

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.417; 681.7.064.43

МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. Г. А. Муранова, канд. техн. наук; Д. А. Виденичев; А. В. Михайлов, канд. техн. наук

Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Выполнены расчеты и определены конструкции многослойных оптических покрытий для эффективной защиты органов зрения и аппаратуры от нескольких лазерных излучений в области 320–1600 нм одновременно. Приведены расчетные спектральные характеристики фильтров для блокирования излучения на четырех длинах волн (355, 532, 1064 и 1540 нм) и шести длинах волн (355, 532, 694, 1064, 1315 и 1540 нм) лазерных излучений. Оптическая плотность в зонах подавления не менее трех. Пропускание в видимой области спектра порядка 50%. В производственных условиях изготовлены опытные партии покрытий, приведены результаты испытаний.

Ключевые слова: оптические покрытия, зеркала, фильтры, лазеры, лазерное излучение, средства защиты

Коды OCIS: 350.2460, 310.1620

Поступила в редакцию 08.12.2011

Средства защиты от лазерного излучения появились практически сразу после создания лазеров. Это защитные очки, щитки, маски, шлемы, козырьки, представляющие собой различные типы фильтров, блокирующих лазерное излучение определенных частот и определенной мощности. Блокировка излучения происходит либо вследствие поглощения излучения заданной длины волны, либо за счет его отражения. Поглощение в цветных светофильтрах создается путем введения в материалы примесей, красителей, пигментов, полупроводниковых элементов. Поглощенный свет преобразуется в тепло, вследствие чего такие устройства не подходят для защиты от мощного лазерного излучения. В качестве отражающих систем используются различные виды оптических покрытий. Это диэлектрические зеркала, поляризаторы, светоделители, полосовые, режекторные, отрезающие фильтры, брэгговские решетки и другие устройства, схемы и конструкции которых весьма многочисленны и разнообразны [1]. Используются как конструкции из слоев равной оптической

толщины, так и различные неравнослойные конструкции. Как правило, такие покрытия создаются для блокирования лазерного излучения одной определенной частоты.

В настоящей статье рассмотрена возможность создания оптических покрытий для защиты от лазерного излучения нескольких длин волн одновременно. Для защиты глаз наблюдателя (или фотоэлектрического приемника излучения) от засветки интенсивным лазерным импульсом значение коэффициента отражения фильтров в сравнительно узких областях спектра должно быть близким к единице. Фильтр, обеспечивающий практически полное отражение излучения, будет иметь большую оптическую плотность в заданной полосе частот. Не менее важным является требование высокой прозрачности покрытия вне полосы отражения, так как остальная часть спектра используется для получения информационного сигнала глазом или фотоприемником. Очевидно, что это возможно только при значительном уменьшении полосы отражения зеркала в видимой области спектра. Это требование ведет

к значительному усложнению задачи, решение которой возможно лишь при сочетании оптических модулей зеркал с различной конструкцией слоев и разных порядков их нанесения.

Для получения зеркал с высоким отражением обычно используются системы

$$\text{П(ВН)}^k\text{В} \quad (1)$$

или

$$\text{П(ВН)}^{k+1}\text{Н}. \quad (2)$$

Символом П обозначена подложка, символами В и Н – четвертьволновые пленки с, соответственно, высоким и низким показателями преломления, k – параметр кратности, определяющий общее количество слоев в системе, равный $N = 2k + 1$ и $N = 2k + 3$ соответственно. Система (2) отличается от (1) наличием полуволнового слоя поверх основной первой системы. Последний слой второй системы выполняет, в основном, защитные функции, так как в качестве слоя с низким показателем преломления обычно используется пленка SiO_2 с достаточно высокой как механической, так и лучевой прочностью.

Для повышения пропускания в рабочей области прозрачности, с условием сохранения области высокого отражения, можно использовать различные конструкции покрытий, например

$$\text{П}(0,5\text{ВН } 0,5\text{В})^k \text{ или } \text{П}(0,5\text{НВ } 0,5\text{Н})^k \quad (3)$$

либо

$$\text{П(ВН)}^k \text{В } 0,5\text{Н}. \quad (4)$$

Основу этих конструкций составляет система (1), что обеспечивает получение полосы с высокими значениями отражения. Оптическая толщина крайних слоев изменена, что позволяет получать высокую прозрачность в полосе пропускания. Системы (3) используются в случае необходимости получения максимально возможной прозрачности с длинноволновой стороны относительно полосы отражения, а конструкция (4) – для достижения наивысшей прозрачности с коротковолновой стороны.

Для решения поставленной задачи требуется повышение прозрачности оптических систем как с длинноволновой, так и с коротковолновой стороны относительно полосы высокого отражения.

Ширина полосы высокого отражения интерференционного зеркала определяется разно-

стью показателей преломления чередующихся слоев и порядком интерференции используемого максимума. Чем меньше разность показателей преломления и выше порядок интерференции, тем уже полоса отражения. В качестве пленкообразующих материалов для зеркал, подавляющих лазерное излучение, необходимо использовать слои с повышенной лазерной прочностью. При конструировании узкополосного отражающего фильтра следует учитывать, что полоса высокого отражения не должна быть слишком узкой, так как существует зависимость спектральных характеристик от угла падения света. Смещение полосы отражения при увеличении угла падения в сторону коротких волн различно для разных конструкций слоев. Оно возрастает с уменьшением значений показателей преломления слоев и с уменьшением толщины слоев с высоким показателем преломления. Смещение спектральных характеристик зеркал в пределах $0-30^\circ$, как правило, не сопровождается заметным изменением формы полосы. При увеличении угла падения до 45° заметно увеличивается степень поляризации света с увеличением числа отражений.

Смещение полосы отражения зеркала зависит также от пористости составляющих зеркало слоев, определяемой как свойствами пленкообразующего материала, так и технологией изготовления слоев [2].

С учетом этого были выполнены расчеты и определены конструкции блокирующих фильтров с оптической плотностью не менее 3 для часто используемых в приборах шести лазерных длин волн 355, 532, 694, 1064, 1315 и 1540 нм. Пропускание в видимой области спектра у этих фильтров не менее 50%.

Расчеты и поиск конструкций покрытий для подавления лазерного излучения выполнены по программе Analyst [3], использующей рекуррентные формулы [4] для расчета оптических характеристик покрытий и колориметрические методы [5] для определения цветовых параметров и визуального коэффициента пропускания рассчитываемых систем. На их основании предложены две различные основные конструкции фильтров

$$\text{П(В } 2\text{Н)}^k \text{ВН} \quad (5)$$

и

$$\text{П(НВ)}^k 0,5\text{Н}. \quad (6)$$

Для повышения прозрачности фильтра в коротковолновой и длинноволновой областях спектра относительно полосы высокого отра-

жения на длине волны 532 нм в основную конструкцию фильтра введены дополнительные слои, просветляющие соответствующие границы раздела фильтр–подложка и фильтр–воздух в заданных областях спектра

$$\Pi(V_1N)^2(VN)^{13}V_1NV_12N. \quad (7)$$

Для блокирования лазерного излучения на длинах волн 355 и 1064 нм использовалась аналогичная конструкция узкополосного отражающего фильтра, с той разницей, что увеличение прозрачности системы требуется только с коротковолновой стороны относительно полосы максимального отражения на 1064 нм

$$\Pi(V_1N)^2(VN)^{14}V0,5N. \quad (8)$$

Для блокирования излучений на 694 и 1315 нм и повышения пропускания фильтра в видимой области спектра (370–640 нм) использовалась неравнотолщинная конструкция фильтра

$$\Pi(V2N)^{16}V0,5N. \quad (9)$$

На основе конструкций (7–9) при введении дополнительных согласующих и просветляющих слоев рассчитано покрытие Ф1, спектральное пропускание которого с учетом внутреннего пропускания подложек показано на рис. 1. Покрытие блокирует лазерное излучение на шести длинах волн (355, 532, 694, 1064, 1315 и 1540 нм) за счет высокого отражения в этих областях спектра. По форме спектральной характеристики можно сказать, что рассчитанные покрытия в отраженном свете представляют собой полосовые отражающие фильтры, а в проходящем – полосовые, или П-образные фильтры. Подобные системы характеризуют иногда как диэлектрические зеркала с повышенной избирательной способностью [6]. В соответствии с отраслевыми стандартами их можно назвать специальными фильтрами С.

Расчетная полуширина полосы отражения зеркала Ф1 в области 532 нм составляет 40 нм, $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_0 = 0,077$, а $\Delta\lambda_{0,01}/\lambda_0 = 0,05$, где $\Delta\lambda_{0,5}$ – область спектра, в которой значение коэффициента отражения R составляет 50%, $\Delta\lambda_{0,01}$ – область спектра, в которой $R \geq 99\%$. Среднее значение пропускания T_{cp} в диапазоне 400–650 нм составляет 71%, в видимой области (380–780 нм) $T_{cp} = 61\%$. Визуальный коэффициент пропускания (с учетом спектральной чувствительности глаза стандартного наблюдателя) составляет 54,76% для стандарт-

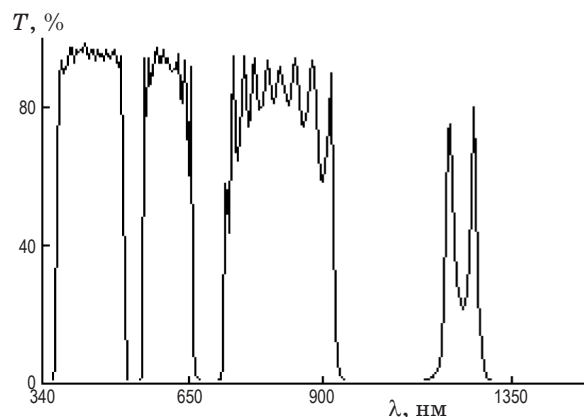


Рис. 1. Расчетное спектральное пропускание покрытия Ф1, блокирующего лазерное излучение шести длин волн.

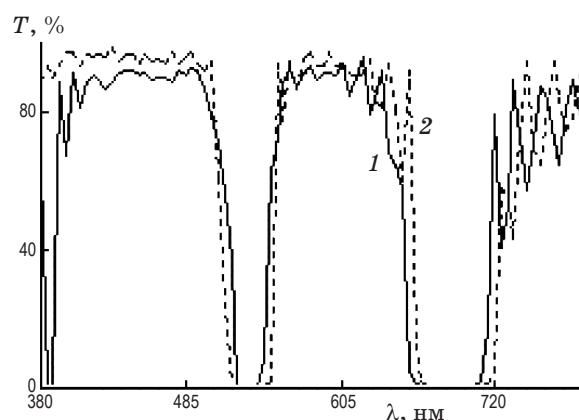


Рис. 2. Расчетное спектральное пропускание покрытия Ф2 с более узкой полосой подавления излучения на длине волны 532 нм (1), для сравнения – спектральное пропускание в этой же области покрытия Ф1 (2).

ного источника А и 55,72% для стандартного источника С.

Очевидно, что низкое пропускание в видимой области связано с частичным отражением света в области подавления длины волны 532 нм. Для увеличения пропускания в этой области была рассчитана система (Ф2) с более узкой полосой подавления излучения на длине волны 532 нм. На рис. 2 показано спектральное пропускание покрытия Ф2 (кривая 1) в области подавления излучения длиной волны 532 нм. Для сравнения показано пропускание покрытия Ф1 – кривая 2.

Относительная полуширина полосы отражения фильтра Ф2 уменьшилась до $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_0 = 0,058$ и $\Delta\lambda_{0,01}/\lambda_0 = 0,03$, что позволило уве-

личить пропускание в диапазоне 400–650 нм до 76%. В диапазоне 380–780 нм пропускание практически не изменилось и составило 62%. Визуальный коэффициент пропускания для покрытия Ф2 увеличился на 10% и составил 64,2% для стандартного источника А и 64,86% для стандартного источника С. Сужение полосы отражения фильтра Ф2 достигается значительным увеличением толщины слоев, что затрудняет процесс изготовления и отрицательно скажется на эксплуатационных характеристиках покрытия.

На случай необходимости увеличения пропускания в видимой и ближней инфракрасной областях спектра были рассчитаны фильтры для подавления четырех лазерных длин волн 355, 532, 1064 и 1540 нм. На рис. 3 показано спектральное пропускание фильтра Ф3, созданного на основе конструкций (7) и (9), блокирующего излучение на четырех лазерных длинах волн. Визуальное пропускание фильтра Ф3 такое же, как у фильтра Ф2, при более широкой полосе отражения на 532 нм. $\Delta\lambda_{0,01}/\lambda_0 = 0,06$, а $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_0 = 0,087$. T_{cp} в видимой области составляет 81,65% и 82,2% в диапазоне 370–950 нм.

Определенные в работе конструкции фильтров соответствуют предъявляемым к таким покрытиям техническим требованиям. Представленные решения не единственны. Приведенные выше в качестве примера известные конструкции (5) и (6) хуже по оптическим параметрам рассчитанных систем (7–9), на основе которых создавались наиболее оптимальные фильтры.

Разработанные системы получены в производственных условиях. В слоях с высоким показателем преломления В использовался оксид циркония, в слоях с высоким показателем преломления В₁ – оксид иттрия, в слоях с низким показателем преломления Н – кварц.

Изготовление опытных образцов покрытий осуществлялось на вакуумной установке А-700QE фирмы “Leubold-Heraus” выпуска 1985 г. Технологический процесс изготовления зеркал стандартный и состоит в очистке подложек перед нанесением покрытия, в их прогреве и последовательном нанесении слоев в соответствии с расчетом. Для нанесения слоев использовались электронно-лучевые испарители. Контроль толщины слоев проводился в проходящем свете спектрофотометрическим методом. Для получения максимальной точности заранее рассчитывались схемы контроля.

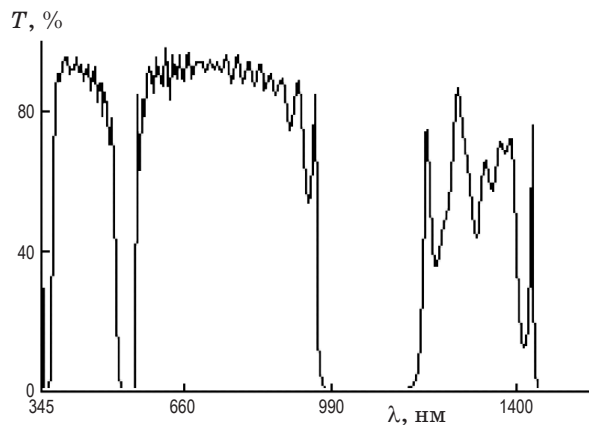


Рис. 3. Расчетное спектральное пропускание покрытия Ф3, блокирующего лазерное излучение четырех длин волн.

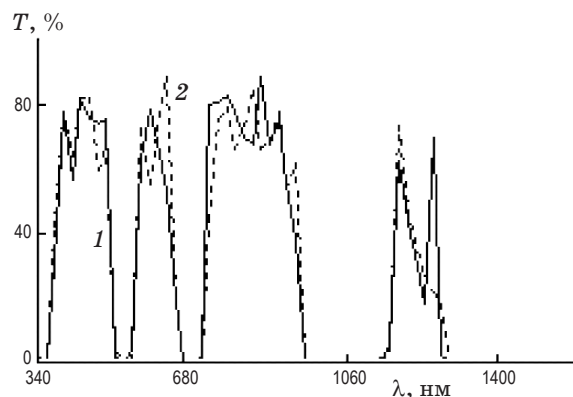


Рис. 4. Спектральное пропускание экспериментальных образцов 8 (1) и 2 (2) на основе покрытия Ф1, блокирующих шесть лазерных длин волн.

Давление остаточных газов в камере нанесения покрытия составляло $(2-5) \times 10^{-5}$ мм рт. ст. Температура нагрева подложек 150–250 °С. Скорость нанесения слоев ZrO₂ – 17 Å/мин, слоев Y₂O₃ – 20 Å/с, скорость конденсации слоев SiO₂ 25 Å/мин. Выбранные режимы испарения оптимальны с точки зрения получения наиболее стабильных и воспроизводимых оптических характеристик формируемых оптических систем.

Для измерения спектрофотометрических характеристик использовался спектрофотометр СФ8 с растяжкой шкалы. Более точные измерения проводились на спектральном приборе “Lambda-9” фирмы Perkin-Elmer.

На рис. 4 и 5 показано типичное спектральное пропускание двух опытных партий отражающих фильтров, изготовленных в произ-

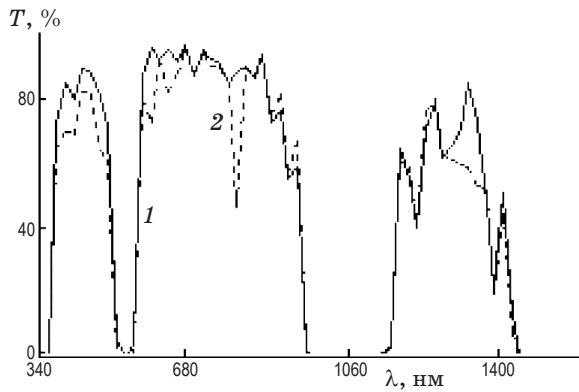


Рис. 5. Спектральное пропускание экспериментальных образцов 14 (1) и 13 (2) на основе покрытия Ф3, блокирующих четыре лазерных длины волны.

водственных условиях по методике, описанной выше. На рис. 4 приведены кривые спектрального пропускания образцов 2 и 8, изготовленных в соответствии с расчетным фильтром Ф1. На рис. 5 представлены спектры пропускания образцов 13 и 14, изготовленных в соответствии с расчетным фильтром Ф3. Как следует из этого рисунка, визуальное пропускание образцов 13 и 14, блокирующих четыре длины волны (исключается блокирование излучения на 694 нм), увеличивается на 10–15% по сравнению с образцами 2 и 8 (рис. 4), блокирующими шесть длин волн, а интегральное – более чем на 32%.

Полоса зоны отражения для всех изготовленных систем $\Delta\lambda_{0,01}/\lambda_0 = 0,06-0,08$, что близко к расчетным значениям. Относительная полуширина полосы фильтров $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_0 = 0,13$, что несколько больше расчетных значений.

Значения визуального и интегрального пропускания, а также оптической плотности изготовленных фильтров, рассчитанные по измеренному пропусканию с помощью спектрофотометра СФ8 с растяжкой шкалы, приведены в табл. 1.

Как следует из данных таблицы, визуальное пропускание экспериментальных образцов на 5–8% меньше расчетных значений. Интегральное пропускание экспериментальных образцов, блокирующих излучение шести длин волн, на 15% меньше расчетных, блокирующих четыре длины волны – меньше на 7–10%. Чем сложнее конструкция покрытия, тем больше расхождение результатов эксперимента с расчетом. Такие расхождения связаны с ошибками, неизбежно возникающими при нанесении многослойных покрытий на устаревшем оборудовании, при отсутствии планетарного вращения подложек и современных систем контроля толщины покрытия в процессе изготовления.

Поскольку наибольший интерес представляет степень подавления излучения на длине волны 532 нм, образцы с нанесенными многослойными покрытиями испытывались на установке “Лимитер”, сертифицированной отделом главного метролога ГОИ. Измерения осуществля-

Таблица 1. Оптические характеристики четырех опытных образцов фильтров для шести лазерных длин волн

Оптические характеристики		Номера образцов			
	Длины волн, нм	2	8	13	14
Оптическая плотность на лазерной длине волны	355	3,745	4,647	2,96	2,96
	532	3,01	2,873	5,096	3,346
	694	3,17	3,292	—	—
	1064	3,347	3,345	3,364	3,354
	1315	2,512	2,812	—	—
	1540	3,237	3,216	5,22	3,279
Интегральное пропускание T, %	в диапазоне 380–780	47,5	47,76	68,82	75,87
Визуальное пропускание Y, %	источник А	47,49	45,91	54,93	62,14
	источник С	43,38	41,96	48,25	54,77

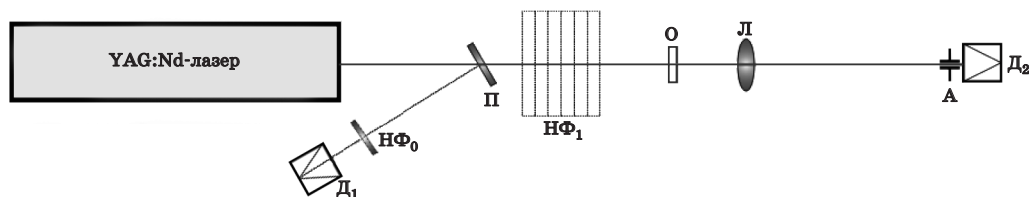


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения оптической плотности образцов конструкций Ф1 и Ф3. Д₁ – пироэлектрический приемник, измеряющий входную энергию. НФ₀ – нейтральное стекло марки НС2, защищающее приемник Д₁. П – плоскопараллельная пластинка, отклоняющая часть (8%) входной энергии на приемник Д₁. НФ₁ – нейтральные стекла марок НС7 и НС9, устанавливающие энергию, падающую на образец О, порядка 1 мДж/см². Л – линза, собирающая излучение, прошедшее через образец, на фотоприемнике Д₂, А – диафрагма, защищающая приемник Д₂ от засветок.

Таблица 2. Оптическая плотность, измеренная на установке “Лимитер”, изготовленных образцов фильтров для длины волны 532 нм

№ образца	Плотность энергии на входе в образец, Дж/см ²	Плотность энергии после образца, Дж/см ²	Оптическая плотность
1	$9,1 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-10}$	6,60
2	$8,92 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-10}$	6,59
3	$8,85 \times 10^{-4}$	$2,85 \times 10^{-10}$	6,49
4	$8,78 \times 10^{-4}$	$1,73 \times 10^{-10}$	6,71
5	$8,66 \times 10^{-4}$	$2,19 \times 10^{-10}$	6,60
6	$8,53 \times 10^{-4}$	$5,24 \times 10^{-10}$	6,21
7	$7,35 \times 10^{-4}$	$2,40 \times 10^{-10}$	6,49
8	$8,60 \times 10^{-4}$	$4,67 \times 10^{-10}$	6,27
9	$8,37 \times 10^{-4}$	$3,32 \times 10^{-10}$	6,40
10	$8,32 \times 10^{-4}$	$2,86 \times 10^{-10}$	6,46
11	$7,95 \times 10^{-4}$	$2,92 \times 10^{-10}$	6,43

лись с использованием YAG:Nd-лазера с преобразователем излучения во вторую гармонику – 532 нм, длительностью импульса 7 нс и диаметром пучка 8 мм. Схема установки представлена на рис. 6.

В табл. 2 приведены результаты измерения оптической плотности одиннадцати образцов фильтров.

* * * * *

Заключение

Разработаны конструкции многослойных оптических покрытий для одновременного подавления лазерного излучения на четырех и шести длинах волн. Покрытия имеют спектральные характеристики с высокой контрастностью, являются и эффективными зеркалами для лазерных длин волн, и полосовыми пропускающими фильтрами вне зон подавления. На основе разработанных конструкций изготовлены экспериментальные образцы покрытий. Оптическая плотность полученных образцов выше 3, что означает ослабление излучения более чем в 10^3 раза.

Значения визуального и интегрального пропускания изготовленных образцов находятся на уровне 45–55%, что естественно, так как зоны максимального отражения чередуются с зонами максимального пропускания. Полоса зоны отражения составляет $\Delta\lambda_{0,01}/\lambda_0 = 0,06–0,08$, что позволяет использовать изготовленные фильтры вплоть до углов падения света 35–40°. При более узких полосах отражения излучение может выйти из зоны подавления.

В заключение авторы выражают глубокую признательность и благодарность высококвалифицированному оператору Круглову Борису Михайловичу, в сложных производственных условиях изготовившему трудоемкие конструкции новых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань: Фен, 2003. 424 с.

2. *Муранова Г.А., Первеев А.Ф.* Микропористость тонких пленок // Оптический журнал. 1993. № 2. С. 14–26.
 3. *Смирнов Н.Н.* Расчет и изготовление интерференционных покрытий для оптических систем с заданными цветовыми характеристиками // Автореф. канд. дис. СПб.: ФГУП “ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”, 2006. 24 с.
 4. *Гребенчиков И.В., Власов А.Г., Непорент Б.С., Суйковская Н.В.* Просветление оптики. М.–Л.: Гостехиздат, 1946. 212 с.
 5. *Джадд Д., Вышецки Г.* Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.
 6. *Мионов С.П.* Диэлектрические зеркала с повышенной избирательной способностью // Тез. докл. отрасл. совещания “Совершенствование технологии изготовления оптических покрытий”. М.: ЦНИИ информации, 1977. С. 66–67.
-