УДК 535.345.6

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛАХ ФИЛЬТРА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ

И. Н. Шкляревский, Е. А. Лупашко, В. И. Храмцова и *Р. И. Умеров*

Измерено поглощение света в многослойных диэлектрических зеркалах. Оказалось, что коэффициент поглощения зеркал при числе слоев $K > 5$ практически не зависит от K. Показано, что основной вклад в поглощение многослойных зеркал вносят слои, обращенные к падающему свету. Интенсивность полосы пропускания фильтра в основном зависит от поглощения света в центральных слоях.

Введение

Коэффициент пропускания $T_ф$ интерференционного фильтра в максимуме полосы пропускания может быть представлен

$$T_ф = \frac{T^2 e^{-kt}}{(1 + Re^{-kt})^2} \simeq \frac{1}{\left(1 + \frac{A}{T} + \frac{kt}{T}\right)^2}, \qquad (1)$$

где R, T и $A = 1 - R - T$ — соответственно коэффициенты отражения, пропускания и поглощения зеркал фильтра со строго одинаковыми оптическими характеристиками, а k и t — коэффициент поглощения и толщина центрального слабопоглощающего ($kt \ll 1$) слоя фильтра. Как следует из (1), при больших R (сколь бы мало ни было поглощение света в зеркалах и центральном слое) $A + kt$ может оказаться больше T и коэффициент пропускания $T_ф$ резко уменьшается. В связи с этим нет необходимости подчеркивать важность измерений коэффициентов поглощения A и поисков путей их уменьшения.

Поглощение света в девятислойных зеркалах из четвертьволновых слоев сернистого цинка и криолита измерялось в [1]; найдено, что $A = 0.007$. В [2] измерялись величины A для нескольких семи- и девятислойных зеркал из слоев сернистого цинка и фтористого магния: у первых A лежит в интервале $0.0031 \div 0.0066$, у вторых — $0.0042 \div 0.0050$. Подсчитанное нами для тех и других зеркал среднее значение $A = 0.0046$. Ниже излагаются результаты наших исследований.

Эксперимент

Использованная методика измерений коэффициентов поглощения многослойных диэлектрических зеркал сходна с [1]. Рассмотрим зеркала, состоящие из нечетного числа чередующихся четвертьволновых слоев с высоким (H) и низким (L) показателем преломления n. Центральный слой $2L$ фильтра наносится при этом из вещества с низким n. Поскольку в видимой области спектра слои H обладают несравненно большим поглощением света, чем слои L, поглощением света в центральном слое фильтра можно пренебречь, т. е. положить в (1) $k = 0$. Тогда из (1)

$$A = \frac{T}{\sqrt{T_ф}}(1 + \sqrt{T_ф}), \qquad (2)$$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

и определение поглощения света в зеркале сводится к измерению $T_ф$ фильтра и T зеркал для длины волны λ_0, соответствующей максимуму полосы пропускания фильтра.

Заметим, что коэффициент отражения R в (1) относится к границе центральный слой—зеркало, а входящий в (1) и (2) коэффициент пропускания T должен быть измерен для зеркала, ограниченного подложкой и веществом центрального слоя. Коэффициент поглощения A определяет поглощение света, распространяющегося от центрального слоя фильтра.

Интерференционный фильтр и зеркала изготовлялись осаждением в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. чередующихся четвертьволновых слоев сернистого цинка и криолита. В качестве подложки для фильтра использовалась стеклянная пластинка размером 15×15 мм ($n=1.52$), а для зеркал — такого же размера пластинки из фтористого лития ($n=1.39$).

Подложки (№ 1 и № 3) для зеркал помещались на держателе рядом со стеклянной подложкой (№ 2) по обе стороны от нее. Вначале подложка № 3 экранировалась, а на подложки № 1 и № 2 осаждались многослойные зеркала. Затем зеркало № 1 закрывалось экраном, а на № 2 осаждался слой $2L$. И, наконец, подложка № 3 открывалась и на нее и на № 2 осаждалось второе зеркало. Сразу же после извлечения из вакуумкамеры к верхним слоям всех трех образцов приклеивались канадским бальзамом такие же, как № 2, стеклянные пластинки.

Пропускание фильтра измерялось на спектрографе ДФС-4 относительно таких же, как у фильтра, склеенных канадским бальзамом чистых стеклянных пластинок. Интенсивность света регистрировалась ФЭУ-17 А. При этом влияние возможных неоднородностей [3] устранялось: щель ДФС-4 выбирала такой участок фильтра, который давал ровную «монохроматическую» полосу пропускания. Измерение пропускания зеркал производилось на спектрофотометре СФ-4 относительно склеенных канадским бальзамом таких же как и у зеркал, пластинок стекла и фтористого лития для λ_0, соответствующей максимуму полосы пропускания фильтра. В дальнейшем использовались только те зеркала, у которых коэффициенты пропускания $T_1=T_2$. Произведенная нами оценка показала, что замена в зеркалах криолита фтористым литием вносит ошибку в A, лежащую за пределами точности измерений.

Таблица 1

K	λ_0, Å	T_1	T_2	$T_ф$	A
5	5610	0.153	0.150	0.980	0.0015
5	5522	0.161	0.162	0.952	0.0040
5	5495	0.150	0.150	0.962	0.0028
7	5323	0.041	0.035	0.910	0.0018
7	5836	0.057	0.063	0.932	0.0022
7	5823	0.057	0.053	0.920	0.0024
9	5731	0.020	0.025	0.730	0.0038
9	5550	0.020	0.020	0.696	0.0040
11	6261	0.005	0.005	0.500	0.0022
11	5035	0.006	0.010	0.486	0.0036
11	5550	0.006	0.006	0.490	0.0026

В табл. 1 приведены усредненные по многим измерениям величины $T_ф$, T_1, T_2 и найденные по (2) A для ряда многослойных зеркал с различным числом слоев K. Там же указаны значения λ_0 для максимумов полос пропускания фильтров. Заметим, что с ростом K, т. е. с уменьшением T зеркал, точность определения A падает.

С помощью метода [4] был измерен коэффициент поглощения k слоев сернистого цинка толщиной 0.75λ и 4λ ($\lambda=5600$ Å). В обоих случаях $k=100$ см$^{-1}$.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

Расчеты и обсуждение

Анализ результатов измерений приведенных в табл. 1 коэффициентов поглощения A показывает, что последние не зависят от числа слоев многослойника. То же самое получено и в [2], хотя автор [2] на это не обратил внимание. Такой результат на первый взгляд кажется удивительным. Именно поэтому мы решили рассчитать коэффициенты поглощения для многослойных покрытий с различным числом слоев K. При расчетах мы пренебрегли поглощением света в слоях криолита; если оно и есть, то настолько мало, что в тонких слоях не поддается измерению.

С помощью рекуррентных формул Власова [5], в которых уменьшение амплитуды при каждом прохождении света через слои сернистого цинка было учтено введением соответствующего множителя $\sqrt{\eta}=\exp(-kt/2)$, были рассчитаны коэффициенты пропускания T и отражения R (на границе криолит—зеркало) многослойных покрытий. Расчет произведен для $\lambda_0=5600$ Å, $n_H=2.3$ и $n_L=1.33$. По рассчитанным значениям T и R находились

$$A=1-R-T \tag{3}$$

и

$$T_ф=\frac{T^2}{(1-R)^2}. \tag{4}$$

Таблица 2

K	T	A	$T_ф$
5	0.14117	0.00206	0.970
7	0.04744	0.00213	0.919
9	0.01541	0.00215	0.765
11	0.00494	0.00216	0.496
13	0.00158	0.00216	0.177

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как следует из сравнения данных таблиц, наблюдается хорошее согласие между измеренными и рассчитанными величинами T, $T_ф$ и A. Таким образом, и рассчитанные значения коэффициентов поглощения многослойных покрытий не зависят от числа K, практически начиная с $K>5$.

Из выполненных Веремеем и Минковым [6] расчетов распределения интенсивности в слоях диэлектрического зеркала автоматически вытекает, что основной вклад в поглощение вносят обращенные к падающему свету слои. В рассматриваемом нами случае интерференционных фильтров основной вклад в поглощение должны вносить слои, граничащие с центральным (непоглощающим) слоем.

Сделаем следующие расчеты. Схематически интерференционный фильтр ($K=7$) может быть представлен

$$DH_1LH_2LH_3LH_4 2LH_5LH_6LH_7LH_8D \tag{5}$$

где D — стеклянные пластинки. Пусть в исходном случае все слои прозрачны. Обозначим поглощающие слои с высоким показателем преломления через H' и рассмотрим следующие зеркала ($K=7$):

$$\left.\begin{array}{ll} DH_1LH_2LH_3LH_4 2L & (N=0), \\ DH_1'LH_2LH_3LH_4 2L & (N=1), \\ DH_1'LH_2'LH_3LH_4 2L & (N=2), \\ DH_1'LH_2'LH_3'LH_4 2L & (N=3), \\ DH_1'LH_2'LH_3'LH_4' 2L & (N=4). \end{array}\right\} \tag{6}$$

Мы рассчитали по формулам Власова T и R, а по (3) A для зеркал типа (6) с различным числом слоев K и построили зависимость A от N. Эта зависимость приведена на рис. 1. Как следует из рис. 1, проведенные расчеты полностью подтвердили наше предположение.

Проделывая такие же расчеты по (4) для фильтров типа (5), в которых слои H постепенно заменяются слоями H', можно построить зависимость $T_ф$ от N, как это сделано на рис. 2. Из этого рисунка следует, что на интенсивность пропускания интерференционных фильтров основное влияние оказывает поглощение света в слоях, прилегающих к центральному зазору.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

Поглощение света во внешних слоях практически не сказывается на величине $T_ф$. Отсюда следует, что при изготовлении фильтров особое внимание нужно обращать на качество центральных слоев.

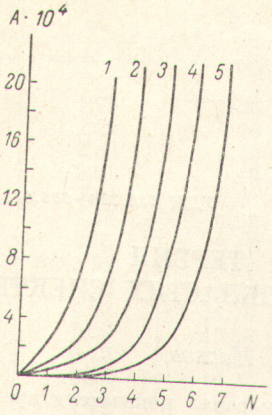

Рис. 1. Зависимость A от N зеркал.

1÷5 соответствуют K=5, 7, 9, 11 и 13.

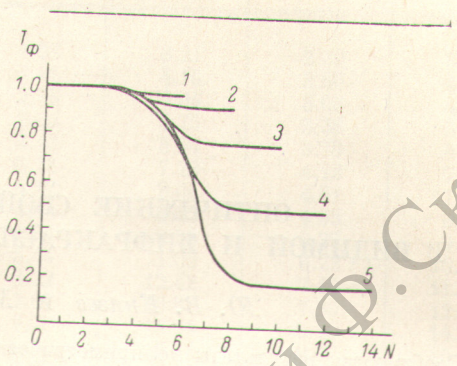

Рис. 2. Зависимость $T_ф$ от N фильтров.

1÷5 соответствуют K=5, 7, 9, 11 и 13.

Заметим, что найденные нами значения A ниже, чем в [1,2]. Как следует из изложенного, при прочих равных условиях это может быть объяснено различным качеством сернистого цинка. Так, например, в [4] коэффициент поглощения исследованных слоев сернистого цинка в шесть раз выше, чем в нашем случае.

Литература

[1] J. M. Stone. J. Opt. Soc. Am., *43*, 927, 1958.
[2] A. R. Cownie. J. Opt., Soc. Am., *50*, 289, 1960.
[3] И. Н. Шкляревский, Р. И. Умеров, Е. А. Лупашко, В. И. Храмцова. Опт. и спектр., *35*, 356, 1973.
[4] С. П. Ляшенко, В. К. Милославский. Опт. и спектр., *16*, 151, 1964.
[5] И. В. Гребенщиков, А. Г. Власов, Б. С. Непорент, Н. В. Суйковская. Просветление оптики. Гостехиздат, М.—Л., 1946.
[6] В. В. Веремей, И. М. Минков. Опт. и спектр., *33*, 1175, 1972.

Поступило в Редакцию 24 ноября 1973 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины