

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

© 2009 г. **Б. Н. Сеник**, доктор техн. наук; **А. Б. Бельский**, канд. техн. наук;
В. В. Потелов, канд. техн. наук

ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская область

E-mail: bogdan_senik@mail.ru

Приведен обзор развития современных оптических технологий, используемых при промышленном изготовлении прецизионных сборок для оптико-электронных приборов и комплексов с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: оптические технологии, призмённые модули, глубокий оптический контакт, оптические покрытия.

Коды OCIS: 220.4610, 310.1620

Поступила в редакцию 11.02.2009

Приоритетным направлением деятельности ФНПЦ ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева” являются разработка и создание много- и гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли, оптико-электронных комплексов передачи азимута систем для прицеливания ракетных комплексов, оптико-электронных каналов и систем изделий с высоким пространственным разрешением. В основе разработки и создания такой аппаратуры лежат промышленные технологии изготовления прецизионных призмённых модулей.

Реализация предельных точностных и светотехнических выходных параметров призмённых и спектроделительных модулей определяется уровнем освоения современных технологий из-

готовления прецизионных призм, оптических покрытий со сложным спектральным профилем, работающих одновременно в различных спектральных диапазонах, а также сборкой и юстировкой призмённых оптических блоков с предельной точностью [1].

В качестве примера приведем типовые конструкторско-технологические требования к высокоточному призмённому модулю для обеспечения заданных параметров системы передачи азимута (см. табл. 1).

Для технологического обеспечения производства оптических модулей с указанными требованиями необходимо создать прецизионные призмённые сборки с точностью позиционирования в пределах $\pm 1''$, а кроме того клеевые конструкции,

Таблица 1. Типовые конструкторско-технологические требования к высокоточному призмённому модулю

Требование	Погрешность изготовления	Погрешность контроля
Погрешность изготовления оптических поверхностей призм, ΔN	0,2	0,1
Пирамидальность призм, угл. с	10	1
Погрешность взаимного углового положения призм, угл. с	5	1
Клиновидность призмённого блока, угл. с	30	1
Погрешность взаимного линейного положения призм, мм	0,05	0,003
Погрешность воздушного промежутка, мм	0,01	0,001
Интегральное отношение фон/сигнал по уровню 0,5 в области спектра от 0,4 до 1,1 мкм в каждом канале, %	8	2
Коэффициент пропускания фона, %	< 0,2	0,1
Погрешность совмещения центров выходных окон каналов, мкм	0,05	0,01

позволяющие реализовать предъявленные к ним требования, которые касаются

- обеспечения заданного положения деталей с высокой точностью,
- надежности крепления,
- минимизации деформаций в оптических деталях при климатических и механических воздействиях,
- стабильности положения и оптических характеристик в заданных пределах при эксплуатации,
- улучшения массогабаритных характеристик.

Одним из эффективных технологических методов получения высоких точностных и эксплуатационных параметров призматических сборок, необходимых для обеспечения предельно достижимых оптических параметров оптико-электронных систем, является технология глубокого оптического контакта (ГОК).

Метод ГОК – бесклеевой способ монолитного соединения полированных оптических элементов с сохранением геометрии и качества соединяемых поверхностей и точности в пределах $\pm 1''$ позиционирования оптических элементов, входящих в состав сборки, друг относительно друга. В качестве связующего слоя используется пленка двуокиси кремния (SiO_2) толщиной 135–150 нм, которая наносится химическим методом пиролиза или вакуумным методом ее нанесения на одну из соединяемых поверхностей. Далее отдельные оптические элементы соединяются оптическим контактом и подвергаются термической обработке в определенных температурных режимах.

Учитывая важность вышеуказанной технологии для создания высокоточной оптики, были проведены комплексные исследования в части ее совершенствования с определением или уточнением требований

- к оптическим заготовкам, из которых изготавливаются оптические элементы;
- по шероховатости и плоскостности оптических поверхностей под ГОК,
- по методам и составу химических растворителей для очистки поверхностей под ГОК.

Были также реализованы следующие мероприятия:

- создана специальная технология очистки кремнийсодержащего соединения – тетрахло-рида кремния SiCl_4 – с целью получения его максимальной чистоты;
- проведены экспериментальные исследования структурного состояния пленки SiO_2 в

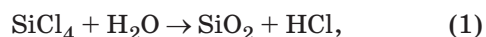
зависимости от технологии нанесения и определена оптимальная степень пористости;

- с целью повышения стабильности технологии нанесения пленки SiO_2 определены оптимальные внешние воздействующие температурные факторы – температура и влажность окружающей среды в помещении, где проводились эксперименты;

- определены оптимальные температурные режимы и давление для соединения оптическим контактом двух оптических элементов.

Кратко остановимся на основных технологических операциях для получения необходимых параметров. Тонкие наноразмерные слои оксида кремния наносят на кварцевые поверхности из паровой фазы для создания возможности соединения этих поверхностей без использования дополнительных склеивающих реагентов за счет ГОК.

Основной технологической операцией, используемой для получения ГОК, является нанесение тонкослойного покрытия (оксида кремния) на поверхность кварца с использованием паров кремнийсодержащих соединений – тетрахло-рида кремния и тетраметоксисилана (ТМОС) – и воды по реакциям



Основным требованием к наносимому слою является однородность поверхности по наличию гетерогенных примесей (включений). Для осаждения используется объемный газовый реактор, выполненный из нержавеющей стали и покрытый изнутри кислотостойкой эмалью и фторопластом. Компоненты вводят в реактор по раздельно расположенным вводам в виде смесей паров соединения и воды с газом-носителем – азотом. В качестве подложек для осаждения используются кварцевые пластины, полученные из блоков, выращенных гидротермальным методом [1].

Поверхности кварцевых заготовок перед осаждением обрабатываются различными спиртами с целью удаления масел и других органических примесей. При этом используются такие образцы спиртов, как метанол, этанол и изопропанол, очищенные ректификацией на насадочных колоннах, а также продукты реактивных квалификаций, производимые отечественными “ЭКОС-1”, “Компонент”, “Рез-Экс” и зарубежными (“Merck” ФРГ) фирмами. Содержание примесей металлов в спиртах составляло 10^{-6} – 10^{-8} масс.% каждо-

го, примесей органических соединений – 10^{-2} – 10^{-4} масс.% каждого, содержание воды для различных образцов – от 1 до 0,05 масс.%.

Очистка поверхностей проведена промывкой в ваннах с последующей сушкой образцов, протиркой смоченными в спиртах неволокнистыми тканями, парожидкостной обработкой при температуре кипения спиртов. Чистота поверхностей контролируется методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. Лучшие результаты по очистке поверхностей были получены при использовании парожидкостной обработки поверхностей этанолом и изопропанолом с содержанием влаги на уровне не более 0,2 масс.%.

Для осаждения были испытаны образцы тетрахлорида кремния фирмы “Aldrich” (Англия), очищенные дополнительной ректификацией, и фирмы “Реа-Экс” (Россия). Содержание примесей ряда металлов в использованных для осаждения образцах тетрахлорида кремния составляло порядка 10^{-6} – 10^{-8} масс.%. Концентрация углеродсодержащих примесей типа метилтрихлорсилана в очищенном образце тетрахлорида кремния фирмы “Aldrich” составляла 1×10^{-1} масс.%. В образцах фирмы “Реа-Экс” содержание данных примесей не превышало 5×10^{-3} масс.%. В качестве источника влаги использовали воду, очищенную двойной дистилляцией в кварцевой установке и на ионообменных смолах. Дополнительная очистка методом “sub-boiling” не привела к улучшению качества полученных покрытий и поэтому в дальнейшем не применялась. Содержание отдельных примесей металлов в воде также составляло 10^{-6} – 10^{-8} масс.%.

ТМОС был синтезирован путем взаимодействия технического тетрахлорида кремния с метанолом в присутствии аммиака и очищен ректификацией. Содержание примесей отдельных металлов в нем не превышало порядка 10^{-6} – 10^{-8} масс.%.

Испарение исходных воды и кремнийсодержащих соединений осуществлялось из стеклянных барботеров путем подачи в них через ротаметры газообразного азота, осушаемого на силикагеле и цеолитах. Скорость роста слоя контролировали непрерывно оптическим методом по контрольному образцу-свидетелю. Требуемая толщина полученных слоев составляла 160–250 нм. Оптимальная скорость роста, обеспечивающая требуемое качество покрытий, – 15–20 нм/мин.

Осаждение покрытия кварца на поверхность с использованием в качестве источника тетрахлорида кремния проводилось при температуре

подложки 20–30 °С. При применении ТМОС обнаружено, что осаждение на подложке с заметной скоростью начинается с температуры 350–360 °С. Оптимальная температура осаждения составляла 390–420 °С.

Реакция между кремнийсодержащими компонентами и водой проходит, в основном, в объеме аппарата осаждения, т. е. носит гомогенный характер. На поверхность изделия осаждается не более 0,1% от диоксида кремния, образующегося из используемых исходных кремнийсодержащих реагентов. Наличие избыточных компонентов приводит к нежелательным эффектам, выражающимся, в частности, в выпадении на поверхности аморфного порошка диоксида кремния за счет гомогенной реакции в объеме.

Для снижения возможности проявления данного процесса необходимо было увеличить степень использования соединений кремния и максимального осаждения диоксида кремния на поверхности. Проведены эксперименты по осаждению слоев при изменении различных параметров процесса, а именно:

- использование исходных продуктов различной квалификации по чистоте,

- термостатирование барботеров при различных температурах,

- изменение скорости подачи газ-носителей через барботеры.

При использовании образцов кремнийсодержащих соединений различной квалификации по чистоте выявлено, что применение более загрязненных по примесям металлов и углеродсодержащих веществ приводит к стабильному появлению на поверхности кварца дефекта – “серости”, определяемой визуально.

Обнаружена сильная зависимость качества получаемых слоев от изменения соотношения газов, пропускаемых через барботеры с реагентами, а также от изменения температуры барботеров. Этот факт мы относим к различной степени насыщения парами исходных компонентов газ-носителя.

Проведенные измерения скорости уноса реагентов через барботеры показали, что насыщение паровой фазы реагентами изменяется в зависимости от высоты слоя жидкости, размеров пузырьков газа-носителя. При этом содержание того или иного реагента в газе-носителе могло изменяться в несколько раз. Таким образом, для получения воспроизводимых результатов осаждения необходимо поддержание постоянного уровня жидкостей в барботерах и скорости подачи газа-носителя через них.

Поддержание постоянных уровней жидкости в барботерах позволило сохранять требуемую стехиометрию реагентов в течение процесса.

Очевидно, что соотношение парциальных давлений паров воды и кремнийсодержащих соединений в системе существенно влияют на кинетику процесса. В сочетании с изменением степени насыщения исходными компонентами паров газа-носителя аналогичное изменение, связанное с различным характером зависимостей давления насыщенных паров кремнийсодержащих соединений и воды, может значительно влиять на характер процесса осаждения. Значения парциальных давлений определяли по данным [2].

Спектры пропускания образцов кварца изучали в ультрафиолетовой (УФ), видимой и ИК областях. Исследованы образцы кварцевых заготовок, используемых в качестве подложек для нанесения тонких слоев диоксида кремния из паровой фазы, с целью определения их пригодности для оптимальных условий получения покрытий. Измерение спектров пропускания образцов в УФ и видимой областях спектра (200–900 нм) проведено на спектрофотометре М-40 фирмы “Карл Цейсс”.

В связи с тем что площадь поверхности образцов была меньше площади отверстия в стандартном держателе, съемка спектров проводилась с использованием нестандартного держателя.

Пропускание для различных образцов кварца в области 200–900 нм практически одинаковое (табл. 2).

Спектры образцов содержат заметную полосу поглощения с максимумом 227 см^{-1} , в спектре кварцевой кюветы фирмы “Карл Цейсс” подобная полоса отсутствует. Данная полоса вызвана примесью (10^{-3} – 10^{-4} масс. %), поглощающей в УФ области.

ИК спектры получены на двухлучевом ИК спектрофотометре 983 G фирмы “Перкин-Эльмер” [3]. Спектры регистрировали с использованием дифференциального метода, предварительно записывая в память спектра нулевую линию,

которую вычитали из ИК спектров кварцевых образцов.

Для определения диапазона измерений сняты ИК спектры образцов с нанесенными покрытиями (1–6), полученных с использованием тетрагидрида кремния, и образцов (7–13), полученных из ТМОС, в области 4000 – 180 см^{-1} . Начиная с 2300 см^{-1} , для всех этих образцов наблюдается полное поглощение. В связи с этим регистрировать пропускание в области 2300 – 180 см^{-1} не имело смысла и ИК спектры образцов были сняты в области 4000 – 2000 см^{-1} . ИК спектры всех образцов, за исключением области 3650 – 3700 см^{-1} , практически идентичны и совпадают с литературными данными по спектрам кристаллического диоксида кремния.

В табл. 3 приведены значения пропускания образцов диоксида кремния при $\nu = 4000\text{ см}^{-1}$ (начало измерений), 3664 см^{-1} (максимум полосы поглощения валентных колебаний гидроксильных групп), 2650 см^{-1} (максимум полосы поглощения обертоновых колебаний связи кремний-кислород) и 2300 см^{-1} (начало нулевого пропускания).

Большинство образцов имели максимальное пропускание (87–91%) при $\nu = 4000\text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 2,5\text{ мкм}$). Для всех образцов характерна интенсивная полоса поглощения с максимумом при $\nu = 3660\text{ см}^{-1}$, относящаяся к валентным колебаниям гидроксильных групп (ν_{OH}). Имеются все основания для вывода о том, что используемый для изготовления изделий кварц содержит большое количество гидроксильных

Таблица 2. Светопропускание образцов кварца в области 200–900 нм, %

Номер образца	λ , нм			
	200	300	500	900
1	45,5	87,0	96,0	94,0
2	45,1	87,2	96,3	94,2

Таблица 3. Пропускание образцов диоксида кремния, %

Номер образца	ν , см^{-1}			
	4000	3664	2650	2300
1	87	0	24	0
2	88	0	24	0
3	91	0	25	0
4	87	0	24	0
5	88	0	24	0
6	87	4	24	0
7	74	7	22	0
8	89	5	25	0
9	87	1	22	0
10	89	3	24	0
11	92	5	25	0
12	90	4	26	0
13	83	2	24	0

групп (с концентрацией, возможно, более 0,01%) как в объеме, так и на поверхности исследованных образцов.

Наличие слабого (24–25%) пропускания при $\nu = 2650 \text{ см}^{-1}$ связано, возможно, с наличием на поверхности неполностью отщепленных углеводородных радикалов. Этот эффект требует дальнейшего исследования.

Область полного поглощения в исследованном диапазоне спектра для всех образцов начинается с $\nu = 2300 \text{ см}^{-1}$ и продолжается до $\nu = 180 \text{ см}^{-1}$. По сравнению с образцами кварца, используемого в оптических кюветах, в УФ спектрах исследуемых образцов наблюдались полосы с максимумом поглощения на $\lambda = 227 \text{ нм}$.

Неполнота гидролиза в объеме реактора и на поверхности изделия дает возможность образования промежуточного слоя оксида кремния с высокой поверхностной активностью, которая реализуется в дальнейшем при создании ГОЖ с хорошими механическими параметрами – прочностью на разрыв.

Таким образом, можно сделать вывод, что используемый в технологических процессах нанесения кварц, является вполне пригодным и может обеспечивать хорошую адгезию слоя диоксида кремния к поверхности заготовки.

С точки зрения получения тонких слоев оксида кремния, для создания ГОЖ используемым методом этот результат является весьма важным, поскольку наличие ОН-групп на поверхности способствует хорошей адгезии на ней слоя, образующегося при гидролизе оксида кремния.

Важным результатом является то, что качество покрытий, полученных с использованием четыреххлористого кремния и ТМОС, практически одинаковое. Таким образом, имеется возможность для выбора исходных реагентов в зависимости от конструкции реактора, температуры осаждения, требований к экологической чистоте процесса.

Вышеописанная технология ГОЖа позволяет обеспечивать точность позиционирования оптических элементов в пределах $\pm 1''$ при прочности на разрыв соединения не менее 700 кг/см^2 .

Вторым немаловажным и эффективным методом для прецизионной сборки металло-стеклянных оптических призмённых модулей является оптимальный выбор и применение конструкционных клеев.

Опыт по созданию и эксплуатации различных клеевых конструкций позволяет сделать вывод, что наиболее проблемными являются композиции “стекло–металл” из-за низкой стабильно-

сти пространственного положения оптических элементов, недостаточной прочности на сдвиг и отрыв, нестабильности технологии производства клеевых конструкций, малой номенклатуры используемых клеев.

В работе [2] описаны комплексные исследовательские и экспериментальные работы по применению существующих клеев для композиции “стекло–металл”, анализу физико-химических свойств клеев, испытаниям контрольных образцов, склеенных с помощью оптимизированных по результатам математического моделирования клеев; приведены рекомендации по корректровке и доработке существующих клеев. Исследования и испытания новых перспективных клеевых композиций показали возможность изготовления прецизионных оптических призмённых сборок со следующими характеристиками:

величина двойного лучепреломления (при склеивании и после испытаний)	не более 25 нм/см,
деформация рабочей поверхности оптической детали (отклонение от плоскостности)	не более $\lambda/4$,
рабочий диапазон температур, в котором сохраняются точностные характеристики	от -60°C до $+70^\circ\text{C}$,
прочность на сдвиг	не менее 60 кгс/см^2 ,
прочность на отрыв	не менее 120 кгс/см^2 ,
прочность на неравномерный отрыв	не менее 30 кгс/см^2 ,
срок службы	не менее 12 лет.

Известно, что для создания высокоточных оптических узлов нередко применяются детали, изготовленные из разнородных материалов с различными коэффициентами температурного линейного расширения (силикатное стекло, титановый сплав), сборка которых осуществляется методом склеивания [3]. Как правило, для изготовления высококачественных отдельных компонентов сборок применяется оптическое стекло марки К-8 с высокой степенью однородности и малым двойным лучепреломлением. В качестве материала для механических деталей используется титановый сплав ВТ-1-0.

Для склеивания указанных материалов применяются клеи, обладающие высокой адгезией к силикатному стеклу, а также достаточно высокими не только прочностными, но и эластичными

свойствами (для снятия внутренних напряжений, возникающих при склеивании разнородных материалов).

С этой целью была проведена серия исследований физико-механических характеристик клеев ВК-27 и К-300-61 с подслоем КЛТ-300 для оценки их влияния на стабильность оптических характеристик в процессе эксплуатации и определения долговечности (срока службы) склеенных оптических сборок.

Клеи ВК-27 и К-300-61 представляют собой композиции на основе модифицированных эпоксидных смол и низкомолекулярных полиамидов. Они отверждаются практически без усадок как при комнатной температуре, так и при температуре 60 °С без влияния побочных продуктов, образуя композиции с высокими физико-механическими характеристиками.

Стандартные образцы на указанных клеях прошли различные виды испытаний как в ис-

ходном состоянии, так и после воздействия температуры, вибрации, механических нагрузок, указанных в табл. 4–6.

Следующий этап работ был посвящен изучению деформационных свойств клея ВК-27 в условиях равномерного сдвига.

Для определения прочности на сдвиг образцы из алюминиевого сплава Д16 АТ Ан. Окс. Хром и титанового сплава ОТ-4 были склеены с помощью клея К-300-61.

Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Клеевые соединения из алюминиевого и титанового сплавов на клее К-300-61 выдерживают термическое старение при 200–300 °С. Прочность клеевых соединений после пребывания в атмосфере с относительной влажностью 98% при 40 °С в течение 20 суток составляет 150 кгс/см². Увеличение прочности при сдвиге клеевых соединений при температуре –60 °С показывает, что клей очень жесткий, поэтому в дальнейшем рекомен-

Таблица 4. Механические свойства клеевых соединений на клее ВК-27 при низкой, нормальной и повышенной температурах

Наименование свойства	Склеиваемые материалы	Температура испытания, °С		
		–60	20	80
Прочность при сдвиге, τ_B , кгс/см ²	Д16 зашкуренный	220 (210–238)	245 (230–250)	90 (84–98)
	Д16 АТ Ан. Окс. Хром.	220 (205–235)	248 (235–270)	107 (97–117)
	Д16 АТ Ан. в серн. к-те	140 (130–165)	235 (225–260)	90 (84–107)
	ОТ-4 дробленый	260 (235–275)	270 (250–280)	95 (90–105)
	30ХГСА дроблен.	260 (255–275)	275 (270–280)	100 (95–105)
	30ХГСА-кадм.	—	285 (265–295)	94 (90–96)
	КАСТ-зашкурен.	—	100 (90–110*)	100 (85–110)
	СТП-6 зашкурен.	—	80 (65–100*)	75 (60–85)
	ЭПС-2Т зашкурен.	—	176 (153–203)	115 (104–124)
Прочность при отрыве, $\sigma_{отр}$, кгс/см ²	Д16 АТ Ан. Окс. Хром	450 (400–500)	380 (340–415)	95 (80–110)
	30ХГСА дроблен.	500 (470–540)	375 (345–405)	65 (60–75)
Прочность при неравномерном отрыве, $S_{отр}$, кгс/см ²	Д16 АТ зашкурен.	32 (27–36)	44 (38–50)	16 (14–20)
	Д16 АТ Ан. Окс. Хром	35 (32–38)	45 (38–52)	22 (19–26)

* – разрушение по материалу.

Таблица 5. Вибростойкость при сдвиге $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,1$; частота вибраций $f = 2000$ цикл/мин.

Склеиваемые материалы Д16 АТ Ан. Окс. Хром

Температура испытания, °С	Максимальное напряжение цикла, кгс/см ²	Число циклов до разрушения
20	125	10 ⁴
	100	10 ⁵
	75	10 ⁶
	65	10 ⁷
80	46	10 ⁴
	35	10 ⁵
	24	10 ⁶
	15	10 ⁷

Таблица 6. Деформационные свойства клея ВК-27

Характеристика в условиях равномерного сдвига при температуре испытания 20 °С	Значения параметра
Прочность, кгс/мм ²	2,7
Модуль сдвига, кгс/мм ²	27–54
Относительное удлинение, %	50–125
Выносливость при $\sigma_{\max} = 10$ кгс/мм ² , $f = (7-8)$ Гц циклов клеевых соединений	1,5×10 ⁶

Таблица 7. Изменение прочности при сдвиге клеевых соединений на образцах из сплавов Д16 АТ Ан. Окс. Хром и ОТ-4

Склеиваемые материалы	Прочность при сдвиге, τ_B , кгс/см ² , при температуре испытания, °С		
	–60	20	80
Алюминиевый сплав Д16 АТ Ан. Окс. Хром	258	125	60
Титановый сплав ОТ-4	240	150	65

довано его использовать с кремнийорганическим эластичным подслоем КЛТ-30.

Полученные данные по исследованию физико-механических характеристик клеев показали, что соединения на клеях ВК-27 и К-300-61 обладают длительной высокой вибропрочностью, стабильностью механических свойств в среде воздуха при воздействии повышенных и пониженных температур, влагостойкостью.

Однако клей ВК-27 имеет более высокую прочность в сочетании с достаточно высокими эластичными характеристиками.

Одним из важнейших технологических факторов при создании многофункциональных оптических и оптико-электронных систем с высокоточными оптическими элементами является уровень технологии нанесения оптических покрытий. В частности, для обеспечения высоких радиометрических характеристик и спектрального разрешения аппаратуры дистанционного зондирования Земли важным технологическим моментом является нанесение тонкослойных диэлектрических покрытий. Проведенные теоретические и практические исследования в области синтеза оптических покрытий позволили разработать промышленную технологию изготовления оптических элементов со сложными (по форме спектральной кривой отражения и пропускания) высококачественными покрытиями.

Разработана и реализована усовершенствованная методика синтеза конструкций неравнотолщинных оптических покрытий. Математически многослойные оптические покрытия описываются системой, состоящей из конечного числа слоев с различными показателями преломления и толщинами, заключенных между двумя полубесконечными средами. Если слои однородны, изотропны, имеют параллельные границы, то падающее на оптическое покрытие излучение описывается линейно поляризованной монохроматической плоской волной. Определение отражения, пропускания и поглощения многослойной тонкопленочной системы, с точки зрения электромагнитной теории, сводится к решению уравнений Максвелла при заданных граничных и начальных условиях, т. е. к определению стационарных амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей на всех границах многослойной системы при падении световой волны с заданными характеристиками.

Для создания оптического покрытия с требуемыми спектральными характеристиками достаточно решить задачу синтеза конструкции многослойной пленочной системы. Для этого необходимо

- выбрать материалы, образующие тонкие пленки;
- задать показатели преломления для выбранных материалов,
- задать показатели преломления сред, обрамляющих многослойную систему;
- подобрать необходимое количество и толщины слоев из выбранных материалов, а также

последовательность их чередования, если число выбранных материалов более 3.

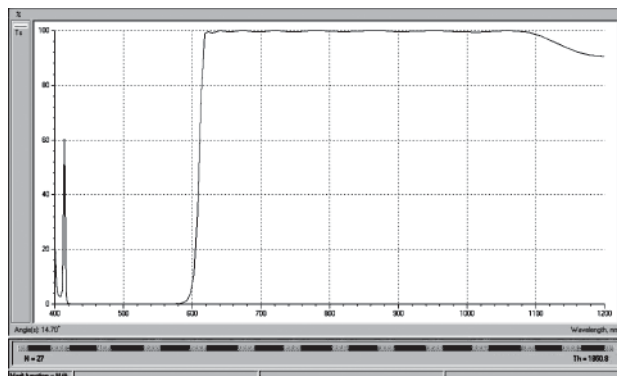
Успешное решение задачи синтеза зависит от выбора метода оптимизации спектральных параметров покрытия.

В основе всех методов оптимизации лежит предположение о том, что всю совокупность интересующих свойств оптического покрытия можно охарактеризовать показателем качества (или целевой функцией) F , зависящим от его конструктивных параметров. С помощью показателя F оценивается отклонение желаемой спектральной характеристики от ее приближения. Таким образом, задача синтеза оптического покрытия сводится к минимизации целевой функции на ограниченном множестве конструктивных параметров. Ограничения конструктивных параметров определяются возможностями технологической реализации фильтра.

Среди известных методов оптимизации неравнотолщинных многослойных интерференционных покрытий наилучшие практические результаты удается достигнуть, используя “технику игольчатой оптимизации”. Суть этого подхода можно представить следующим алгоритмом:

- 1) задание начальной конструкции фильтра,
- 2) оптимизация показателя качества F путем вариации толщин слоев фильтра, с использованием любого известного метода оптимизации (градиентного спуска и др.);
- 3) вычисление некоторой P -функции, являющейся коэффициентом, связывающим приращение целевой функции δF с толщиной тонкого (“игольчатого”) слоя, установленного в конструкцию фильтра, проверка достижения цели оптимизации $\delta F = 0$;
- 4) выбор такого места установки игольчатого слоя в текущую конструкцию фильтра, что конструкция фильтра с игольчатым слоем будет иметь показатель качества выше, чем текущая конструкция;
- 5) установка в конструкцию фильтра игольчатого слоя и переход к шагу 2).

В отличие от других методов синтеза оптических покрытий, техника игольчатой оптимизации гарантирует достижение глобального оптимума при произвольной начальной конструкции оптического покрытия. В частности, расчет конструкций оптического покрытия спектроделительного модуля проводился с использованием техники игольчатой оптимизации с помощью программы OptiLayer, разработанной коллективом НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора А.В. Тихонравова [3].



Кривая спектрального пропускания.

В результате были найдены оптимальные конструкторско-технологические решения, обеспечивающие требуемые характеристики спектроделительного модуля оптико-электронных систем для дистанционного зондирования Земли и контроля космического пространства.

Ниже представлены исходные данные и результаты расчета спектроделительного покрытия, а на рисунке – характеристика его спектрального пропускания.

Рабочий угол $14,7^\circ$.

Среда – стекло К8.

Используемые вещества ZnS ($n = 2,3$) и MgF_2 ($n = 1,38$).

Число слоев – 27.

Коэффициент пропускания не более 0,07 на длине волны 600 нм.

Отражение светового потока в области спектра от 420 до 580 нм (коэффициент пропускания не более 0,015).

Пропускание светового потока в области спектра от 620 до 1100 нм (коэффициент пропускания не менее 0,99)

Конструкция: (0,536Н, 0,662L, 1,000Н, 0,797L, 0,795Н, 0,946L, 0,905Н, 0,838L, 0,890Н, 0,924L, 0,893Н, 0,870L, 0,897Н, 0,916L, 0,897Н, 0,870L, 0,893Н, 0,924L, 0,890Н, 0,838L, 0,904Н, 0,946L, 0,795Н, 0,798L, 1,000Н, 0,663L, 0,536Н).

Точность и воспроизводимость теоретического решения этого покрытия с учетом использования акустооптического спектрофотометра и возможных колебаний технологических параметров работы вакуумной установки ВУ-2М находится в пределах 0,3% от расчетной спектральной кривой по всему рабочему спектральному диапазону.

Заключение

Успехи, достигнутые “Красногорским заводом им. С.А. Зверева” в решении задач освоения промышленной технологии изготовления высокоточных оптических призмённых модулей для изделий специального назначения, еще раз подчеркивают важность кооперации с ведущими отечественными предприятиями и институтами, а также необходимость дальнейшего проведения научно-исследовательских работ по синтезу вспомогательных материалов: оптических и конструкционных клеев, пленкообразующих материалов с более совершенными физико-химическими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов С.А., Потелов В.В., Сеник Б.Н.* Особенности технологии изготовления высокоточных оптических призмённых узлов и спектроделительных модулей для изделий с высокой пространственной ориентацией // *Оптический журнал*. 2004. Т. 71. № 12. С. 11–13.
2. *Потелов В.В.* Исследование эксплуатационных свойств конструкционных клеев для прецизионной сборки оптических призмённых модулей // *Стекло и керамика*. 2009. № 4. С. 28–34.
3. *Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных оптических покрытий // *Оптический журнал*. 2007. Т. 74. № 12. С. 66–73.