

Рис. 5. Зависимость катодного тока от напряжения ускоряющего электрода для ЭЛВ 50/100

Проведены импульсные испытания ЭЛВ 4/40. Получен ток до 70 А при первеансе прибора порядка 80 мкА/В^{3/2}.

Проведены также импульсные испытания ЭЛВ 50/100. Из полученных результатов видно, что в им-

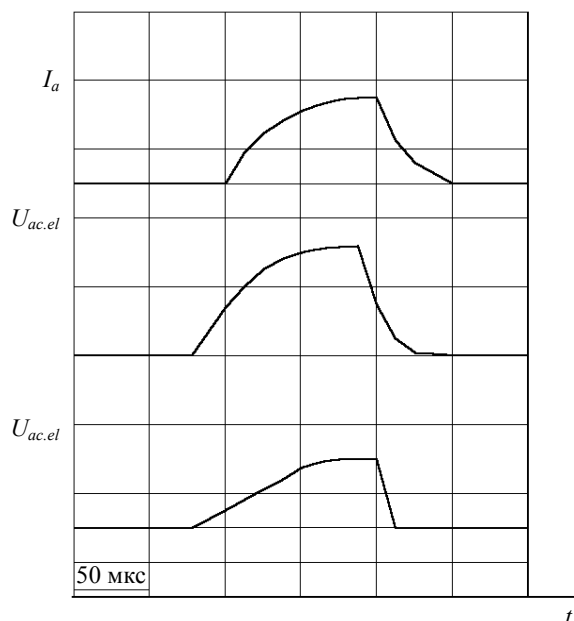


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока и напряжения для ЭЛВ 50/100

пульсном режиме можно отбирать ток до 110 А и выше при первеансе порядка 200 мкА/В^{3/2}. Данное значение тока ограничивается возможностями испытательного стенда.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Pulse characteristics of electron-beam valves

V. N. Shapenko, V. M. Stuchekov, I. M. Trukhachev
Russian Electrotechnical Institute (VEI) Moscow, Russia

The present report is devoted to test results of electron-beam valves (EBV) in pulse operation mode. The pulse test facility and principle of operation is described. Pulse characteristics of electron-beam valves EBV 4/40 (steady state current of 4 A and switching voltage of 40 kV) and EBV 50/100 (steady state current of 50 A and switching voltage of 100 kV) are presented. The analysis of test results is presented.

УДК 535.2

Применение акустооптических спектрофотометров для изготовления градиентных оптических элементов и особо сложных оптических покрытий

А. И. Гоев, В. Г. Крючков, В. В. Потелов, Б. Н. Сеник, А. К. Герасюк
ФНПЦ «ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева"», г. Красногорск, Россия

О. Б. Чердниченко
ФГУП «НИИ "Полус" им. И. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Представлена комплексная технология изготовления оптических покрытий с использованием математических методов синтеза конструкций покрытий и широкополосного акустооптического спектрофотометра AOS-4SW.

Промышленное изготовление высококачественных многофункциональных оптических и оптико-электронных систем и элементов различного назначения во многом зависит от уровня технологий нанесения оптических покрытий.

В частности, при разработке и создании лазеров основное внимание, как правило, уделяется достижению максимальной выходной энергии или мощности генерации за счет изготовления высокоэффективных активных сред и зеркал со сложным спектральным профилем коэффициента отражения и высокой крутизной этого профиля в различных спектральных диапазонах.

Проблематичным является достижение малых значений отражения, особенно в тех случаях, когда область низкого отражения должна находиться на небольшом расстоянии (по длине волны) от области высокого отражения [1].

При создании оптических комплексов для дистанционного зондирования Земли из космоса наряду с уже достигнутыми предельными пространственными информационными характеристиками (полоса захвата, пространственное разрешение, точность фотограмметрической привязки) современная аппаратура должна обеспечивать высокие радиометрические характеристики и спектральное разрешение. Достижение вышеуказанных требований при использовании традиционной технологии нанесения тонкослойных диэлектрических покрытий крайне затруднительно.

В настоящее время в результате проведения фундаментальных теоретических и практических исследований в области синтеза оптических покрытий разработана промышленная технология изготовления оптических элементов с особо сложными высококачественными покрытиями.

Методика синтеза конструкций неравнотолщинных оптических покрытий

Математически многослойные оптические покрытия описываются системой, состоящей из конечного числа слоев с различными показателями преломления и толщинами, заключенными между двумя полубесконечными средами. Предполагается, что слои однородны, изотропны, имеют параллельные границы. 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 желаемыми спектральными характеристиками требуется решить задачу синтеза конструкции многослойной пленочной системы:

- выбрать материалы, образующие тонкие пленки;
- задать показатели преломления для выбранных материалов;
- задать показатели преломления сред, обрамляющих многослойную систему;
- подобрать необходимое количество слоев толщин из выбранных материалов, а также последовательность их чередования в случае, если число выбранных материалов более 3.

Успешное решение задачи синтеза определяет выбор метода оптимизации. В основе всех методов оптимизации лежит предположение о том, что всю совокупность интересующих нас свойств оптического покрытия можно охарактеризовать одним числом F , зависящим от его конструктивных параметров. Это число F называется показателем качества или целевой функцией. С помощью показателя качества 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 сводится к следующему:

- 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 при $\delta F = 0$;
- 4) выбор такого места установки игольчатого слоя в текущую конструкцию фильтра, чтобы конструкция фильтра с игольчатым слоем имела 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 ВЦ МГУ под руководством проф. А. В. Тихонова [2].

В результате расчетов найдены конструкторско-технологические решения, обеспечивающие получение

требуемых характеристик спектроделительного модуля оптико-электронного комплекса для дистанционного зондирования Земли из космоса.

Ниже представлены результаты расчета спектроделительного покрытия:

- Рабочий угол, град. 14,7
- Среда Стекло К8
- Используемые вещества:
 - ZnS $n = 2,3$
 - MgF₂ $n = 1,38$
- Число слоев 27
- Коэффициент пропускания:
 - на длине волны 610 нм..... 0
 - на длине волны 600 нм, не более 0,07
- Отражение светового потока в области спектра (коэффициент пропускания не более 0,015), нм..... 420—580
- Пропускание светового потока в области спектра (коэффициент пропускания не более 0,99), нм..... 620—1100
- 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.

Пропускание светового потока по всему рабочему спектральному диапазону представлено ниже, а также на рис. 1.

Длина волны, нм	Коэффициент пропускания
440	0,00015
520	0,00044
560	0,01212
600	6,27407
640	99,99797
680	99,87104
720	99,99911
760	99,65541
800	99,82125
840	99,80155
880	99,85909
920	99,71742
960	99,97704
1000	99,43647
1080	99,71013
1120	96,54548

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

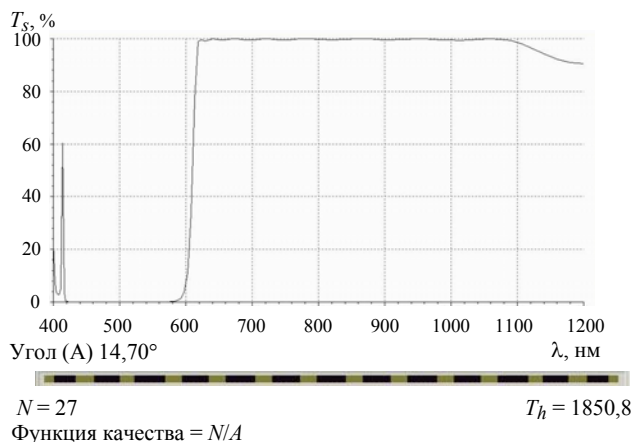


Рис. 1. Расчетная спектральная кривая

Широкополосный акустооптический спектрофотометр для контроля нанесения оптических покрытий

В технологическом процессе нанесения диэлектрических покрытий посредством осаждения веществ в вакууме важнейшую роль играет точность выдерживания толщин слоев в процессе нанесения многослойной конструкции покрытия. Совершенствование методов оптического контроля позволяет повысить выход годных изделий, улучшить спектральные характеристики покрытий, реализовать напыление принципиально новых покрытий, в том числе неравнотолщинных, ускорить процесс освоения новых типов покрытий. Наиболее информативный метод оптического контроля реализуется в режиме спектровизора, т. е. контроля всей спектральной характеристики покрытия в процессе напыления в реальном масштабе времени. Такой метод может быть, в частности, реализован с помощью акустооптического спектрофотометра AOS-4SW (разработчик и изготовитель ФГУП «НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стальмаха»).

Скоростные акустооптические спектрофотометры AOS-3S, созданные в 90-х годах, нашли свое место в системах оптического контроля вакуумных напылительных установок, предназначенных для нанесения оптических тонкопленочных диэлектрических покрытий [3].

Рабочий диапазон длин волн спектрофотометра AOS-3S составляет 370—1175 нм. Однако в последнее время значительно возрос интерес к оптическим покрытиям, работающим в диапазоне длин волн 1,3—1,6 мкм. Этот интерес в первую очередь обусловлен интенсивным развитием устройств оптоволоконной связи. Диапазон в районе 1,5 мкм также используется в безопасных для глаз лазерных дальномерах.

Несмотря на то, что AOS-3S позволяет вести эффективный контроль процесса нанесения покрытий, работающих в диапазоне 1,3—1,6 мкм (например, путем контроля спектральных характеристик в видимом диапазоне длин волн), тем не менее для ряда типов покрытий, в частности для просветляющих, в том числе и

широкополосных, лучшие результаты дает прямой контроль по диапазону длин волн, перекрывающему рабочий диапазон длин волн покрытия.

В связи с вышеизложенным была проведена модернизация спектрофотометра AOS-3S, направленная на расширение его рабочего диапазона до 1,65 мкм.

Рабочий диапазон длин волн акустооптического спектрофотометра в основном определяется:

рабочим диапазоном длин волн акустооптического фильтра (АОФ);

рабочим диапазоном длин волн источника света; диапазоном чувствительности фотоприемника.

Рабочий диапазон спектрофотометра AOS-3S составляет 370—1175 нм и ограничен диапазоном чувствительности используемых фотоприемников — кремниевых фотодиодов типа S1223 Hamamatsu. Применяемые в спектрофотометрах AOS-3S коллинеарные АОФ на звукопроводах из кристаллического кварца также имеют ограничение по рабочему диапазону длин волн. Длина волны настройки рассматриваемого АОФ определяется по формуле

$$\lambda = V(n_e(\lambda) - n_o(\lambda)) / (f \cos\theta),$$

где V — фазовая скорость акустической волны; n_e, n_o — показатели преломления для линейно поляризованных оптических волн, электрические векторы которых параллельны плоскости рисунка и перпендикулярны ей;

f — частота звуковой волны;

θ — угол между волновым вектором акустической волны и осью звукопровода (геометрия звукопровода АОФ рассчитана таким образом, что лучевые векторы обеих оптических волн и акустической волны коллинеарны продольной оси звукопровода, при этом $\theta = 21,3^\circ$).

Входное волновое сопротивление АОФ, как правило, удается согласовать (с приемлемым уровнем КСВ) с волновым сопротивлением ВЧ-кабеля (50 Ом) в октавном диапазоне частот, т. е. в диапазоне частот $\Delta f \approx f_2 - f_1$, где $f_2 \approx 2f_1$. Если учесть, что для кристаллического кварца $n_e(\lambda) - n_o(\lambda)$ медленно уменьшается с ростом λ , то получим, что для одного АОФ достижимый рабочий диапазон длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ несколько меньше октавы, т. е. $\lambda_2 \leq 2\lambda_1$. Таким образом, для перекрытия диапазона длин волн 370—1175 нм в AOS-3S пришлось использовать два АОФ. Структурная схема спектрофотометра AOS-3S представлена на рис. 2.

Для расширения рабочего диапазона длин волн спектрофотометра AOS-3S потребовалось ввести в конструкцию акустооптического монохроматора дополнительный (третий) канал со своим АОФ; фотоприемное устройство дополнить фотоприемником, чувствительным к диапазону длин волн 1,3—1,6 мкм; расширить диапазон управляющих частот блока управления и регистрации с $\Delta f_N = 26—100$ МГц до $\Delta f_W = 17—100$ МГц.

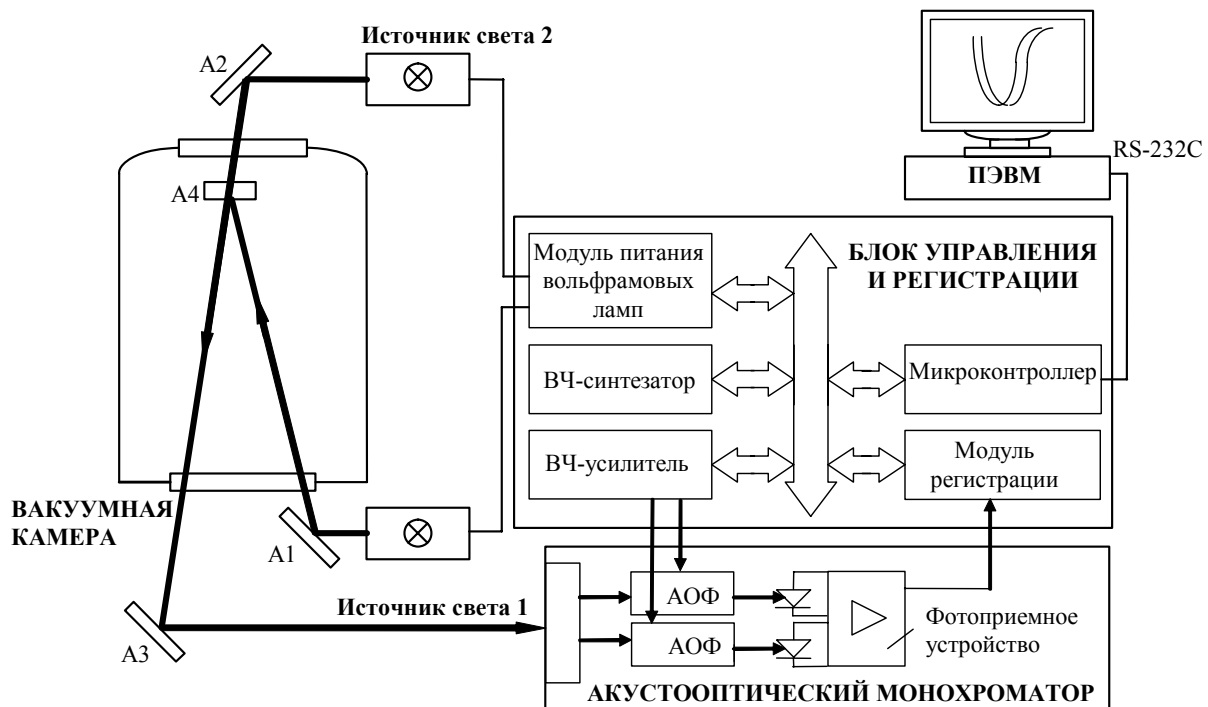


Рис. 2. Структурная схема акустооптического спектрофотометра AOS-4SW, подключенного к напылительной установке.

Источник света 1 используется при измерении коэффициента отражения, источник света 2 — пропускания; A1—A3 — юстируемые поворотные зеркала; A4 — свидетель

Модернизированному спектрофотометру была присвоена марка AOS-4SW. В качестве фотоприемника дополнительного канала применен InGaAsP

фотодиод типа ДФД2000ТО (отечественной фирмы DILAS), имеющий достаточно высокую чувствительность в области длин волн 0,95—1,65 мкм. Для разде-

ления света между В- и IR-каналами использован дихроичный интерференционный отражатель. А поскольку он работает с S-поляризованным светом, его удалось сделать достаточно широкополосным с высоким коэффициентом отражения в диапазоне длин волн 370—600 нм. В то же время излучение IR-канала ввиду значительно более длинных волн ($\Delta\lambda_{IR} = 1000—1650$ мкм) эффективно проходит через отражатель. Спектрофотометр AOS-4SW укомплектован новым, по сравнению с AOS-3S, блоком управления и регистрации, имеющим лучшие массогабаритные характеристики.

Широкодиапазонный акустооптический спектрофотометр AOS-4SW успешно прошел испытания и используется в серийном производстве на ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева".

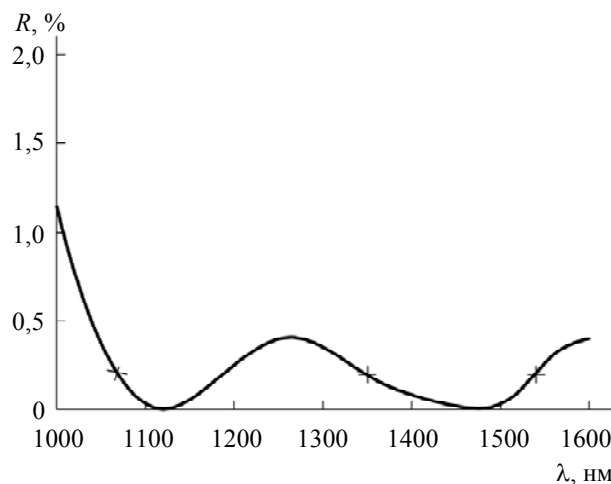
Технические параметры AOS-4SW

Диапазон рабочих длин волн, нм	370—1650
Полуширина полосы пропускания, на длине волны, нм, не более:	
408 нм	0,4
633 нм	0,6
1014 нм	2
1530 нм	6
Минимальный шаг перестройки длины волны, нм, не более	0,1
Погрешность установки длины волны, нм, не более:	
в диапазоне 370—600 нм	$\pm 0,4$
в диапазоне 600—1000 нм	± 1
в диапазоне 1000—1650 нм	± 5
Число точек в заданном спектральном диапазоне, ед.	2—201
Минимальное время измерения в одной точке, мс	5
Типичное время измерения в одной точке, мс	40
Погрешность измерения в диапазоне 400—1600 нм, %, не более:	
коэффициента отражения, R, %	$\pm(0,2+0,02 R)$
коэффициента пропускания, T, %	$\pm(0,2+0,01 T)$
Питание, В; Гц	190—245; 50
Потребляемая мощность, В·А, не более	500
Габаритные размеры, мм:	
монохроматора	150×440×100
блока управления и регистрации	260×290×110
источников света	250×80×80

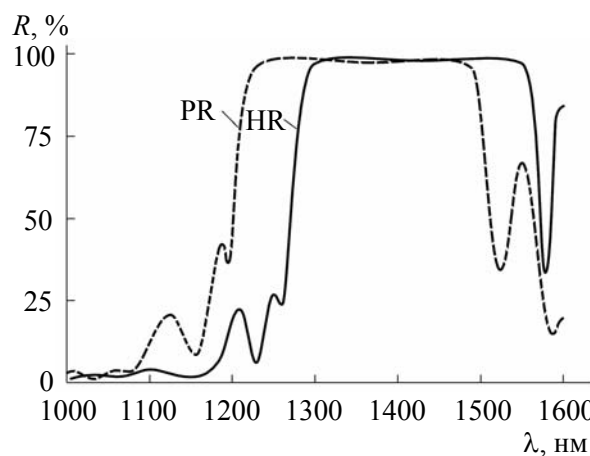
Предприятие ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" в последние 10 лет использует данную технологию для изготовления особо сложных высококачественных покрытий и в процессе освоения новых типов покрытий. Так, в частности, изготовлена гамма оптических элементов для твердотельных лазеров, работающих на безопасной длине волны 1,54 мкм, с лучевой прочностью не менее 800 МВт/см² при длительности импульса 10 ± 2 нс и диаметре сфокусированного излучения не менее 0,1 мм.

В качестве примера практического использования AOS-4SW на рис. 3 приведены спектральные характеристики изготовленных зеркал: ахроматического просветляющего покрытия (см. рис. 3, а) и поляризатора для твердотельных лазеров (см. рис. 3, б), работающих на безопасной для

зрения длине волны $\lambda = 1540$ нм. Так, для случая, показанного на рис. 3, б, экспериментальное значение коэффициента отражения на длине волны 1067 нм совпадает с теоретическим с погрешностью менее чем 0,3 %. Воспроизводимость данных процессов обеспечивается технологией нанесения покрытий, оптическим контролем с помощью AOS-4SW и является вполне приемлемой для серийного производства. Формулы покрытий для изготовления указанных оптических элементов рассчитаны по вышеописанной методике.



а



б

Рис 3. Спектральные характеристики изготовления зеркал:

а — ахроматическое просветляющее покрытие;

× — $R \leq 0,3$ % для $\lambda_1 = 1067$ нм, $\lambda_2 = 1350$ нм, $\lambda_3 = 1540$ нм;

б — покрытие для волновых лазерных излучателей:

HR — $R \geq 99,5$ % для $\lambda_1 = 1540$ нм, $\lambda_2 = 1350$ нм;

$R \leq 1$ % для $\lambda_1 = 1067$ нм;

PR — $T = 50 \pm 0,5$ % для $\lambda_1 = 1540$ нм;

$R \leq 1$ % для $\lambda_2 = 1067$ нм; $R \geq$ для $\lambda_3 = 1350$ нм

Параметры "глухих" (HR), полупрозрачных (PR) лазерных зеркал: λ — длина волны, R — коэффициент отражения, T — коэффициент пропускания) (см. рис. 3, б).

Заключение

Интенсивно развивающиеся наука и техника в настоящее время предъявляют к оптическим системам и комплексам, в том числе и лазерным, очень высокие требования, а именно: уменьшение массогабаритных характеристик, максимальное светопропускание, функционирование одновременно в различных спектральных диапазонах, улучшение пространственно-энергетических характеристик и т. д.

Применение математических методов синтеза оптических покрытий и акустооптических спектрофотометров в вакуумных технологиях изготовления оптических покрытий и коррекционных слоев благодаря прецизионному контролю толщины и показателя преломления напыляемых слоев в реальном масштабе времени позволяет решить ряд серьезных проблем не только сегодняшнего дня (повышение надежности технологического процесса и выхода годных деталей). Одним из самых перспективных направлений в оптике и оптических технологиях является промышленное освоение технологии изготовления градиентных покрытий и градиентных оптических элементов, которые до настоящего времени не нашли широкого применения из-за сложности практической реализации.

Использование акустооптического спектрофотометра и необходимая модернизация существующего вакуумного оборудования позволят ре-

шить ряд серьезных технических проблем и создать серийную технологию изготовления принципиально нового класса оптических элементов с качественно новыми выходными параметрами: градиентных, градиентно-асферических и др., а также ускорить освоение промышленных технологий изготовления градиентных покрытий [4].

Перспективно также использование акустооптического спектрофотометра в качестве системы управления автоматизированными вакуумными комплексами для изготовления прецизионных оптических покрытий и коррекционных слоев.

Литература

1. Бельский А.Б. и др. Применение акустооптического спектрофотометра в технологии изготовления оптических покрытий лазерных зеркал//XI Международная конференция. "Оптика лазеров-2003". — С.-Петербург, 2003.
2. Optilayer for Windows. User's Guide. Optilayer Ltd. 1997.
3. Копылов С. М. и др. Скоростной акустооптический спектрофотометр AOS-3S для контроля изготовления оптических покрытий//Лазерные новости. 1995. Вып. 4. С. 3—4.
4. Сенник Б. Н. Дис. на соиск. ... канд. техн. наук "Технологические процессы изготовления точных градиентных и асферических элементов". — М., 2002.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Use of acoustooptical spectrophotometers for making gradient optical components and extracomplex optical coatings

A. I. Goev, V. V. Potelov, B. N. Senik, A. K. Gerasyuk
JSC "Krasnogorsky Zavod im. S. A. Zvereva", Krasnogorsk, Russia

O. B. Cherednichenko
POLYUS Science-and-Research Institute im. M. F. Stelmakha, Moscow, Russia

The precision control of the optical thickness of layers during vacuum evaporation is of great importance for the technologic process of applying optical coatings by means of vacuum deposition. Improvement of optical control methods permits to increase output of ready items, to improve spectral characteristics of coatings, to realize evaporation of the principally new coatings and to make the optical components of a new generation. The most informative method of precision optical control is effected in the spectrovisor mode, that is in the process of evaporation the control of the whole spectral characteristic of the coating takes place in the real time.

УДК 621.535.683

Особенности получения новых расчетных показателей преломления в оптических слоях при их нанесении в вакууме