

ПЯТИСЛОЙНЫЕ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

© 2014 г. Тан Тай До, аспирант; Л. А. Губанова, доктор техн. наук;
Э. С. Путилин, доктор техн. наук; Фам Ван Хоа

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: la7777@mail.ru

Рассмотрены условия получения структуры пятислойного интерференционного просветляющего покрытия, содержащего слои равной толщины. Приведены области допустимых значений показателя преломления слоев, формирующих это покрытие и позволяющих получить три или пять нулевых значений энергетического коэффициента отражения. Полученные структуры пятислойных покрытий создают возможность снижения энергетического коэффициента отражения оптических материалов как с высоким, так и с низким показателем преломления. Данные покрытия способны снижать энергетический коэффициент отражения в нескольких областях спектра одновременно.

Ключевые слова: интерференционное, просветляющее, диэлектрическое, многозональное, диэлектрическое, покрытие.

Коды OCIS: 310.0310

Поступила в редакцию 26.02.2014

Оптические покрытия широко используются в оптических и оптико-электронных устройствах для снижения коэффициента отражения на границе раздела двух сред с различными показателями преломления. В зависимости от назначения оптической системы характеристики просветляющих покрытий различаются. Так в лазерных системах необходимы покрытия, имеющие нулевое отражение на одной или нескольких длинах волн [1], в наблюдательных системах – имеющие минимальное отражение, часто близкое к нулю, в нескольких спектральных диапазонах [2–4].

Целью данной работы является анализ оптических свойств пятислойных просветляющих покрытий, позволяющий определить условия, при которых можно создать такие покрытия, спектральная зависимость коэффициента отражения которых имеет пять нулевых минимумов или несколько спектральных диапазонов, в которых отражение близко к нулю.

Рассмотрим пятислойную диэлектрическую систему, слои которой характеризуются показателями преломления n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 и оптическими толщинами $n_1d_1, n_2d_2, n_3d_3, n_4d_4, n_5d_5$.

Излучение с длиной волны λ попадает из среды с показателем преломления n_0 , а диэлектрическая система сформирована на подложке с показателем преломления n_m . Все показатели преломления используются без учета дисперсии.

Интересующие нас энергетический R и амплитудный r коэффициенты отражения могут быть выражены через элементы матрицы интерференции [5]

$$\begin{cases} R(\lambda) = |r(\lambda)|^2 \\ r(\lambda) = \frac{n_0 m_{11} - n_m m_{22} + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{n_0 m_{11} + n_m m_{22} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$M = \prod_{j=1}^5 M_j, \quad M_j = \begin{vmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{n_j} \sin \varphi_j \\ i n_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{vmatrix},$$

$\varphi_j = 2\pi n_j d_j \lambda^{-1}$, $n_j d_j$, n_j – соответственно, фазовая толщина, оптическая толщина и показатель преломления j -го слоя.

Условие просветления, накладываемое на матричные элементы рассматриваемой диэлектрической системы, когда действительная и мнимая

части числителя в уравнении (1) равны нулю [6] можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} n_0 m_{11} - n_m m_{22} = 0 \\ n_0 n_m m_{12} - m_{21} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

В пятислойной системе, образованной слоями равной оптической толщины, матричные элементы имеют следующий вид:

$$\begin{cases} m_{11} = (\cos^4 \varphi - a_1 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + a_2 \sin^4 \varphi) \cos \varphi, \\ m_{12} = (b_1 \sin^4 \varphi - b_2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + b_3 \cos^4 \varphi) \sin \varphi, \\ m_{21} = (c_1 \sin^4 \varphi - c_2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + c_3 \cos^4 \varphi) \sin \varphi, \\ m_{22} = (\cos^4 \varphi - d_1 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + d_2 \sin^4 \varphi) \cos \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \left[n_5 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} + n_3^{-1} + n_4^{-1} \right) + n_4 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} + n_3^{-1} \right) + n_3 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} \right) + n_2 n_1^{-1} \right], \\ a_2 &= n_2 n_4 n_1^{-1} n_3^{-1} + n_1^{-1} n_3^{-1} n_4^{-1} n_2 n_5 (n_3 + n_4) + \\ &\quad + n_1^{-1} n_2^{-1} n_4^{-1} n_3 n_5 (n_1 + n_2), \\ b_1 &= n_2 n_4 n_1^{-1} n_3^{-1} n_5^{-1}, \\ b_2 &= n_4 n_5^{-1} \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} + n_3^{-1} \right) + n_3 n_5^{-1} \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} \right) + \\ &\quad + n_2 n_1^{-1} n_5^{-1} - n_3 n_4^{-1} \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} \right) - n_2 n_1^{-1} \left(n_3^{-1} + n_4^{-1} \right), \\ b_3 &= n_1^{-1} + n_2^{-1} + n_3^{-1} + n_4^{-1} + n_5^{-1}, \\ c_1 &= n_1 n_3 n_5 n_2^{-1} n_4^{-1}, \\ c_2 &= n_5 n_4^{-1} (n_1 + n_2 + n_3) + n_3^{-1} n_5 (n_1 + n_2) + \\ &\quad + n_1 n_5 n_2^{-1} - n_3^{-1} n_4 (n_1 + n_2) - n_2^{-1} n_1 (n_3 + n_4), \\ c_3 &= n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5, \\ d_1 &= n_5^{-1} \left(n_1 + n_2 + n_3 + n_4 \right) + n_4^{-1} \left(n_1 + n_2 + n_3 \right) + \\ &\quad + n_3^{-1} \left(n_1 + n_2 \right) + n_1 n_2^{-1}, \\ d_2 &= n_1 n_3 n_2^{-1} n_4^{-1} + n_1 n_2^{-1} n_5^{-1} (n_3 + n_4) + \\ &\quad + n_4 n_3^{-1} n_5^{-1} (n_1 + n_2). \end{aligned}$$

Система уравнений (2) состоит из двух уравнений и содержит шесть неизвестных (n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 и φ).

Одной из задач работы является определение области допустимых значений показателей преломления слоев, при которых ширина зоны просветления будет максимальной. Анализ матричных элементов, приведенных в формуле (3), позволяет считать, что спектральная кривая энергетического коэффициента отражения может иметь при наиболее благоприятных условиях пять минимумов отражения. Один из этих ми-

нимумов будет находиться (расположен) на длине волны λ_0 , определяемой из условия $\cos \varphi_j = 0$, где $\varphi_j = 0,5\pi\lambda_0\lambda^{-1}$, а λ_0 – длина волны, соответствующая, например, середине спектрального интервала, в котором необходимо снизить коэффициент отражения, или той длине волны, на которой необходимо получить нулевое значение коэффициента отражения. Из второго уравнения системы (2) следует, что при $\varphi_j = 0,25\pi\lambda_0$ на показатели преломления накладывается следующие условие:

$$(n_2 n_4)^2 n_0 n_m = (n_1 n_3 n_5)^2. \quad (4)$$

Кроме того второе уравнение выполняется при

$$n_1 n_5 = n_2 n_4 = n_3^2 = n_0 n_m. \quad (5)$$

Далее рассмотрим решение системы уравнений (2) для длин волн, отличных от λ_0 , таких, у которых $\cos \varphi_j \neq 0$ и $\sin \varphi_j \neq 0$. В этом случае фазовая толщина слоев отличаются от $0,5\pi$.

Тогда первое уравнение системы (2) с учетом того, что $\cos \varphi_j \neq 0$ и $\sin \varphi_j \neq 0$, может быть преобразовано к следующему виду:

$$A \operatorname{tg}^4 \varphi - B \operatorname{tg}^2 \varphi - C = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= n_0 \left[n_2 n_4 (n_1 n_3)^{-1} + n_1^{-1} n_3^{-1} n_4^{-1} n_2 n_5 (n_3 + n_4) + \right. \\ &\quad \left. + n_1^{-1} n_2^{-1} n_4^{-1} n_3 n_5 (n_1 + n_2) \right] - n_m \left[n_1 n_3 n_2^{-1} n_4^{-1} + \right. \\ &\quad \left. + n_1 n_2^{-1} n_5^{-1} (n_3 + n_4) + n_4 n_3^{-1} n_5^{-1} (n_1 + n_2) \right], \\ B &= n_0 \left[n_5 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} + n_3^{-1} + n_4^{-1} \right) + n_4 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n_3^{-1} \right) + n_3 \left(n_1^{-1} + n_2^{-1} \right) + n_2 n_1^{-1} \right] - n_m \left[n_5^{-1} (n_1 + n_2 + \right. \\ &\quad \left. + n_3 + n_4) + n_4^{-1} (n_1 + n_2 + n_3) + n_3^{-1} (n_1 + n_2) + n_1 n_2^{-1} \right], \\ C &= n_m - n_0. \end{aligned}$$

Решением биквадратного уравнения (6) могут быть четыре действительных или два действительных и два комплексно сопряженных корня. Действительно

$$\operatorname{tg}^2 \varphi = 0,5 \left(B \pm \sqrt{B^2 + 4AC} \right) A^{-1}. \quad (7)$$

Первое решение этого уравнения соответствует тому, что пятислойное покрытие будет иметь дополнительно к ранее полученной длине волны, на которой коэффициент отражения имеет нулевое значение, еще четыре длины волны, которым будут соответствовать нулевые минимумы отражения. Второе решение определяет условия, при которых дополнительных минимумов будет два.

Учитывая, что в рассматриваемых условиях нулевое отражение создается на длинах волн, соответствующих фазовой толщине слоев (равной $0,5\pi$) и определяемых решением уравнения (6), спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения будет иметь либо пять, либо три нулевых минимума отражения.

Четыре действительных корня уравнения (7) будут получены при $B < 0$ и $A < 0$, а два – при $B < 0$ и $A > 0$. Эти корни уравнения определяют значения длин волн, которым соответствуют нулевые минимумы отражения

$$\lambda_i^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \times \left\{ \arctg \left[\pm \sqrt{0,5A^{-1} \left(B \pm \sqrt{B^2 + 4AC} \right)} \right] \right\}, \quad (8)$$

$i = 1, 2, 3, 4$ при условиях $B < 0, A < 0$ и $i = 1, 2$ при условиях $B < 0, A > 0$.

При вычислении длин волн в соответствии с формулой (8) необходимо помнить, что область определения главного значения арктангенса будет находиться в интервале $\{-0,5\pi, 0,5\pi\}$, поэтому отрицательное значение корня в соответствии с физически выполнимыми значениями должно находиться в интервале $\{0,5\pi, \pi\}$. Положения минимумов отражения определяются при $B < 0, A > 0$ следующими выражениями:

$$\lambda_1^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B + \sqrt{B^2 + 4AC} \right)},$$

$$\lambda_2^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \times \left[\pi - \arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B + \sqrt{B^2 + 4AC} \right)} \right].$$

Положения минимумов отражения определяются при $B < 0, A < 0$ следующими выражениями:

$$\lambda_1^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B + \sqrt{B^2 + 4AC} \right)},$$

$$\lambda_2^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \times \left[\pi - \arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B + \sqrt{B^2 + 4AC} \right)} \right],$$

$$\lambda_3^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \times \left[\arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B - \sqrt{B^2 + 4AC} \right)} \right],$$

$$\lambda_4^{-1} = 2(\pi\lambda_0)^{-1} \times \left[\pi - \arctg \sqrt{0,5A^{-1} \left(B - \sqrt{B^2 + 4AC} \right)} \right],$$

На рис. 1 представлена контурная карта зависимости величин A и B от показателей преломления n_1 и n_2 с учетом связи между показателями преломления слоев, определяемой выражением (5).

Как видно из рис. 1, одному значению показателя преломления n_1 соответствует массив значений показателя преломления n_2 и, наоборот, при которых могут быть получены системы, имеющие либо три, либо пять минимумов отражения в рабочей области спектра.

На рис. 2 приведены спектральные зависимости пятислойного четвертьволнового просветляющего покрытия, показатели преломления слоев

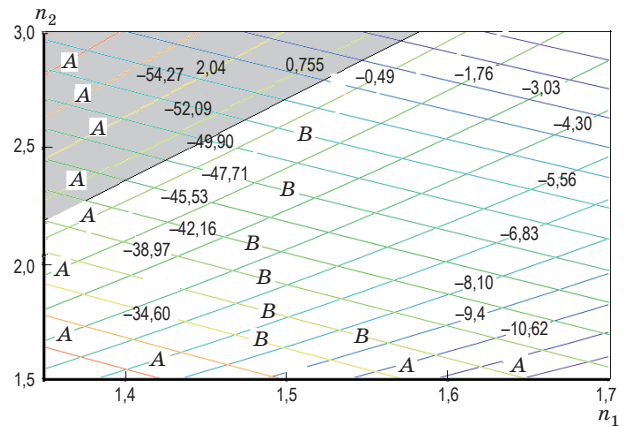


Рис. 1. Контурная карта зависимости величин A и B от показателей преломления n_1 и n_2 , определяющих область их допустимых значений с учетом связи между показателями преломления слоев, определяемой выражением (5).

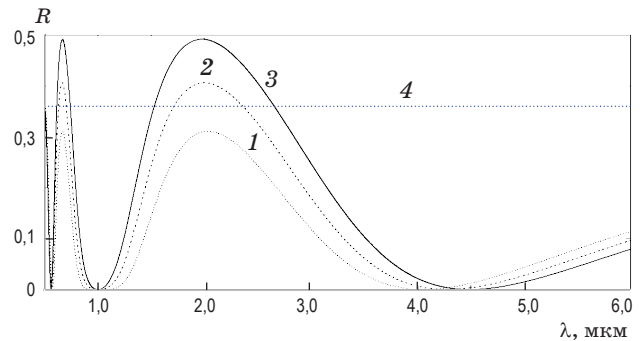


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов отражения просветляющих пятислойных покрытий, сформированных из материалов с различными показателями преломления n_1 ($n_1 = 1,35$) и n_2 , позволяющих получить три минимума отражения. 1 – $n_2 = 2,6$, 2 – $n_2 = 2,4$, 3 – $n_2 = 2,2$, 4 – отражение оптического материала без покрытия. Покрытия сформированы на материале с $n_m = 4,00$, излучение падает по нормали из воздуха.

которого лежат в области, позволяющей получить три нулевых минимума отражения. Особенностью этой области показателей преломления n_1, n_2 является то, что с ростом показателя преломления второго слоя максимумы отражения превышают значения коэффициента отражения подложки. Кроме того длинноволновый минимум отражения смещается в красную область спектра, а спектральный интервал, соответствующий основному минимуму отражения уменьшается, учитывая, что для четвертьволновых покрытий выполняется условие $\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1} = 2\lambda_0^{-1}$, где λ_1 и λ_2 – длины волн, на которых коэффициент отражения одинаков. На длинах волн, на которых наблюдается одинаковый коэффициент отражения, коротковолновый минимум отражения смещается в фиолетовую область спектра.

На рис. 3 изображены графики спектральных зависимостей пятислойного четвертьволнового просветляющего покрытия, показатели преломления слоев которого лежат в области, позволяющей получать пять нулевых минимумов отражения. Из этого рисунка также видно, что при увеличении показателя преломления второго слоя область минимального отражения тоже увеличивается, однако при этом возрастают и значения коэффициентов отражения в максимумах. Особенностью этого типа покрытий является то, что коэффициент отражения не превышает коэффициента отражения подложки во всем спектральном диапазоне.

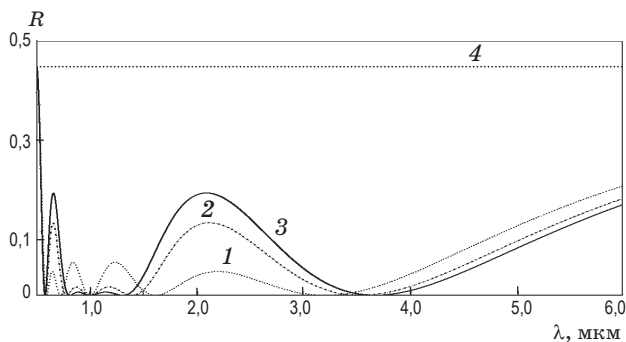


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов отражения просветляющих пятислойных покрытий, сформированных из материалов с различными показателями преломления n_1 ($n_1 = 1,35$) и n_2 , позволяющих получить пять минимумов отражения. 1 – $n_2 = 1,6$, 2 – $n_2 = 1,8$, 3 – $n_2 = 1,9$, 4 – спектр отражения оптического материала без покрытия. Покрытия сформированы на материале с $n_m = 4,00$, излучение падает по нормали из воздуха.

На рис. 4 иллюстрируется изменение спектральной зависимости коэффициента отражения пятислойного просветляющего покрытия при переходе из зоны допустимых значений показателей преломления n_1, n_2 , в которой может быть получено пять нулевых минимумов отражения, в зону, в которой можно получить три минимума отражения. Как видно из этого рисунка, масштаб изображения на котором увеличен на два порядка, три минимума отражения, наблюдаемые на и вблизи длины волны λ_0 , полученные при $n_1 = 1,35, n_2 = 2,00$, а при $n_1 = 1,35, n_2 = 2,10$ они преобразуются в один минимум отражения на длине волны λ_0 .

На рис. 5 представлены спектральные зависимости коэффициентов отражения пятислойных четвертьволновых просветляющих систем, характеризующихся показателями преломления n_1, n_2 , значения которых находятся в области допустимых значений, позволяющих получить пять минимумов отражения. В отличие от ситуации, изображенной на рис. 3, показатель преломления слоя, граничащего с воздухом, имеет высокое значение. Как видно из этого рисунка, спектральные кривые существенно различаются. Если при малых значениях показателя преломления первого слоя $n_1 < 1,5$ коэффициент отражения в максимумах не превышает коэффициента отражения подложки, то при показателях преломления первого слоя

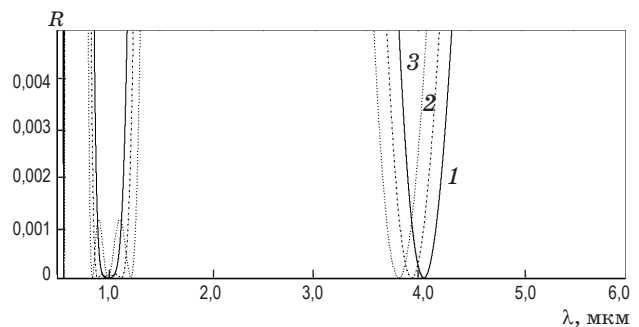


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициентов отражения просветляющих пятислойных покрытий, сформированных из материалов с различными показателями преломления из области значений показателей преломления n_1 ($n_1 = 1,35$) и n_2 , при которых происходит переход от системы, позволяющей получить пять минимумов отражения, к системе, характеризующейся тремя минимумами отражения. 1 – $n_2 = 2,20$, 2 – $n_2 = 2,10$, 3 – $n_2 = 2,0$. Покрытия сформированы на материале с $n_m = 4,00$, излучение падает по нормали из воздуха.

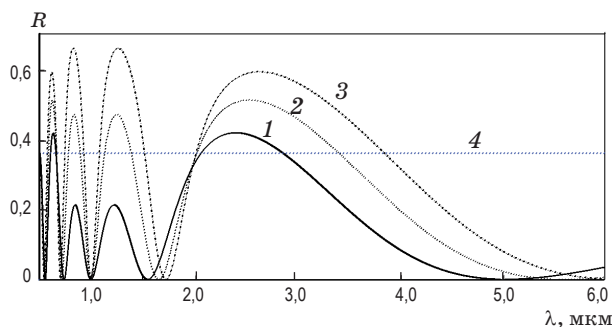


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов отражения просветляющих пятислойных покрытий, сформированных из материалов с различными показателями преломления, выбранными из области значений показателей преломления n_1, n_2 ($n_2 = 2,20$), в которой возможно получение пяти минимумов отражения при высоких значениях показателей преломления первого слоя. 1 – $n_1 = 1,90$, 2 – $n_1 = 2,30$, 3 – $n_1 = 2,70$, 4 – спектр отражения оптического материала без покрытия. Покрытия сформированы на материале с $n_m = 4,00$, излучение падает по нормали из воздуха.

$n_1 > 2,0$ коэффициенты отражения в максимумах превышают коэффициент отражения чистого материала (рис. 5). Кроме этого, увеличиваются расстояния между нулевыми минимумами отражения. Это обстоятельство при наличии нескольких отражающих поверхно-

* * * * *

стей позволяет создать зоны гашения излучения и создавать, если это необходимо, просветляющие системы, работающие в нескольких спектральных интервалах.

В работе представлен анализ спектральных зависимостей пятислойных четвертьволновых просветляющих покрытий в инфракрасном диапазоне спектра от показателей преломления слоев. Показано, что в зависимости от значений показателей преломления слоев такие покрытия могут иметь либо три, либо пять нулевых минимумов отражения. Пятислойные четвертьволновые просветляющие покрытия, у которых показатели преломления слоев уменьшаются от подложки к среде, из которой падает излучение (воздух), во всем спектральном диапазоне имеют коэффициент отражения меньше коэффициента отражения подложки.

У диэлектрических просветляющих систем показатели преломления слоев, формирующих это покрытие, находятся в зоне, допускающей получение пяти нулевых минимумов отражения в некотором спектральном интервале. У некоторых из них между этими минимумами могут располагаться спектральные зоны с высоким коэффициентом отражения.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокс Дж.Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра // Физика тонких пленок / Под ред. Хасса Г. Т. 2. М.: Мир, 1967. С. 83–253.
2. Гайнутдинов И.С., Шувалов Н.Ю., Сабиров Р.С., Иванов В.А., Гареев Р.Р. Просветляющие покрытия на подложках из германия и кремния в окнах прозрачности ИК области спектра 3–5 мкм и 8–12 мкм // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 5. С. 68–72.
3. Amotchkina T. V., Trubetskov M.K., Pervak V., Tikhonravov A.V. Design, production, and reverse engineering of two-octave antireflection coatings // Appl. Opt. 2011. V. 50. № 35. P. 6468–6475.
4. Rahmlow T.D., Lazo-Wasem J.E., Wilkinson S., Tinker F. Dual band antireflection coatings for the infrared // Proc. SPIE. 2008. V. 694. P. 69400T-1.
5. Бернтд П.Х. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок // Физика тонких пленок / Под ред. Хасса Г. Т. 1. М.: Мир, 1967. С. 91–151.
6. Путилин Э.С. Оптические покрытия. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2010. 220 с.