

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Омский государственный университет им. Ф.М.
Достоевского**

Физический факультет

Кафедра экспериментальной физики и радиофизики

Кнор Артур Сергеевич

Доклад на тему:

Расчет многослойных просветляющих и отражающих покрытий и анализ их свойств

Омск – 2016

Просветляющие и отражающие покрытия

Для получения более широкого спектра использования оптических элементов, а так же определенных свойств используют нанесение на поверхность линз, граничащих с воздухом, тончайшей плёнки или нескольких плёнок одна поверх другой, которое называется просветлением оптики. Это необходимо для увеличения светопропускания оптической системы. Показатель преломления таких плёнок меньше показателя преломления стёкол линз.

Поверхности зеркал, используемых в качестве высокоотражающих лазерных зеркал или расщепителей пучков, обычно изготавливают методом осаждения, или напыления, многослойных диэлектрических покрытий на плоскую или искривленную оптическую поверхность материала подложки. Тот же метод может быть использован для уменьшения коэффициента отражения поверхностей оптических элементов (нанесение антиотражающего, или просветляющего, покрытия) или для изготовления таких оптических элементов, как интерференционные фильтры или поляризаторы.

Цель и задачи

Цель: изучить основные характеристики многослойных просветляющих и отражающих покрытий. Определить наилучшее количество слоев.

Задачи:

- изучить основные характеристики многослойных покрытий;
- сделать расчеты просветляющего и отражающего покрытий, от однослойного до многослойного;
- произвести анализ расчетов для определения наилучшего количества слоев.

Однослойное просветляющее покрытие

$$n_1 = 1;$$

Условие потери полуволны:

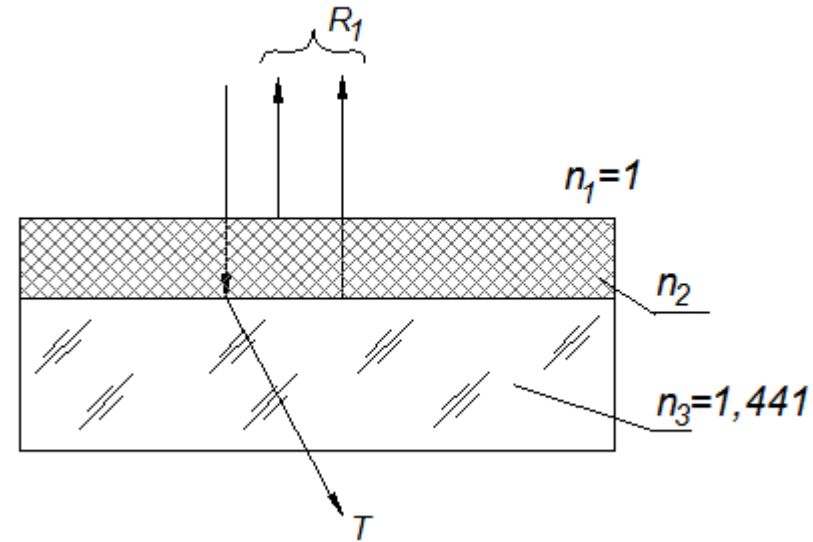
$$n_1 < n_2 < n_3$$

$$n_2 h_2 = \lambda_0 / 4$$

$$n_2 h_2 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

Рассчитываем показатель преломления:

$$n_2 = \sqrt{1,441} = 1,2$$



Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с наиболее близким показателем преломления к расчётному для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$:

Плёнкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ \text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{ мкм}$
фтористый кальций CaF_2	1,23 – 1,46	И, ИЭ	1360	0,15–12.

Однослойное просветляющее покрытие

Рассчитаем минимальный коэффициент отражения по формуле:

$$\rho_{\min} = \left(\frac{n_2^2 - n_3}{n_2^2 + n_3} \right)^2 ; \rho_{\min} = \left(\frac{1,23^2 - 1,441}{1,23^2 + 1,441} \right)^2 = 0,0006 = 0,06\%$$

Рассчитаем амплитудные и энергетические коэффициенты отражения системы воздух – плёнка – подложка по формулам:

$$r_{i,i+1} = \frac{n_i - n_{i+1}}{n_i + n_{i+1}} ; r_{i,j} = \frac{r_{i,i+1} + r_{i+1,j} \cos 2\beta}{1 + r_{i,i+1} \cdot r_{i+1,j} \cos 2\beta},$$

где i – порядковый номер слоя; j – число слоёв; β – угол сдвига фаз:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h_2,$$

$$R_{i,j} = |r_{i,j}|^2;$$

$$T_{i,j} = 1 - R_{i,j}$$

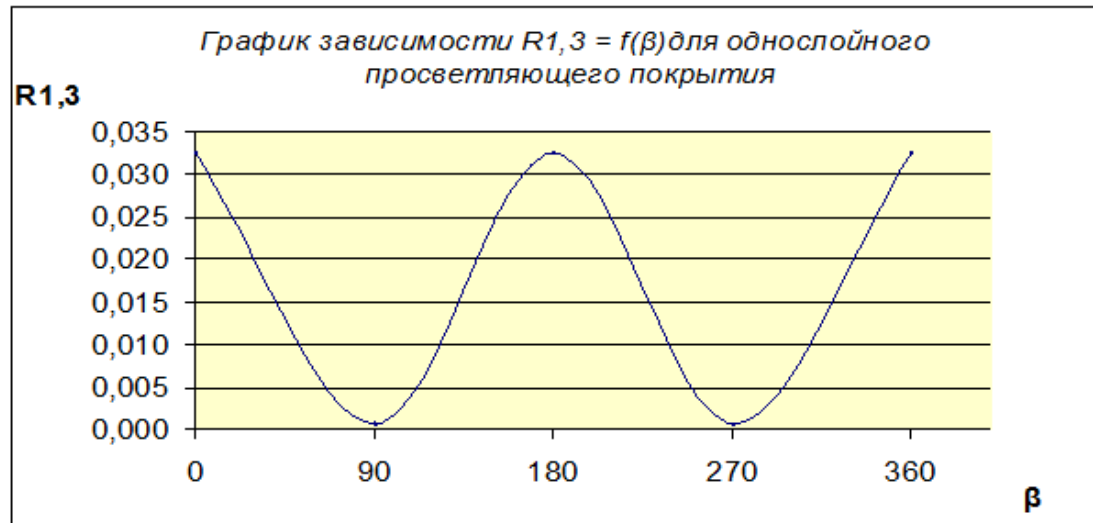
$$r_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = -0,103 ; r_{2,3} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} = -0,079 ; r_{1,3} = \frac{r_{1,2} + r_{2,3} \cos 2\beta}{1 + r_{1,2} \cdot r_{2,3} \cos 2\beta}.$$

$$R_{1,3} = |r_{1,3}|^2$$

$$T_{1,3} = 1 - R_{1,3}$$

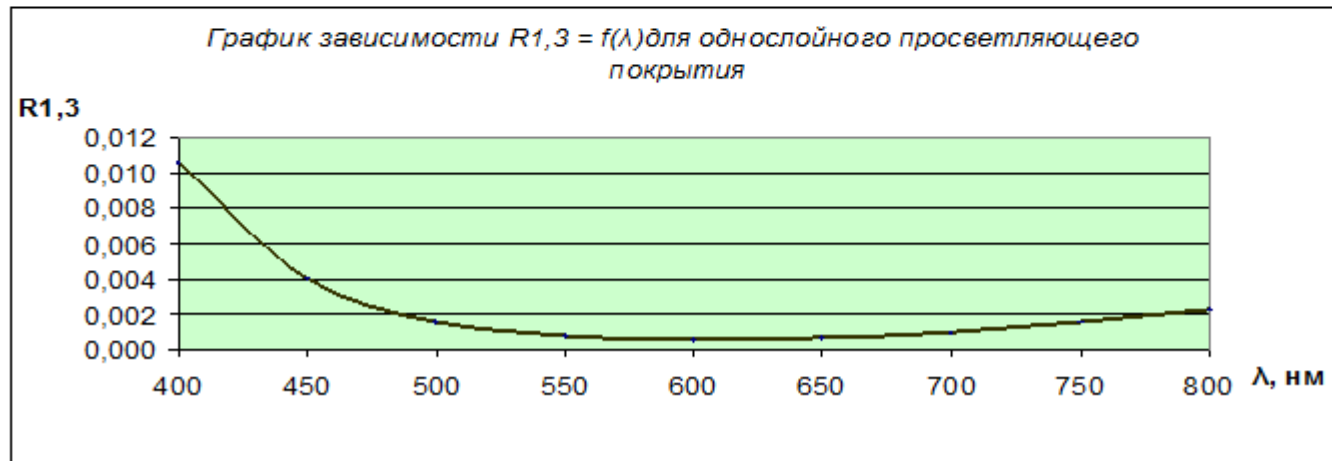
Спектральная характеристика $R_{1,3} = f(\beta)$

$n_2 \cdot h_2$	0	$\lambda_{0/4}$	$\lambda_{0/2}$	$3 \lambda_{0/4}$	λ_0
β	0	$p/2$	p	$3p/2$	$2p$
$\cos 2 \beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{1,3}$	-0,1807	-0,0243	-0,1807	-0,0243	-0,1807
$R_{1,3}$	0,0326	0,0006	0,0326	0,0006	0,0326
$T_{1,3}$	0,9674	0,9994	0,9674	0,9994	0,9674



Спектральная характеристика $R_{1,3} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\vartheta$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{1,3}$	-0,1031	-0,0639	-0,0395	-0,0276	-0,0243	-0,0266	-0,0322	-0,0395	-0,0476
$R_{1,3}$	0,0106	0,0041	0,0016	0,0008	0,0006	0,0007	0,0010	0,0016	0,0023
$T_{1,3}$	0,9894	0,9959	0,9984	0,9992	0,9994	0,9993	0,9990	0,9984	0,9977



Двухслойное просветляющее покрытие

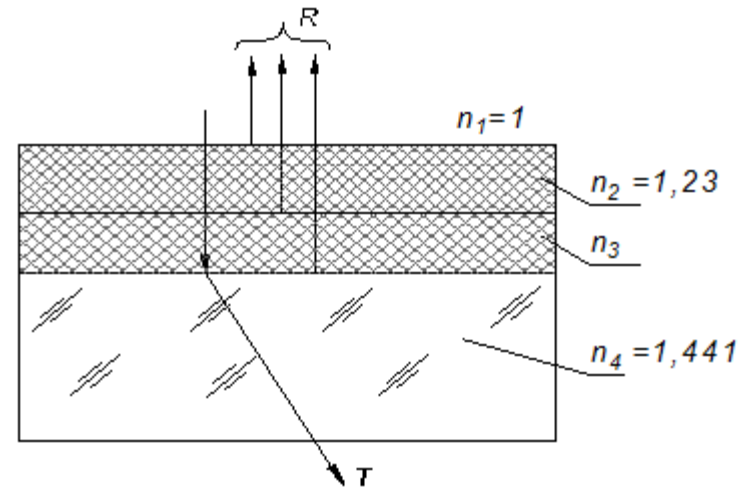
$$n_2 h_2 = n_3 h_3 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

Рассчитываем показатель преломления n_3 :

$$\frac{n_3}{n_2} = \sqrt{n_4}$$

$$n_3 = n_2 \cdot \sqrt{n_4}$$

$$n_3 = 1,23 \cdot \sqrt{1,441} = 1,477$$



Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с наиболее близким показателем преломления к расчётному для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$.

$$n_3 = 1,54$$

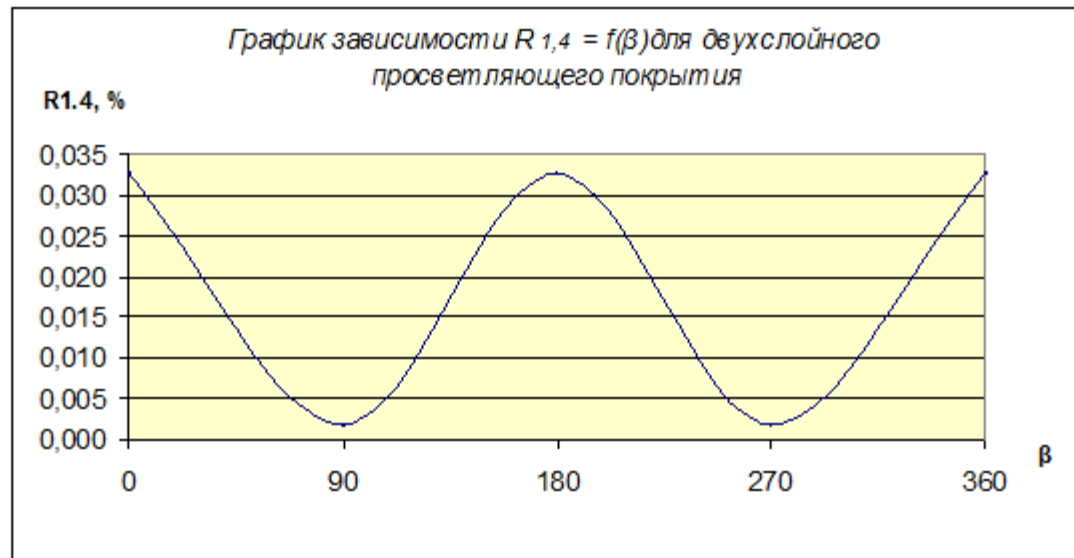
Плёнкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ \text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2$, мкм
Фтористый иттрий YF_3	1,54 – 1,56	И, ИЭ	1136	$\lambda_1 > 0,3$

Рассчитаем минимальный коэффициент отражения по формуле:

$$\rho_{\min} = \left(\frac{n_2^2 \cdot n_4 - n_3^2}{n_2^2 \cdot n_4 + n_3^2} \right)^2 ; \rho_{\min} = \left(\frac{1,23^2 \cdot 1,441 - 1,54^2}{1,23^2 \cdot 1,441 + 1,54^2} \right)^2 = 0,00177 = 0,18\%$$

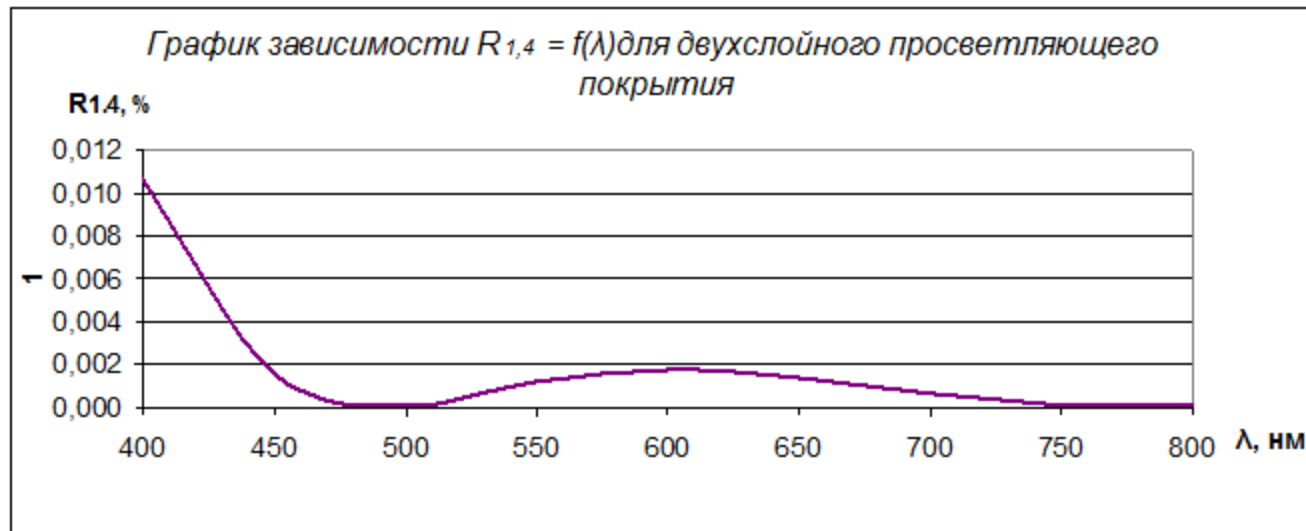
Спектральная характеристика $R_{1,4} = f(\beta)$

$n_2 \cdot h_2$	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	λ_0
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos^2 \beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{2,4}$	-0,0790	-0,1446	-0,0790	-0,1446	-0,0790
$r_{1,4}$	-0,18066	0,04207	-0,18066	0,04207	-0,18066
$R_{1,4}$	0,0326	0,0018	0,0326	0,0018	0,0326
$T_{1,4}$	0,9674	0,9982	0,9674	0,9982	0,9674



Спектральная характеристика $R_{1,4} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\beta$	0,000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{2,4}$	-0,1119	-0,1283	-0,1384	-0,1433	-0,1446	-0,1436	-0,1414	-0,1384	-0,1350
$r_{1,4}$	-0,1031	-0,0393	0,0089	0,0348	0,0421	0,0369	0,0245	0,0089	-0,0077
$R_{1,4}$	0,0106	0,0015	0,0001	0,0012	0,0018	0,0014	0,0006	0,0001	0,0001
$T_{1,4}$	0,9894	0,9985	0,9999	0,9988	0,9982	0,9986	0,9994	0,9999	0,9999



Трёхслойное просветляющее покрытие

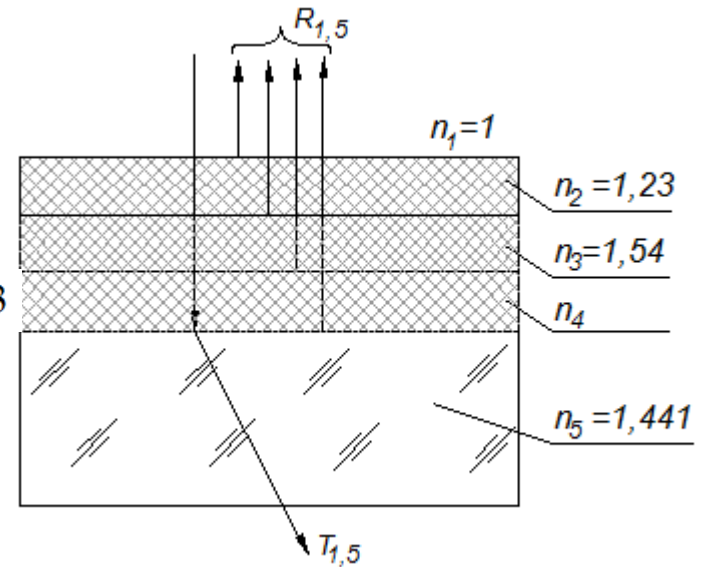
1 вариант: $n_2 h_2 = n_3 h_3 = n_4 h_4 = \lambda_0 / 4$

$n_2 h_2 = n_3 h_3 = n_4 h_4 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150$ нм

Находим показатель преломления n_4 :

$n_5 < n_3 < n_4 > n_2 ; n_3 \geq n_2 ; 1.441 < 1.54 < n_4 > 1.23$

Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с наиболее близким показателем преломления для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800$ нм:

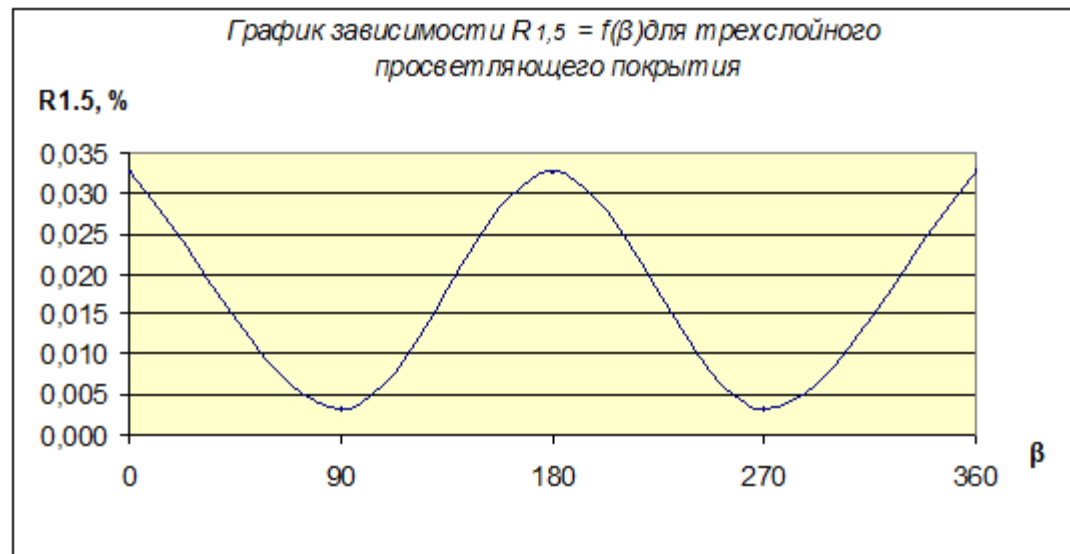


Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2$, мкм
Фтористый лантан LaF_3	1.59	И, ИЭ	1750	0,22–2

$$n_4 = 1.59$$

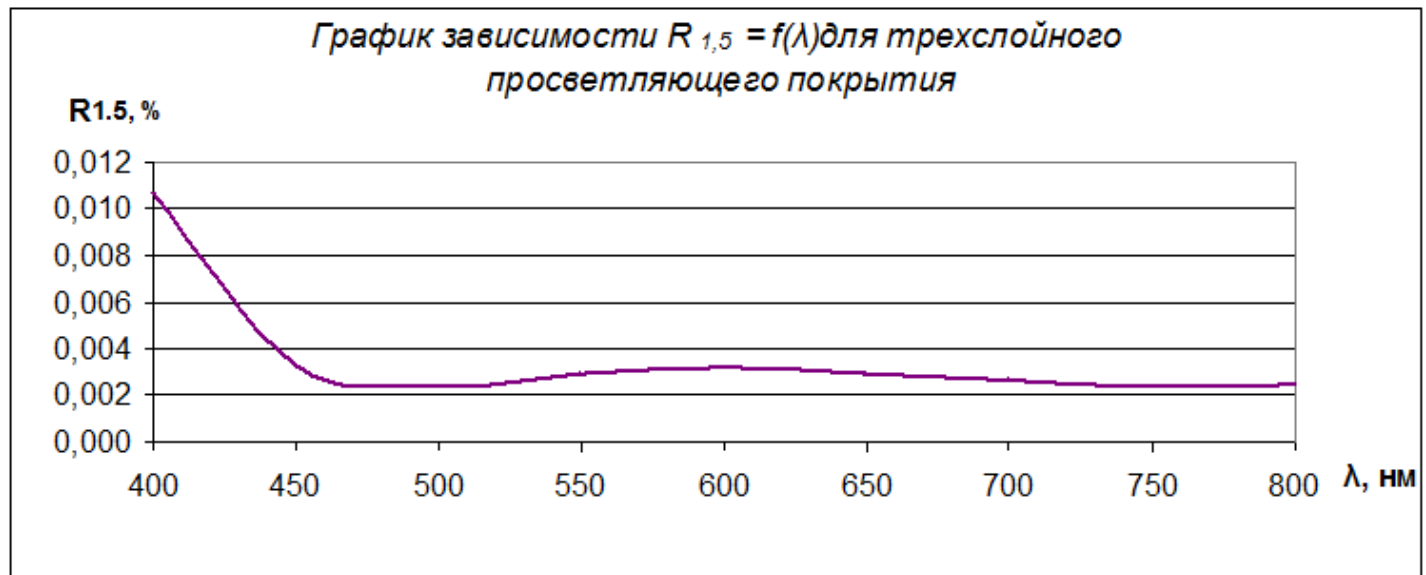
Спектральная характеристика $R_{1,5} = f(\beta)$

$n_4 \cdot h_4$	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	λ_0
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos^2 \beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{3,5}$	0,0332	-0,0651	0,0332	-0,0651	0,0332
$r_{2,5}$	-0,07900	-0,04717	-0,07900	-0,04717	-0,07900
$r_{1,5}$	-0,18066	-0,05624	-0,18066	-0,05624	-0,18066
$R_{1,5}$	0,0326	0,0032	0,0326	0,0032	0,0326
$T_{1,5}$	0,9674	0,9968	0,9674	0,9968	0,9674



Спектральная характеристика $R_{1,5} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β_1 (nh= λ 0/4)	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\beta_1$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{3,5}$	-0,0160	-0,0405	-0,0557	-0,0631	-0,0651	-0,0637	-0,0602	-0,0557	-0,0507
$r_{2,5}$	-0,1119	-0,0919	-0,0672	-0,0517	-0,0472	-0,0505	-0,0580	-0,0672	-0,0764
$r_{1,5}$	-0,1031	-0,0575	-0,0491	-0,0538	-0,0562	-0,0544	-0,0512	-0,0491	-0,0494
$R_{1,5}$	0,0106	0,0033	0,0024	0,0029	0,0032	0,0030	0,0026	0,0024	0,0024
$T_{1,5}$	0,9894	0,9967	0,9976	0,9971	0,9968	0,9970	0,9974	0,9976	0,9976



Трёхслойное просветляющее покрытие

2 вариант:

$$n_2 h_2 = n_4 h_4 = \lambda_0 / 4$$

$$n_3 h_3 = \lambda_0 / 2$$

$$n_2 h_2 = n_4 h_4 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

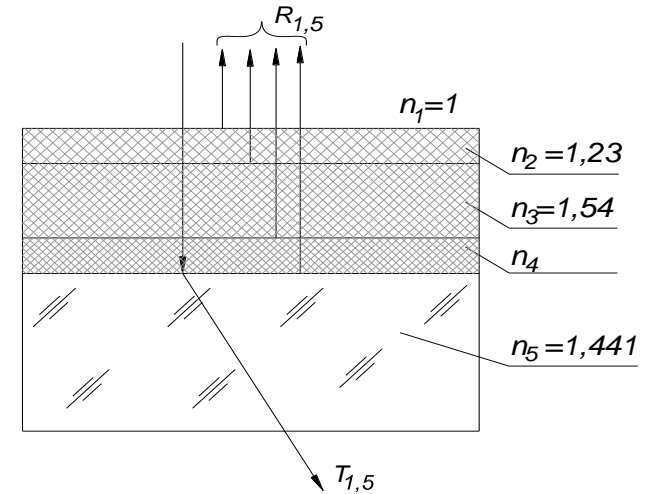
$$n_3 h_3 = \lambda_0 / 2 = 600 / 2 = 300 \text{ нм}$$

Находим показатель преломления n_4 :

$$n_5 < n_3 < n_4 > n_2 ; n_3 \geq n_2$$

$$1.441 < 1.54 < n_4 > 1.2$$

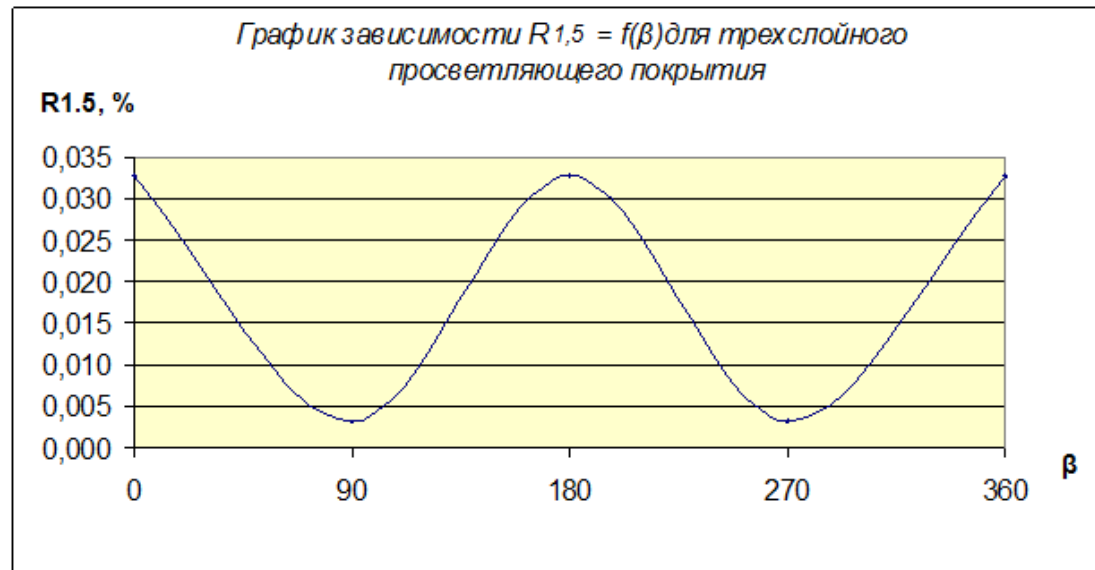
Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с наиболее близким показателем преломления для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$



Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{ мкм}$
Фтористый лантан LaF_3	1.59	И, ИЭ	1750	0,22–2

Спектральная характеристика $R_{1,5} = f(\beta)$

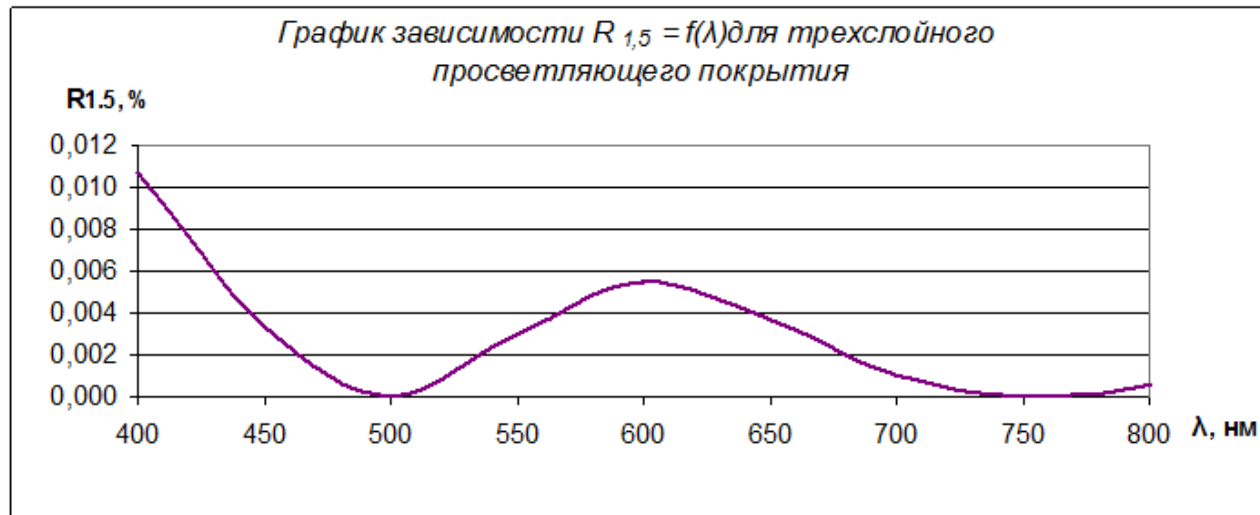
$n_4 \cdot h_4$	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	λ_0
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos 2\beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{3,5}$	0,0332	-0,0651	0,0332	-0,0651	0,0332
$r_{2,5}$	-0,07900	-0,04717	-0,07900	-0,04717	-0,07900
$r_{1,5}$	-0,18066	-0,05624	-0,18066	-0,05624	-0,18066
$R_{1,5}$	0,0326	0,0032	0,0326	0,0032	0,0326
$T_{1,5}$	0,9674	0,9968	0,9674	0,9968	0,9674



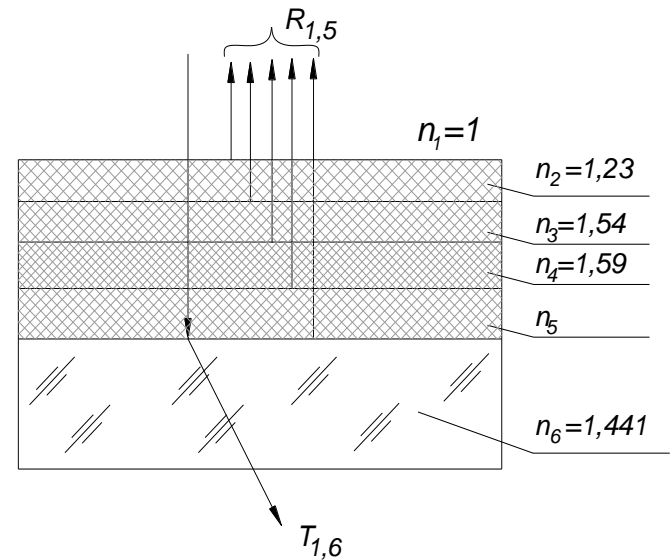
Спектральная характеристика $R_{1,5} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$\beta 1 (nh = \lambda 0/4)$	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\beta 2 (nh = \lambda 0/2)$	1,5000	1,3333	1,2000	1,0909	1,0000	0,9231	0,8571	0,8000	0,7500
$\cos^2 \beta 1$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$\cos^2 \beta 2$	-1,0000	-0,5000	0,3090	0,8413	1,0000	0,8855	0,6235	0,3090	0,0000
$r_{3,5}$	-0,0160	-0,0405	-0,0557	-0,0631	-0,0651	-0,0637	-0,0602	-0,0557	-0,0507
$r_{2,5}$	-0,0961	-0,0919	-0,1289	-0,1640	-0,1757	-0,1672	-0,1488	-0,1289	-0,1119
$r_{1,5}$	-0,1031	-0,0575	0,0011	0,0551	0,0739	0,0602	0,0314	0,0011	-0,0242
$R_{1,5}$	0,0106	0,0033	0,0000	0,0030	0,0055	0,0036	0,0010	0,0000	0,0006
$T_{1,5}$	0,9894	0,9967	1,0000	0,9970	0,9945	0,9964	0,9990	1,0000	0,9994

График зависимости $R_{1,5} = f(\lambda)$ для трехслойного просветляющего покрытия



Четырехслойное просветляющее покрытие



$$n_2 h_2 = n_3 h_3 = n_4 h_4 = n_5 h_5 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

Находим показатель преломления n_5 :

$$n_2 < n_6 < n_5 < n_4 > n_3$$

$$1,23 < 1,441 < n_5 < 1,59 > 1,54$$

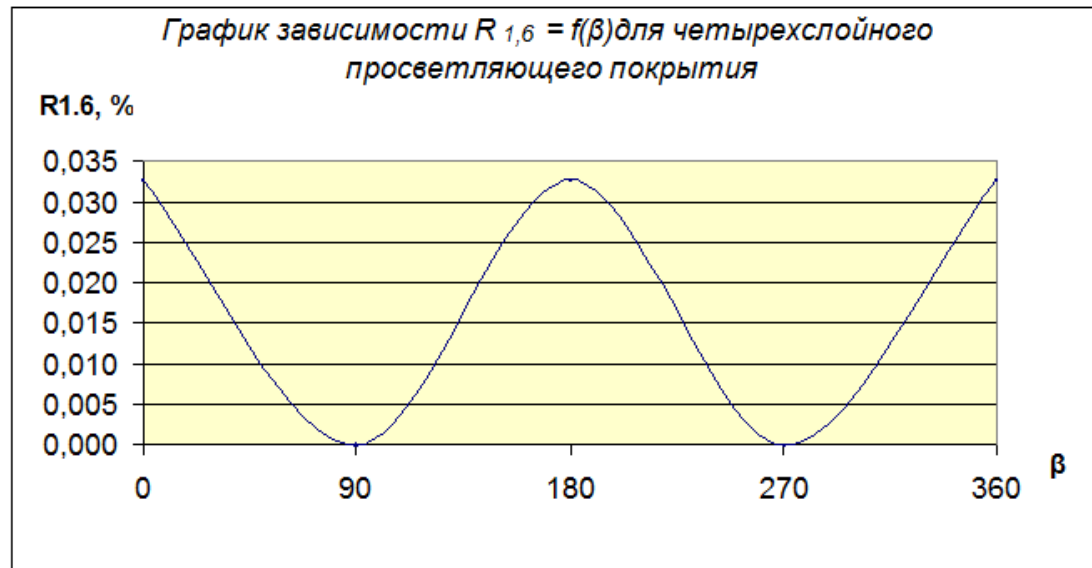
Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с наиболее близким показателем преломления для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$

Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{ мкм}$
Фтористый иттрий YF_3	1,54 – 1,56	И, ИЭ	1136	$\lambda_1 > 0.3$

$$n_5 = 1.54$$

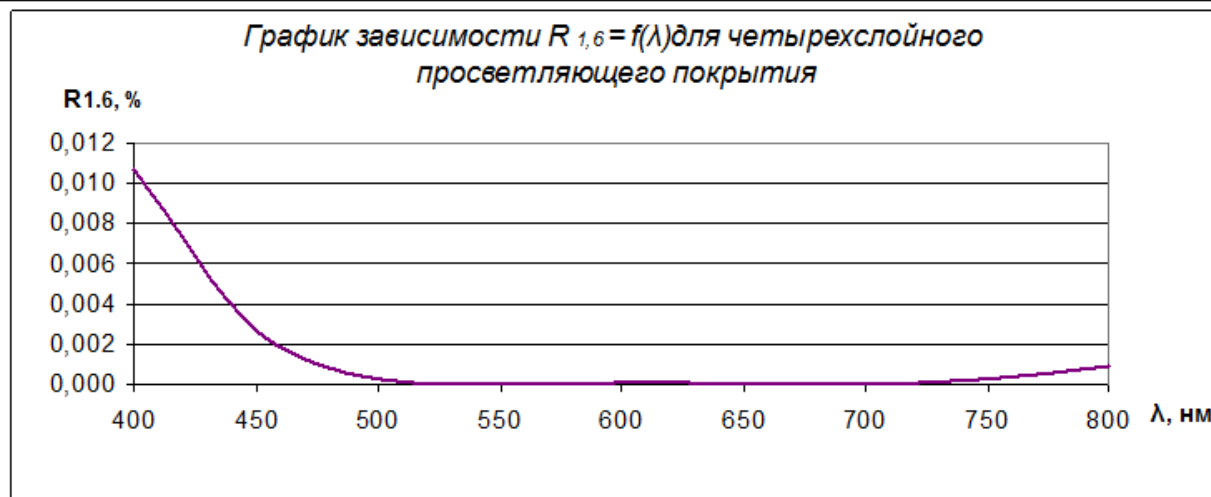
Спектральная характеристика $R_{1,6} = f(\beta)$

$n_4 \cdot h_4$	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	λ_0
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos 2\beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{4,6}$	0,0492	-0,0172	0,0492	-0,0172	0,0492
$r_{3,6}$	0,03321	0,00127	0,03321	0,00127	0,03321
$r_{2,6}$	-0,0790	-0,1132	-0,0790	-0,1132	-0,0790
$r_{1,6}$	-0,18066	0,01015	-0,18066	0,01015	-0,18066
$R_{1,6}$	0,0326	0,0001	0,0326	0,0001	0,0326
$T_{1,6}$	0,9674	0,9999	0,9674	0,9999	0,9674



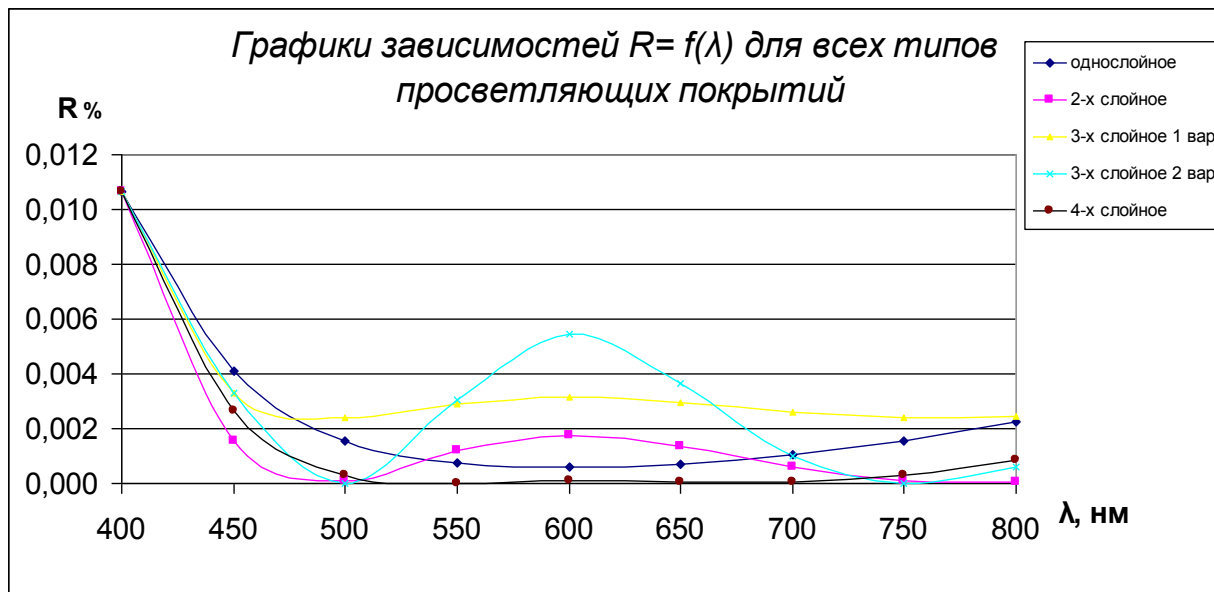
Спектральная характеристика $R_{1,6} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos^2 \beta$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{4,6}$	0,0160	-0,0006	-0,0109	-0,0159	-0,0172	-0,0163	-0,0140	-0,0109	-0,0075
$r_{3,6}$	-0,0160	-0,0157	-0,0072	-0,0007	0,0013	-0,0002	-0,0034	-0,0072	-0,0107
$r_{2,6}$	-0,1119	-0,1041	-0,1061	-0,1113	-0,1133	-0,1119	-0,1088	-0,1061	-0,1044
$r_{1,6}$	-0,1031	-0,0514	-0,0174	0,0037	0,0103	0,0056	-0,0051	-0,0174	-0,0296
$R_{1,6}$	0,0106	0,0026	0,0003	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0003	0,0009
$T_{1,6}$	0,9894	0,9974	0,9997	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	0,9997	0,9991
$R_{свод}$	0,0101	0,0025	0,0004	0,0000	0,000103	0,000024	0,000037	0,00034	0,9990



Анализ результатов расчетов

Для выбора оптимальной конструкции просветляющего покрытия построим графики спектральных зависимостей $R = f(\lambda)$ для всех типов покрытий в единой системе координат.



Оптимальной будет та конструкция, которая обеспечивает минимальный коэффициент отражения на рабочей длине волны $\lambda_0 = 600$ нм и более широкую зону просветления в заданной области спектра.

Таким образом, оптимальным является 4-х слойное оптическое покрытие.

Технологический процесс

Обозначим выбранную конструкцию просветляющего покрытия:

⊗ ВД – Просветл. 97ИЭ 112 ИЭ 97 ИЭ 110 ИЭ₁₅₀

$\lambda_0 = 600 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм};$

$c_{\min} = 0,006;$

$\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}.$

Материал подложки: ЛК-1 ГОСТ 3514–94;

$n_c = 1.441$

Технологический процесс включает следующие основные операции:

010 Очистка подложек.

020 Подготовка вакуумной камеры.

030 Ионная очистка подложек.

040 Нагрев подложек до фиксированной температуры.

050 Нанесение оптических покрытий:

051 Нанесение оптического покрытия YF_3 .

052 Нанесение оптического покрытия LaF_3 .

053 Нанесение оптического покрытия YF_3

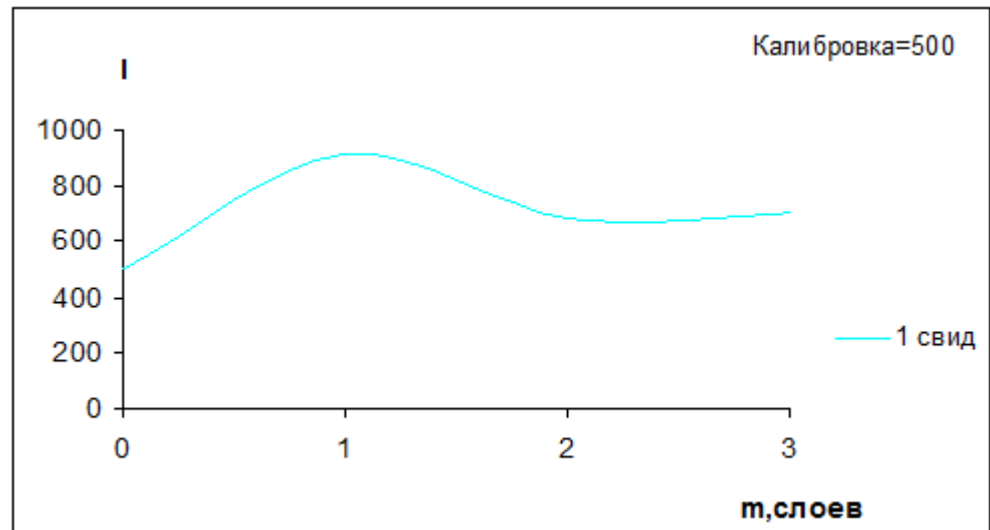
054 Нанесение оптического покрытия CaF_2 .

060 Разгерметизация вакуумной камеры, выгрузка готовых изделий.

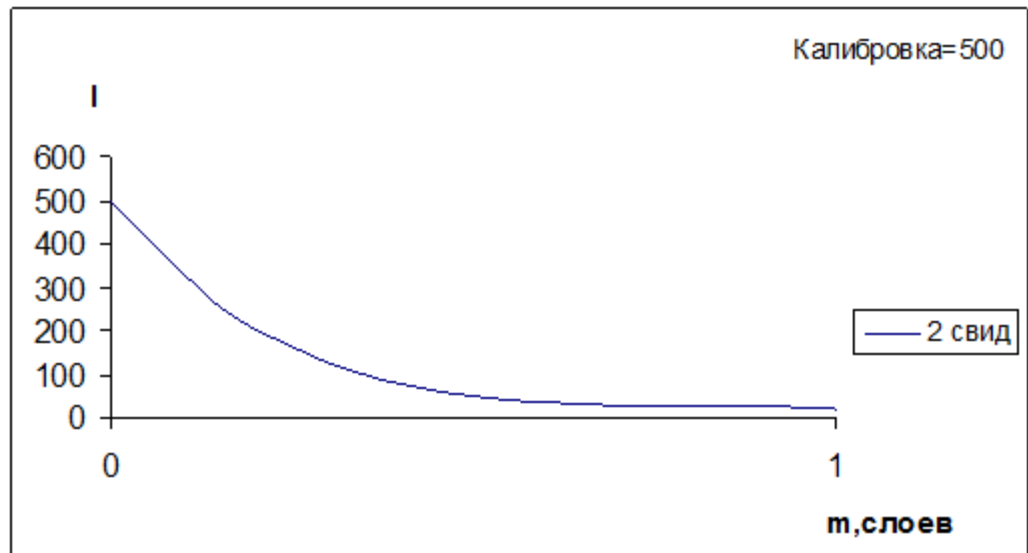
070 Контроль оптических параметров покрытия.

Графики зависимости от разности фаз

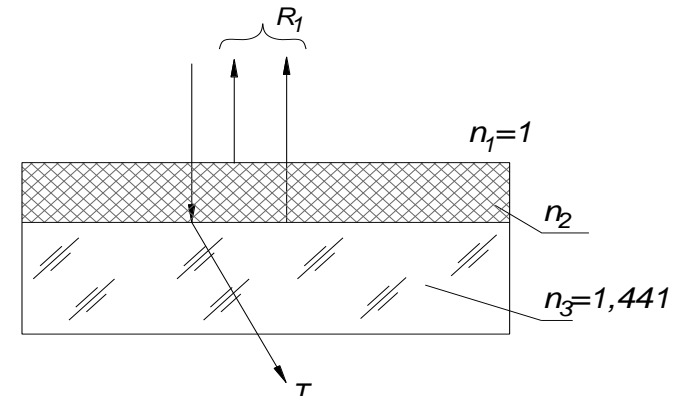
Для первого свидетеля
(на отражении):



Для второго свидетеля
(на отражении):



Однослойное отражающее покрытие



$$n_1 = 1; n_1 < n_2 > n_3; n_2 = n_{\text{ср}}; n_3 = n_{\text{н}}$$

$$n_2 h_2 = \lambda_0 / 4, n_2 h_2 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

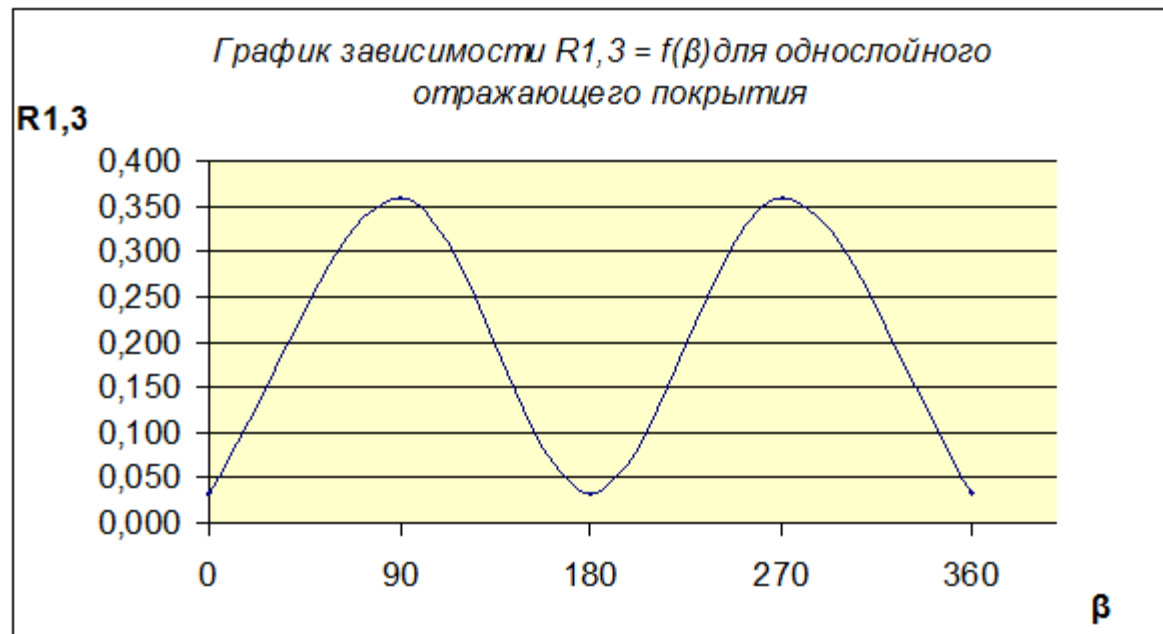
Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с максимальным показателем преломления для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$

Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{ мкм}$
Двуокись титана TiO_2	2.4	ИЭ	1640	0,35–12.

$$n_2 = 2.4$$

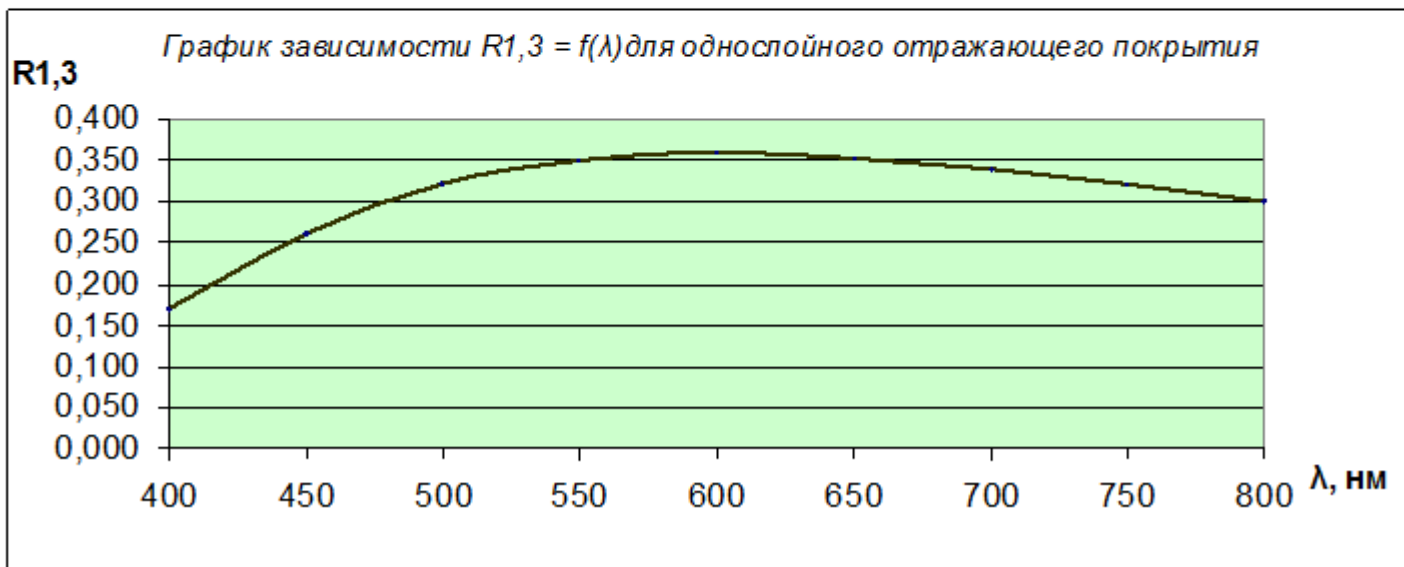
Спектральная характеристика $R_{1,3} = f(\beta)$

$n_2 \cdot h_2$	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	λ_0
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos 2\beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{1,3}$	-0,1807	-0,5998	-0,1807	-0,5998	-0,1807
$R_{1,3}$	0,0326	0,3597	0,0326	0,3597	0,0326
$T_{1,3}$	0,9674	0,6403	0,9674	0,6403	0,9674

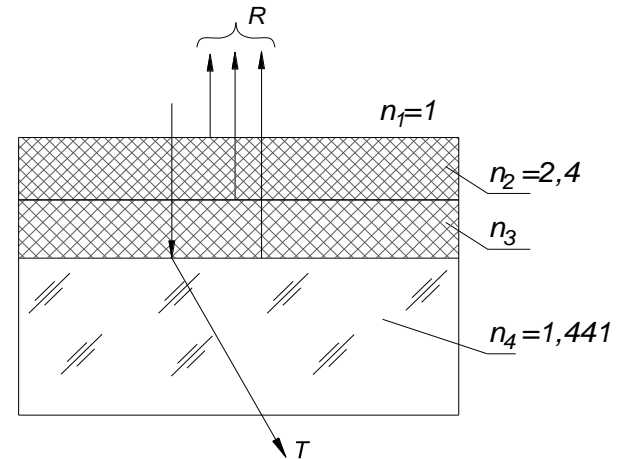


Спектральная характеристика $R_{1,3} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\beta$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{1,3}$	-0,4118	-0,5104	-0,5666	-0,5928	-0,5998	-0,5948	-0,5827	-0,5666	-0,5484
$R_{1,3}$	0,1696	0,2605	0,3211	0,3515	0,3597	0,3538	0,3396	0,3211	0,3008
$T_{1,3}$	0,8304	0,7395	0,6789	0,6485	0,6403	0,6462	0,6604	0,6789	0,6992



Двухслойное отражающее покрытие



$$n_2 h_2 = n_3 h_3 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

$$n_2 = n_B$$

$$n_3 = n_H$$

Находим показатель преломления n_3 :

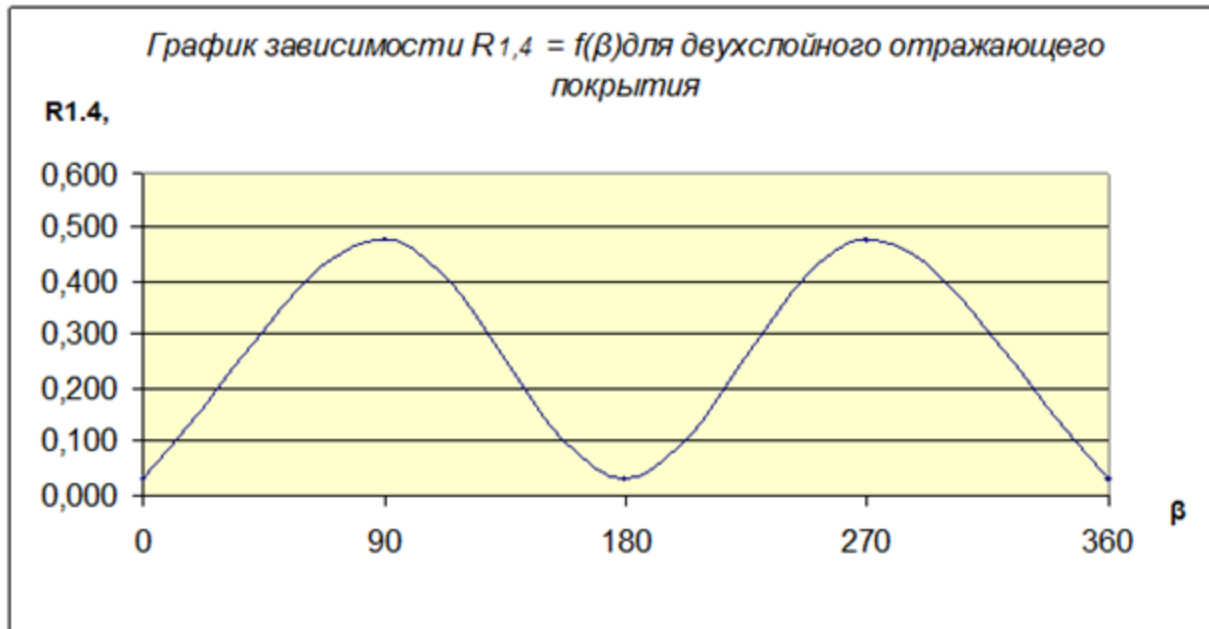
Из таблицы плёнкообразующих материалов выбираем материал с минимальным показателем преломления для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$:

Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{ мкм}$
фтористый кальций CaF_2	1,23 – 1,46	И, ИЭ	1360	0,15–12.

$$n_3 = 1,23$$

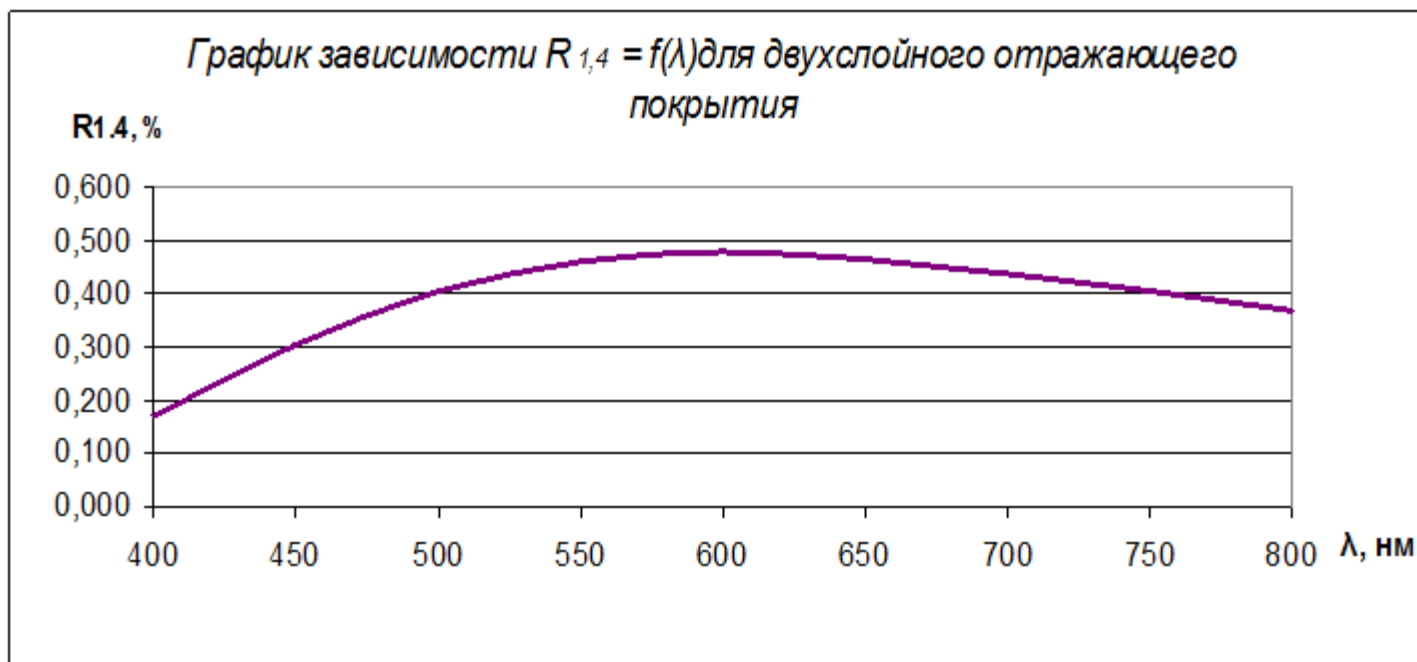
Спектральная характеристика $R_{1,4} = f(\beta)$

$n_2 \cdot h_2$	0	$\lambda 0/4$	$\lambda 0/2$	$3 \lambda 0/4$	$\lambda 0$
β	0	$\underline{p}/2$	\underline{p}	$3p/2$	$2p$
$\cos 2\beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{2,4}$	0,2497	0,3913	0,2497	0,3913	0,2497
$r_{1,4}$	-0,18066	-0,69166	-0,18066	-0,69166	-0,18066
$R_{1,4}$	0,0326	0,4784	0,0326	0,4784	0,0326
$T_{1,4}$	0,9674	0,5216	0,9674	0,5216	0,9674

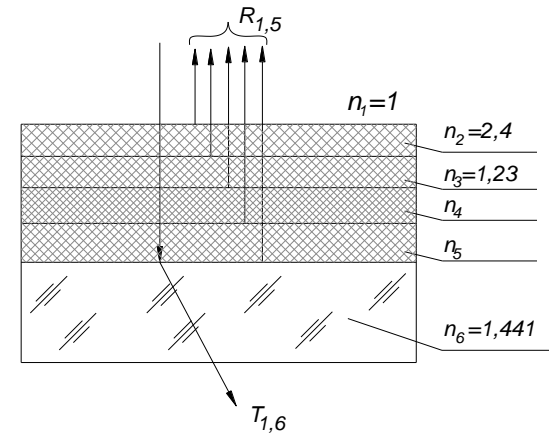


Спектральная характеристика $R_{1,4} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\beta$	0,000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{2,4}$	0,3223	0,3573	0,3784	0,3886	0,3913	0,3894	0,3847	0,3784	0,3715
$r_{1,4}$	-0,4118	-0,5499	-0,6375	-0,6802	-0,6917	-0,6834	-0,6636	-0,6375	-0,6086
$R_{1,4}$	0,1696	0,3024	0,4065	0,4627	0,4784	0,4671	0,4404	0,4065	0,3704
$T_{1,4}$	0,8304	0,6976	0,5935	0,5373	0,5216	0,5329	0,5596	0,5935	0,6296



Четырехслойное отражающее покрытие



$$n_2 h_2 = n_3 h_3 = n_4 h_4 = n_5 h_5 = \lambda_0 / 4 = 600 / 4 = 150 \text{ нм}$$

$$n_2 = n_B; n_3 = n_H; n_4 = n_B; n_5 = n_H$$

Находим показатели преломления n_4 и n_5 :

Из таблицы плёнообразующих материалов выбираем материалы с максимальным $n_B = n_4$ и минимальным показателем преломления $n_H = n_5$ для заданного диапазона $\lambda_1 - \lambda_2 = 400 - 800 \text{ нм}$

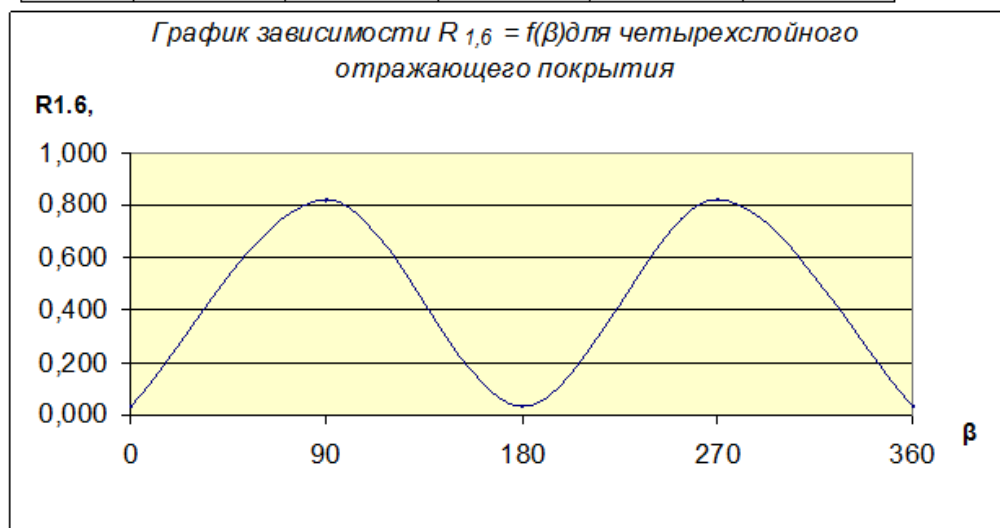
Пленкообразующий материал	Показатель преломления слоя, n	Методы нанесения	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ \text{C}$	Область спектра, $\lambda_1 - \lambda_2, \text{мкм}$
Двуокись титана TiO_2	2.4	ИЭ	1640	0,35–12.
фтористый кальций CaF_2	1,23 – 1,46	И, ИЭ	1360	0,15–12.

$$n_4 = 2,4$$

$$n_5 = 1,23$$

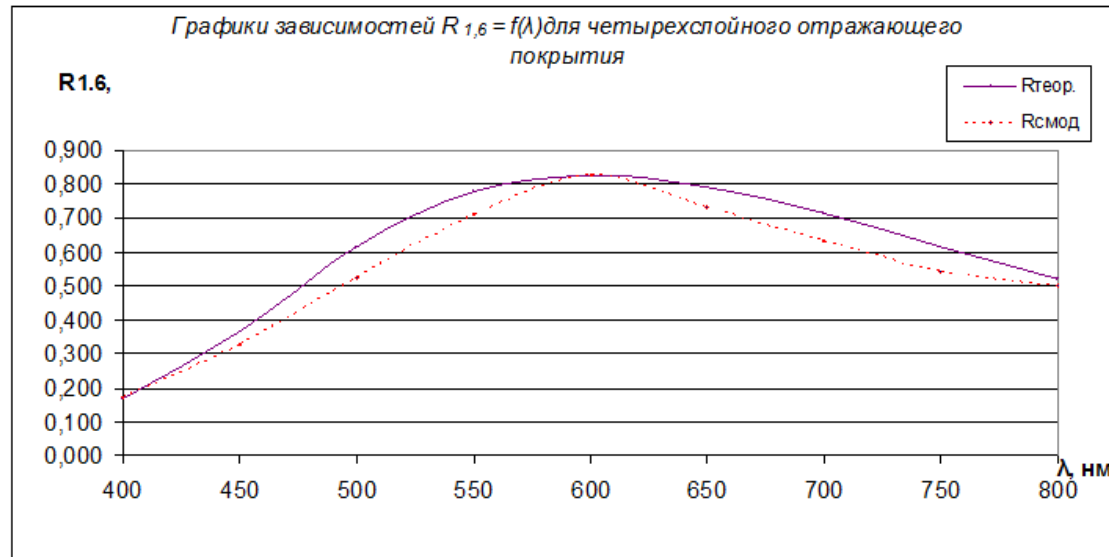
Спектральная характеристика $R_{1,6} = f(\beta)$

$n_4 \cdot h_4$	0	$\lambda 0/4$	$\lambda 0/2$	$3 \lambda 0/4$	$\lambda 0$
β	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\cos 2\beta$	1	-1	1	-1	1
$r_{4,6}$	0,2497	0,3913	0,2497	0,3913	0,2497
$r_{3,6}$	-0,07900	-0,63372	-0,07900	-0,63372	-0,07900
$r_{2,6}$	0,2497	0,7939	0,2497	0,7939	0,2497
$r_{1,6}$	-0,18066	-0,90862	-0,18066	-0,90862	-0,18066
$R_{1,6}$	0,0326	0,8256	0,0326	0,8256	0,0326
$T_{1,6}$	0,9674	0,1744	0,9674	0,1744	0,9674



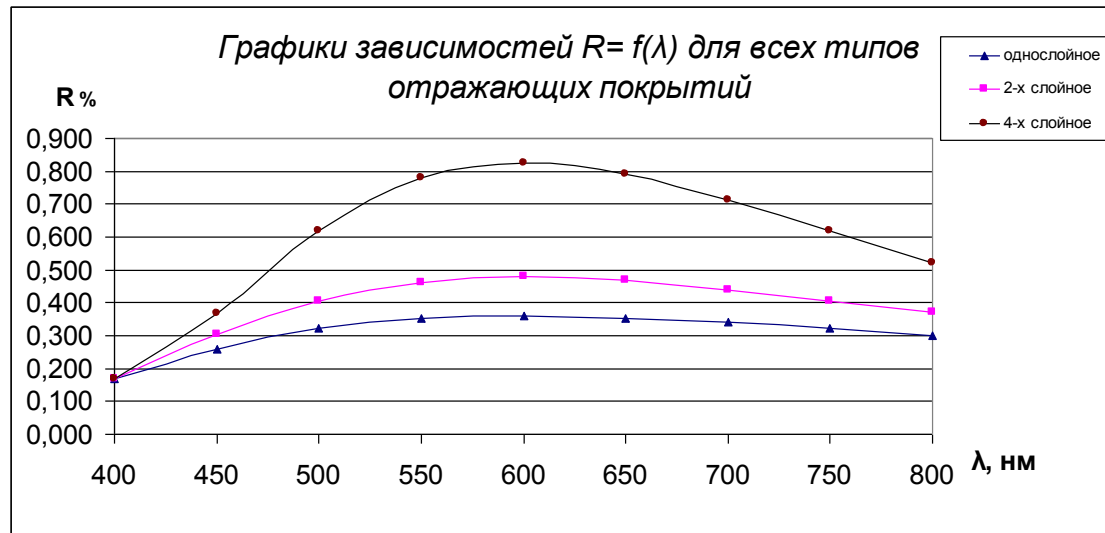
Спектральная характеристика $R_{1,6} = f(\lambda)$

λ , нм	400	450	500	550	600	650	700	750	800
β	0,7500	0,6667	0,6000	0,5455	0,5000	0,4615	0,4286	0,4000	0,3750
$\cos 2\beta$	0,0000	-0,5000	-0,8090	-0,9595	-1,0000	-0,9709	-0,9010	-0,8090	-0,7071
$r_{4,6}$	0,3223	0,3573	0,3784	0,3886	0,3913	0,3894	0,3847	0,3784	0,3715
$r_{3,6}$	-0,3223	-0,4737	-0,5720	-0,6206	-0,6337	-0,6243	-0,6017	-0,5720	-0,5393
$r_{2,6}$	0,3223	0,5195	0,6832	0,7700	0,7939	0,7767	0,7358	0,6832	0,6267
$r_{1,6}$	-0,4118	-0,6066	-0,7857	-0,8822	-0,9086	-0,8897	-0,8443	-0,7857	-0,7230
$R_{1,6}$	0,1696	0,3680	0,6173	0,7783	0,8256	0,7915	0,7128	0,6173	0,5227
$T_{1,6}$	0,8304	0,6320	0,3827	0,2217	0,1744	0,2085	0,2872	0,3827	0,4773
$R_{сמוד}$	0,1737	0,3290	0,5236	0,7086	0,8248	0,7340	0,6335	0,5442	0,5000



Анализ результатов расчетов

Для выбора оптимальной конструкции отражающего покрытия построим графики спектральных зависимостей $R = f(\lambda)$ для всех типов покрытий в единой системе координат



Оптимальной будет та конструкция, которая обеспечивает максимальный коэффициент отражения на рабочей длине волны $\lambda_0 = 600$ нм и более широкую зону отражения в заданной области спектра.

Таким образом, оптимальным является 4-х слойное оптическое покрытие.

Технологический процесс

Технологический процесс включает следующие основные операции:

010 Очистка подложек.

020 Подготовка вакуумной камеры.

030 Ионная очистка подложек.

040 Нагрев подложек до фиксированной температуры.

050 Нанесение оптических покрытий:

051 Нанесение оптического покрытия CaF_2 .

052 Нанесение оптического покрытия TiO_2 .

053 Нанесение оптического покрытия CaF_2 .

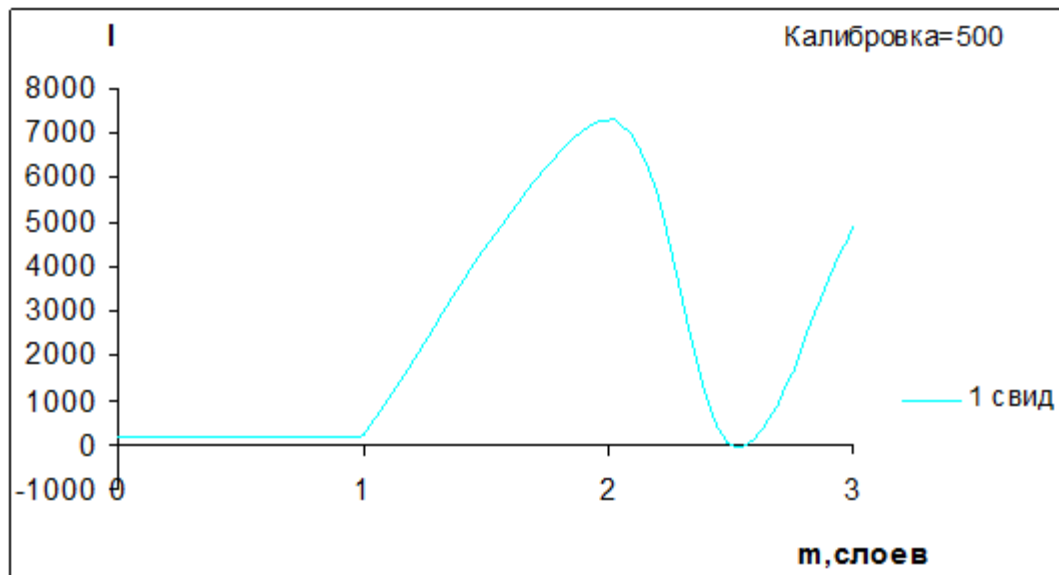
054 Нанесение оптического покрытия TiO_2 .

060 Разгерметизация вакуумной камеры, выгрузка готовых изделий.

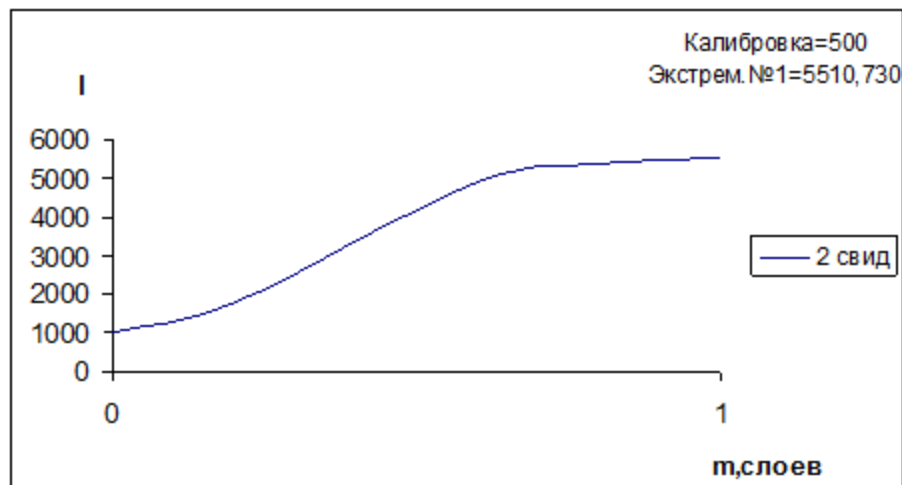
070 Контроль оптических параметров покрытия.

Графики зависимости от разности фаз

Для первого свидетеля
(на отражении):



Для второго свидетеля
(на отражении):



Результаты работы

В ходе данной работы были изучены основные характеристики многослойных просветляющих и отражающих покрытий. Были сделаны расчеты просветляющего и отражающего покрытий, от однослойного до четырехслойного (многослойного). Произведен анализ расчетов для определения наилучшего количества слоев. Для каждого из видов покрытий составлен и описан технологический процесс, на основании которого получены данные зависимости количества слоев от разности фаз.

Список литературы

- Справочник технолога-оптика/ М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгоджин и др.; под редакцией М.А. Окатова. – 2-е издание, переработанное и дополненное – СПб.: Политехника, 2009–679 с.
- Оптические покрытия, Гриднева Г.Н.
- М. Борн, Э. Вольф: Основы Оптики, Москва (1973).
- G. Franceschetti, «Scattering from plane layered media», IEEE Trans. Antennas Propag., 12, 754-763 (1964).

Спасибо за внимание