроматора и т.п. Симулятор моделирует нанесение покрытий в вычислительном эксперименте. По окончании процедуры он составляет подробный отчет: строит спектральные кривые, показывает ошибки толщин слоев. На основании получаемых данных разработчик покрытия вносит необходимые корректировки во входные данные и запускает процесс моделирования заново. Процедура повторяется до тех пор, пока результаты отчетов симулятора не удовлетворят технолога. После этого техпроцесс загружается в вакуумную установку, и результат напыления такого покрытия в точности совпадает с результатами работы симулятора. Моделирование процесса нанесения оптических покрытий позволяет избегать многочисленных высокотратных экспериментов. Детальному

описанию этого вопроса несколько часов на семинаре посвятил главный технолог Бюлер Leybold Optics Детлеф Архильгер.

Многие годы в направлении расчета дизайна оптических покрытий Leybold Optics сотрудничает с профессором МГУ им. М.В. Ломоносова, директором Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ (НИВЦ МГУ) Александром Владимировичем Тихонравовым. В рамках своего выступления "Теория расчета дизайна многослойного покрытия. Программный комплекс OptiLayer" профессор Тихонравов отметил, что интерес к разработке сложных оптических покрытий растет во всем мире как со стороны научного, так и рыночного секторов экономики. Покрытия необходимы для создания вихревых световых пучков, когда бывает нужно понимать распределение электрического поля внутри покрытия. При производстве смартфонов с коммерческой точки зрения оказалось важным придать экранам голубой цвет, который влияет на предпочтения покупателей.

Александр Владимирович рассказал, что разработка программного комплекса для напыления покрытий в лаборатории вычислительного эксперимента и моделирования НИВЦ МГУ идет в тесном контакте с Leybold Optics уже почти 25 лет. Наивысших достижений можно добиться не только за счет блестящих инженерных решений, но и за счет постоянного совершенствования системы контроля. Программный комплекс OptiLayer представляет собой прекрасный инструмент для расчета дизайна многослойных оптических покрытий с заданными спектральными характеристиками, а также для анализа полученных результатов и расчета показателей преломления материалов.

Расчет дизайна оптического покрытия – это уже не сложная проблема, если у вас есть программа. Допустим, перед вами стоит задача изготовить "горячее зеркало" – фильтр, отражающий тепловое излучение в диапазоне 700–1200 нм и пропускающий излучение в видимом диапазоне 400–700 нм, причем пропускание должно быть 100%. Программе задается спектральная характеристика фильтра, которую надо получить, и она синтезирует конструкцию покрытия, состоящего, например, из 78 слоев известной толщины, которое с высоким приближением соответствует целевой спектральной характеристике. Но расчет дизайна покрытия – это только половина дела, т.к. нужно еще воспроизвести эту слоистую структуру с высокой точностью, то есть проконтролировать толщину каждого слоя во время его напыления.



Оптические стратегии мониторинга – это контроль оптической толщины ( $n \times l$ ). Любой метод оптического контроля коррелирует ошибки предшествующего слоя. Метод игольчатых вариаций, который используется программой Ortilayer при расчете дизайна покрытия, позволяет собрать дизайн конструкции из слоев, толщина которых не кратна четвертьволновому числу.

С точки зрения докладчика, современная парадигма решения задач проектирования состоит в том, что надо выбирать дизайн покрытия, в котором оптимально сочетаются наилучшие эксплуатационные свойства материала и возможности контроля процесса, и именно на этом пути ожидается мощный шаг вперед. Свое выступление профессор Тихонравов закончил размышлениями о развитии физики тонких пленок, отметив, что пока мы находимся на этапе примитивных представлений о структуре аморфных пленок, – и привел тому аргумент. От многих экспериментаторов известен такой факт, что при добавлении в материал гафния ( $\text{Hf}$ ) до 10%  $\text{SiO}_2$  ( $n_{\text{SiO}_2} < n_{\text{Hf}}$ ) показатель преломления слоя из такого гафния не уменьшается, а наоборот, возрастет. Этот экспериментальный результат противоречит устоявшимся теоретическим представлениям. Его важно учитывать при производстве покрытий для приборов, действие которых направлено на регистрацию тонких явлений, например на обнаружение гравитационных эффектов, или предназначено для работы лазерных гироскопов.

Программа Ortilayer учитывает ограничения, накладываемые на контроль толщин, не кратных четвертьволновым величинам. ПО Ortilayer предлагает пользователю еще и удобный инструмент для оптимизации стратегии мониторинга рассчитанного покрытия, которая тесно интегрирована с LEYBOLD OPTICS OMS5100. Расчет страте-

гии контроля можно вести как по отражению, так и по пропусканию образцов-свидетелей. При необходимости, контроль можно вести по нескольким свидетелям: на одном свидетеле контролируется толщина первых наносимых слоев покрытия, далее происходит переход на другой свидетель для контроля толщины следующих слоев, что предотвращает развитие коммулятивного эффекта от ошибок. Кроме этого, можно использовать широкополосный оптический контроль.

Данная технология контроля оптических покрытий является самой передовой в мире и уже давно используется в массовом производстве. Нивысших достижений она добивается не только за счет блестящих инженерных решений, но и благодаря постоянному совершенствованию системы контроля. С ее помощью создаются покрытия с высокой воспроизводимостью свойств и гарантией соответствия спектральных характеристик их расчетным значениям.

Практическим обсуждением результатов работы установки SYRUSpro710 и системы LEYBOLD OPTICS OMS5100 был целиком посвящен второй день семинара. Гости в режиме открытого диалога с генеральным директором ООО "ОптиСпарк" Владимиром Пономаревым разобрали результаты напыления крайне сложного NOTCH-светофильтра и получили ответы на многочисленные вопросы по практическим тонкостям работы с напылительной установкой, стратегиями мониторинга и технологическим возможностям компании "ОптиСпарк", как контрактного производителя покрытий повышенной сложности.

Участники семинара очень позитивно оценили само мероприятие, большинство специалистов отметили необходимость регулярного проведения таких встреч в подобном формате в будущем.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси проводит традиционный семинар "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе" 27–30 мая 2019 года в Минске (Беларусь). Семинар состоит из обзоров, регулярных устных сообщений и стендовых докладов, охватывающих широкий круг вопросов по физике, технике и применению полупроводниковых лазеров. Председатель семинара: академик Николай Станиславович Казак.

Тематика 12-го семинара охватывает направления: лазерные диоды, лазеры с электронным и оптическим возбуждением, а также по другим типам полупроводниковых источников и приемников излучения, по технологии полупроводниковых материалов, гетероструктур и разнообразных оптоэлектронных устройств на их основе. Планируется работа трех секций: "Твердотельные лазеры с диодной накачкой, лазерная спектроскопия" (председатель секции д. ф. - м. н. Г. И. Рябцев); "Технологические аспекты форми-

рования полупроводниковых структур" (председатель секции к. ф. - м. н. Е. В. Луценко); "Физика полупроводниковых лазеров и светодиодов: теория, эксперимент, применение" (председатель секции д. ф. - м. н. Г. П. Яблонский).

Рабочие языки: русский и английский. Предварительная регистрация для участия в семинаре должна быть проведена не позже 01.04.2019. Web-адрес мероприятия: <http://www.semiconductor-lasers-and-systems.by/ru>.

Г. И. Рябцев, [ryabtsev@ifanbel.bas-net.by](mailto:ryabtsev@ifanbel.bas-net.by)