

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ И ТОЛЩИН СЛОЕВ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Олег Кушнир

*Львовский национальный аграрный университет
Ул. В. Великого, 1, Дубляны, Украина. E-mail: o-p-ku@yandex.ua*

Oleg Kushnir

*Lviv National Agrarian University
St. Vladimir the Great, 1, Dubliany, Ukraine. E-mail: o-p-ku@yandex.ua*

Аннотация. Разработан метод определения оптических констант и толщин слоев слабопоглощающей двухслойной структуры с помощью выражений для огибающих минимумов и максимумов спектра отражения. Предложенный метод базируется на анализе двух экспериментальных спектров отражения. Один из них - это спектр отражения двухслойной структуры с исследуемым верхним слоем, оптические константы и толщину которого нужно определить. Второй – это спектр отражения однослойной структуры без исследуемого верхнего слоя. Преимуществом этого метода является возможность выбора структуры с произвольным соотношением между показателями преломления обеих слоев. Предложенный метод может быть использован при определении оптических констант и толщины тонкого слабопоглощающего слоя, нанесенного на толстый прозрачный слой. Использование толстого дополнительного слоя дает возможность получить достаточное количество экстремумов в спектре отражения для построения огибающих и определения неизвестных параметров.

Ключевые слова: двухслойная структура, огибающие спектров отражения, многолучевая интерференция, показатель преломления, оптические константы.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Интерференционные покрытия имеют широкое применение в оптическом приборостроении [1, 2], например, для изготовления интерференционных фильтров или используются в качестве просветляющих покрытий. Последние также могут использоваться в системах солнечной энергетики [3] для уменьшения отраженной энергии солнечного света. Проектирование таких покрытий предполагает возможность точного определения показателей преломления и поглощения слоев. Поэтому разработка методов определения оптических констант и толщин слоев остается актуальной проблемой.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На данный момент разработано большое количество различных методов определения оптических констант плоскопараллельных структур [4-6], использующих закономерности многолучевой интер-

ференции. Одним из наиболее точных методов, который применяется в тех случаях, когда толщина плоскопараллельного слоя является меньше или по крайней мере сопоставима с длиной волны, является метод эллисометрии [7-11]. Среди эффективных и одновременно технически простых методов определения оптических констант и толщины слоя плоскопараллельной однослойной структуры широко применяются методы с использованием функций огибающих спектров отражения или пропускания [12-17]. Эти методы сводятся к установлению корреляции между значениями энергетических коэффициентов в их экстремумах и параметрами самих структур и могут быть реализованы с использованием как спектральных так и угловых зависимостей энергетических коэффициентов. В работе [17] была предпринята попытка использования функций огибающих экстремумов спектров однослойных структур для определения неизвестных оптических констант двухслойных структур. Однако из-за отсутствия аналитических выражений для огибающих экстремумов спектров двухслойных структур эта попытка была реализована лишь в частном случае близости показателей преломления обеих слоев между собой [17]. Понятно, что обеспечить такую близость показателей преломления на практике является не всегда просто, так как показатель преломления верхнего слоя может быть неизвестен.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Установленные аналитические выражения для огибающих спектров отражения поглощающей двухслойной структуры [18] дают возможность предложить метод определения неизвестных оптических констант двухслойных структур с произвольными значениями показателей преломления слоев.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Предложенный метод так же, как и метод описанный в работе [17], базируется на анализе двух экспериментальных спектров отражения. Один из них $R1_e(\lambda)$ – это спектр отражения двухслойной структуры с исследуемым верхним слоем, оптические константы и толщину которого нужно определить. Второй $R2_e(\lambda)$ – это спектр отражения одно-

слоистой структуры 0–2–3 без исследуемого верхнего слоя. В первом спектре нижний слой, который выполняет роль вспомогательного, должен иметь достаточную толщину для того, чтобы в этом спектре проявилась интерференционная картина. При этом количество экстремумов в спектре должно быть достаточным для построения интерполяционных кривых [17] и вычисления значений огибающих максимумов или минимумов. Для нижнего (вспомогательного) слоя лучше использовать прозрачный в исследуемой спектральной области материал для того, чтобы упростить определение его толщины d_2 и дисперсионной зависимости показателя преломления $n_2(\lambda)$ с помощью второго спектра отражения однослойной структуры. Для этого спектра также нужно построить кривые огибающих методом интерполяции, с помощью которых удобно определять искомые параметры, используя один из многих известных методов, например [15, 16, 19], разработанных для однослойных структур. В случае, когда во втором спектре отражения однослойной структуры количество экстремумов недостаточно для построения огибающих методом интерполяции, толщину d_2 и показатель преломления $n_2(\lambda)$ прозрачного слоя можно определить с помощью другого метода [2]. Согласно этому методу в области прозрачности однослойной структуры справедливы следующие соотношения:

$$4\pi n_2 d_2 / \lambda_m = m\pi, \quad (1)$$

$$n_2 = n_2^\infty + \frac{g}{\lambda^2} \quad (2)$$

где: m – целые положительные числа.

Уравнение (1), (2) включают в себя три неизвестных параметра: $n_2^\infty d_2$, $g d_2$ и m . Поэтому, для того, чтобы определить m на длине волны λ_m , нужно иметь значение длины волны еще для двух соседних экстремумов: λ_{m-1} и λ_{m+1} . Тогда значение целого положительного числа m определяется с помощью приближенного выражения [2]:

$$m \approx \frac{\lambda_{m-1}^3 \lambda_{m+1}^2 + \lambda_{m-1}^2 \lambda_{m+1}^3 - \lambda_{m-1}^3 \lambda_m^2 - \lambda_{m+1}^3 \lambda_m^2}{(\lambda_{m+1} - \lambda_m) (\lambda_{m-1}^3 \lambda_{m+1} - \lambda_{m-1}^2 \lambda_{m+1}^2 + \lambda_{m-1}^3 \lambda_m - \lambda_{m-1}^2 \lambda_{m+1} \lambda_m - \lambda_{m-1}^2 \lambda_m^2 + \lambda_{m+1}^2 \lambda_m^2)}. \quad (3)$$

Следующим шагом является определение толщины d_2 слоя численным методом из условия минимума функции:

$$\sum_m (R2(m, \lambda_m, n_2(\lambda_m, d_2), \tilde{n}_3(\lambda_m), d_2) - R2_e(\lambda_m))^2, \quad (4)$$

где: $R2(m, \lambda_m, n_2(\lambda_m), \tilde{n}_3(\lambda_m), d_2)$ – энергетический коэффициент определяется с помощью известных выражений [20] для однослойной структуры 0–2–3; показатель преломления:

$$n_2(\lambda_m, d_2) = \frac{m \lambda_m}{4 d_2}. \quad (5)$$

В соответствии с (1); а для оптических констант подложки $\tilde{n}_3(\lambda_m)$ можно использовать табличные значения [21] или определять их с помощью третьего экспериментального спектра отражения

для чистой подложки. Тогда с помощью (5) определяется дисперсионная зависимость показателя преломления прозрачного нижнего слоя $n_2(\lambda_m)$.

После определения дисперсионных зависимостей $n_2(\lambda)$, $\tilde{n}_3(\lambda)$ и толщины нижнего слоя d_2 , функции огибающих [18] для первого спектра будут включать в себя только зависимости от неизвестных показателей преломления $n_1(\lambda)$, поглощения $\kappa_1(\lambda)$, толщины d_1 верхнего слоя, а также номера слоя s с наибольшей фазовой толщиной:

$$R_s^{\min, \max} = \left(\frac{\sigma_{0,s} \mp \sigma_{s,3} \chi_{0,s} \Omega_s}{1 \mp \sigma_{s,0} \sigma_{s,3} \Omega_s} \right)^2 = F_s^{\min, \max} (n_1(\lambda), \kappa_1(\lambda), \lambda, d_1, s). \quad (6)$$

Здесь $\chi_{0,s} = |\tilde{t}_{0,s} \tilde{t}_{s,0} - \tilde{r}_{0,s} \tilde{r}_{s,0}|$, комплексные амплитудные коэффициенты отражения $\tilde{r}_{j,u} = \sigma_{j,u} e^{i\phi_{j,u}}$ и пропускания $\tilde{t}_{j,u} = \tau_{j,u} e^{i\theta_{j,u}}$ определяются с помощью известных выражений [20]; $\Omega_j = e^{2\text{Im}\delta_j}$, $\delta_j = \frac{2\pi d_j \tilde{n}_j}{\lambda}$, $\tilde{n}_j = n_j - i\kappa_j$. Решив численным методом систему двух уравнений (6) только для длин волн λ_ν ($\nu = 1, 2, \dots$), которые соответствуют экстремумам первого спектра, можно получить две группы зависимостей показателей преломления и поглощения верхнего слоя от неизвестной толщины d_1 для этих длин волн λ_ν :

для случая, когда большей является фазовая толщина верхнего слоя ($s = 1$):

$$\begin{cases} n_1'(d_1, \lambda_\nu) \\ \kappa_1'(d_1, \lambda_\nu) \end{cases}; \quad (7)$$

для случая, когда большей является фазовая толщина нижнего слоя ($s = 2$):

$$\begin{cases} n_1''(d_1, \lambda_\nu) \\ \kappa_1''(d_1, \lambda_\nu) \end{cases}. \quad (8)$$

Для определения толщины верхнего слоя необходимо определить значение d_1' , которое обеспечивает минимум функции:

$$\Delta'(d_1) = \sum_\nu (R(\lambda_\nu, n_1'(d_1, \lambda_\nu), \kappa_1'(d_1, \lambda_\nu), n_2(\lambda_\nu), \tilde{n}_3(\lambda_\nu), d_1, d_2) - R1_e(\lambda_\nu))^2, \quad (9)$$

а также значение d_1'' , которое обеспечивает минимум функции:

$$\Delta''(d_1) = \sum_\nu (R(\lambda_\nu, n_1''(d_1, \lambda_\nu), \kappa_1''(d_1, \lambda_\nu), n_2(\lambda_\nu), \tilde{n}_3(\lambda_\nu), d_1, d_2) - R1_e(\lambda_\nu))^2, \quad (10)$$

где: $R(\lambda_\nu, n_1''(d_1, \lambda_\nu), \kappa_1''(d_1, \lambda_\nu), n_2(\lambda_\nu), \tilde{n}_3(\lambda_\nu), d_1) = \tilde{r}_{0,3}^* \tilde{r}_{0,3}$.

Для случая, когда $\Delta'(d_1') < \Delta''(d_1'')$, искомой толщиной d_1 будет значение d_1' , а дисперсионными зависимостями для показателей преломления и поглощения верхнего слоя будут: $n_1(\lambda_\nu) = n_1'(d_1', \lambda_\nu)$ и $\kappa_1(\lambda_\nu) = \kappa_1'(d_1', \lambda_\nu)$. Для случая, когда $\Delta'(d_1') > \Delta''(d_1'')$, искомой толщиной d_1 будет значе-

ние d_1'' , а дисперсионными зависимостями будут:
 $n_1(\lambda_v) = n_1''(d_1'', \lambda_v)$ и $\kappa_1(\lambda_v) = \kappa_1''(d_1'', \lambda_v)$.

В качестве примера использования предложенного метода были выбраны экспериментальные спектры отражения [17]. Первый из них – это спектр отражения двухслойной структуры 0–1–2–3 (рис. 1 сплошная кривая), где: среде 0 соответствует воздух ($n_0 = 1$); 1 – исследуемый слой, для которого необходимо определить оптические константы и толщину; 2 – слой SiO₂ (прозрачный в исследуемой спектральной области) и 3 – кремниевая подложка, для которой были использованы известные [21] показатели преломления и поглощения.

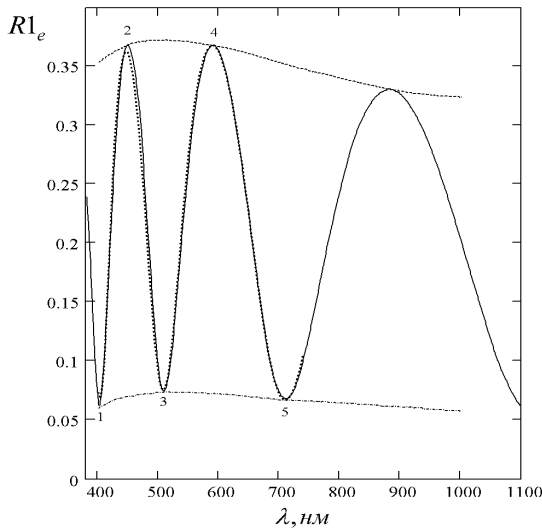


Рис. 1. Экспериментальный спектр отражения $R1_e(\lambda)$ исследуемой двухслойной структуры 0–1–2–3 при нормальном падении света (сплошная кривая); спектр отражения, рассчитанный с помощью найденных толщин и оптических констант обеих слоев (пунктирная кривая); огибающие максимумов (штриховая кривая) и минимумов (штрихпунктирная кривая) экспериментального спектра

Fig. 1. The experimental reflection spectrum $R1_e(\lambda)$ of the investigated two-layer structure 0–1–2–3 at normal incidence (solid line); the reflection spectrum, calculated on the basis of the found thicknesses and optical constants of the two layers (dotted line); envelopes peaks (the dashed curve) and lows (dashed line) of the experimental spectrum

Второй – это спектр отражения однослойной структуры 0–2–3 (рис. 2), которая отличается от структуры 0–1–2–3 лишь отсутствием слоя 1.

Для второго спектра экстремумы достигаются при таких длинах волн: максимумы – при 494 нм и 738 нм; минимумы – при 432 нм и 593 нм. С помощью уравнения (3) для каждого экстремума были определены целые значения m (рис. 2). Толщина слоя SiO₂ $d_2 = 513$ нм была определена из условия минимума функции (4). С помощью уравнения (5) были определены показатели преломления слоя

SiO₂ (рис. 3) для длин волн, при которых достигаются экстремумы спектра $R2_e(\lambda)$.

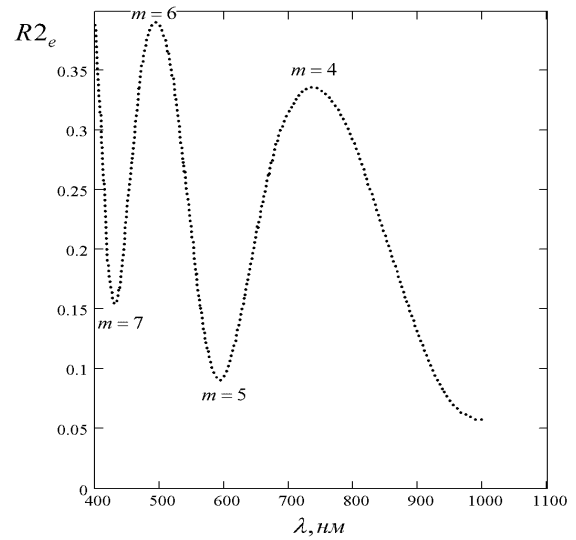


Рис. 2. Экспериментальный спектр отражения $R2_e(\lambda)$ однослойной структуры 0–2–3 при нормальном падении света

Fig. 2. The experimental reflection spectrum $R2_e(\lambda)$ of the layer structure 0–2–3 at normal incidence

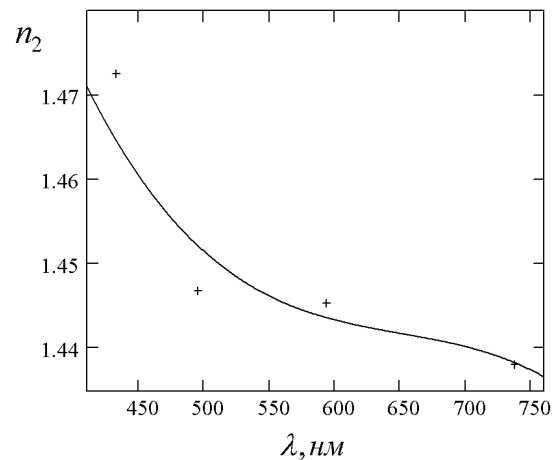


Рис. 3. Дисперсионная зависимость показателя преломления n_2 слоя 2 (SiO₂): знаком «+» обозначены рассчитанные значения для длин волн, соответствующих экстремумам спектра отражения структуры 0–2–3; значение сплошной кривой определялись методом наименьших квадратов

Fig. 3. The dispersion dependence of the refractive index n_2 of the layer 2 (SiO₂): sign "+" indicated by the calculated values for wavelengths correspond to the reflection spectrum extrema of the structure 0–2–3; values corresponding to the solid curve wear determined by the least squares method

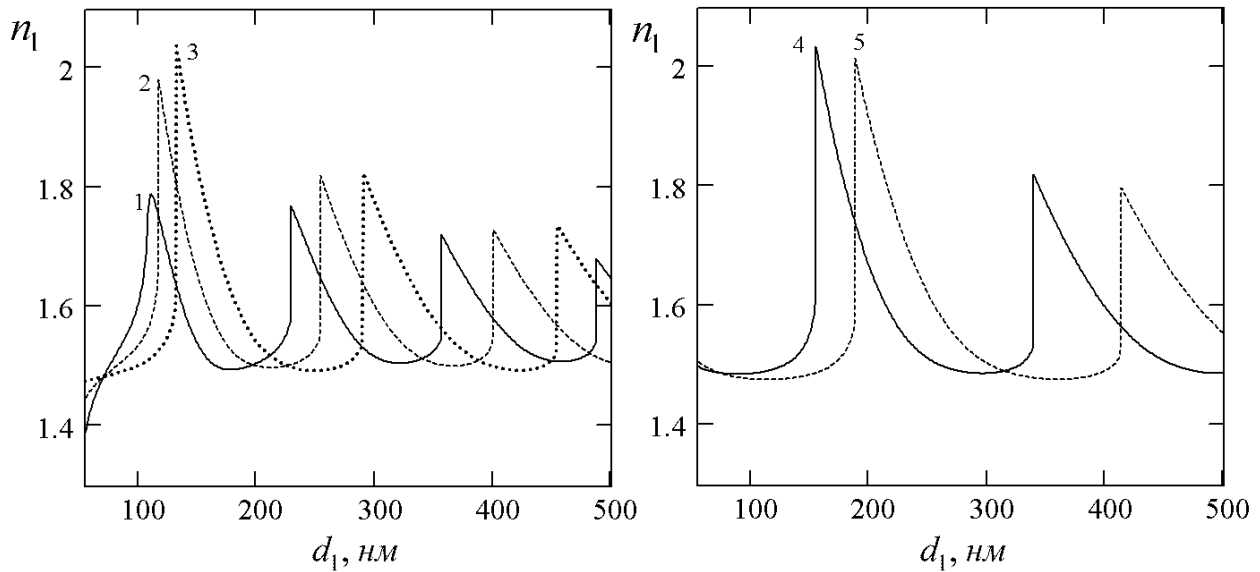


Рис. 4. Рассчитанная зависимость показателя преломления n_1 верхнего слоя 1 от его толщины для длин волн, соответствующих пронумерованным на рис.1 экстремумам

Fig. 4. The calculated dependence of the refractive index of the upper layer versus its thickness for the wavelength corresponding to the numbered in Fig. 1 extrema

В работе [17] было указано, что исследуемый верхний слой 1 значительно тоньше слоя 2 (SiO_2), поэтому при определении d_1 , $n_1(\lambda_v)$ и $\kappa_1(\lambda_v)$ рассматривался только случай $s = 2$.

С помощью выражений для огибающих (6) и их числовых значений были найдены зависимости (8) для показателей преломления (рис. 4) и поглощения (рис. 5) слоя 1 от его толщины.

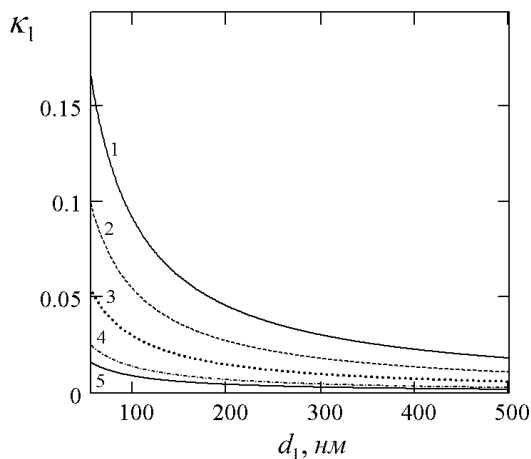


Рис. 5. Рассчитанная зависимость показателя поглощения κ_1 верхнего слоя от его толщины для длин волн, соответствующих пронумерованным на рис.1 экстремумам

Fig. 5. The calculated dependence of the absorption index κ_1 of the upper layer versus its thickness for the wavelength corresponding to the numbered in Fig. 1 extrema

Толщину исследуемого верхнего слоя $d_1 = 99 \text{ нм}$ было определено из условия минимума

функции (10). Используя решение (8) были найдены дисперсионные зависимости для показателей преломления (рис. 6) и поглощения (рис. 7). На рис. 1 вместе с экспериментальным спектром отражения исследуемой двухслойной структуры (сплошная кривая) показан спектр отражения, рассчитанный с помощью найденных толщин и оптических констант обоих слоев (пунктирная кривая). В табл. 1 представлены оптические константы и толщина исследуемого слоя, рассчитанные этим методом, а также рассчитанные в работе [17] методом, который пригоден только для структур с близкими между собой показателями преломления слоев. Сравнивая рассчитанные значения этих параметров (n_1 , κ_1 , d_1) с их действительными значениями (n'_1 , κ'_1 , d'_1) [17] (табл. 1) можно оценить погрешность для них, как: $\Delta n_1 = |n_1 - n'_1|$, $\Delta \kappa_1 = |\kappa_1 - \kappa'_1|$, $\Delta d_1 = |d_1 - d'_1|$.

Табл. 1. Рассчитанные оптические константы (n_1, κ_1) и толщина d_1 верхнего слоя двухслойной структуры; (n_1', κ_1') и d_1' – действительные значения этих величин [17]; (n_1'', κ_1'') и d_1'' – значения этих величин, рассчитанные другим методом [17].

Table 1. The calculated optical constants (n_1, κ_1) and the thickness d_1 of the upper layer of two-layer structure; (n_1', κ_1') and d_1' – the real values of these variables [17]; (n_1'', κ_1'') and d_1'' – the values of these variables calculated by another method [17].

λ , нм	n_1	κ_1	n_1'	κ_1'	n_1''	κ_1''	d_1 , нм	d_1' , нм	d_1'' , нм
402.1	1.601	0.092					99	100	
448.0	1.535	0.055	1.566	0.056	1.557	0.059			98.9
510.5	1.501	0.030	1.521	0.023	1.510	0.030			99.1
591.5	1.488	0.013	1.492	0.008	1.492	0.010			97.3
712.5	1.480	0.008	1.481	0.005	1.484	0.003			100.2

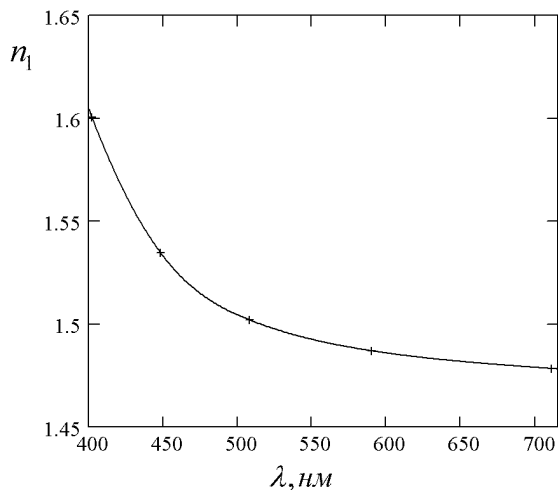


Рис. 6. Дисперсионная зависимость показателя преломления n_1 верхнего слоя 1: знаком «+» обозначены рассчитанные значения для длин волн, соответствующих экстремумам спектра отражения структуры 0–1–2–3; значение сплошной кривой определялись методом наименьших квадратов

Fig. 6. The dispersion dependence of the refractive index n_1 of the top layer 1: sign "+" indicate the calculated values for wavelengths corresponding to the spectrum reflection extrema of the structure 0–1–2–3; value of the solid curve were determined by the least squares method

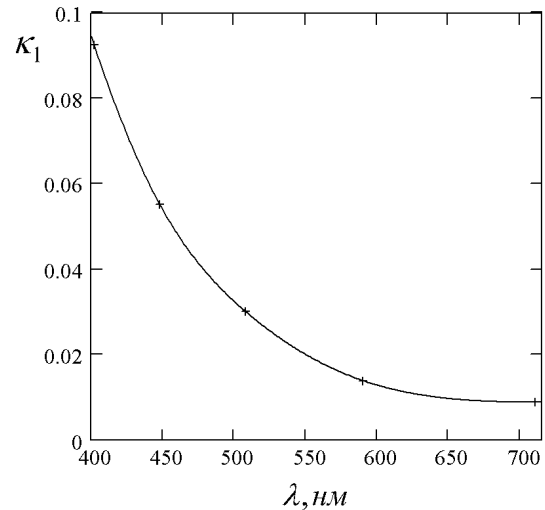


Рис. 7. Дисперсионная зависимость показателя поглощения κ_1 верхнего слоя 1: знаком «+» обозначены рассчитанные значения для длин волн, соответствующих экстремумам спектра отражения структуры 0–1–2–3; значение сплошной кривой определялись методом наименьших квадратов

Fig. 7. The dispersion dependence of the absorption index κ_1 of the top layer 1: sign "+" indicate the calculated values for wavelengths corresponding to the spectrum reflection extrema of the structure 0–1–2–3; value of the solid curve were determined by the least squares method

ВЫВОДЫ

Разработан неразрушающий метод определения оптических констант и толщины слабопоглощающего слоя с помощью функций огибающих экстремумов спектра отражения двухслойной структуры. Преимуществом этого метода по сравнению с другим известным методом [17] является возмож-

ность выбора структуры с произвольным соотношением между показателями преломления обеих слоев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Thelen A. 1989.** Design of optical interference coatings / A. Thelen. – New York: McGraw-Hill. – 232.
2. **Macleod H.A. 2001.** Thin-Film Optical Filters / H. A. Macleod. – 3rd ed. – London: IOP. – 631.
3. **Солдатенко В. 2014.** Имитационная модель гибридной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / В. Солдатенко, М. Кубкин, Л. Вихрова // MOTROL. Commission of Motorization and energetics in agriculture. Vol.16. No.4. 233-240.
4. **Ohlidal I. 1985.** A new method for the complete optical analysis of weakly absorbing thin films: application to polycrystalline silicon films / I. Ohlidal, K. Navratil, J. Muslimov // Thin Solid Films. – V. 127. – 191-203.
5. **Babeva T. 2001.** Photometric methods for determining the optical constants and the thicknesses of thin absorbing films / T. Babeva, S. Kitova, I. Konstantinov // Appl. Opt. – V. 40. – 2682-2686.
6. **Lunacek J. 2009.** Simple method for determination of the thickness of a nonabsorbing thin film using spectral reflectance measurement / J. Lunacek, P. Hlubina, M. Lunackova // Appl. Opt. – V. 48. – 985-989.
7. **Martinez-Anton J.C. 2002.** Spectroscopic ellipsometry of non-absorbing films independent of film thickness / J. C. Martinez-Anton, J. A. Gomez-Pedrero // Appl. Surf. Sci. – V. 193. – 268-276.
8. **Xie H. 2006.** Characterisation of Sol-gel Thin Films by Spectroscopic Ellipsometry / H. Xie, J. Wei, X. Zhang // J. Phys.: Conf. Ser. – V. 28. – 95-99.
9. **Ghezzi M. 1968.** Thickness calculations for a transparent film from ellipsometric measurements / M. Ghezzi // J. Opt.Soc.Amer. – V. 58. – No. 3. – 368-372.
10. **Azzam R.M.A. 1975.** Ellipsometric Function of a Film-Substrate System: Applications to the Design of Reflection-Type Optical Devices and to Ellipsometry / R. M. A. Azzam, A. R. M. Zaghoul, N. M. Bashara // J. Opt. Soc. – V. 65. – 252-260.
11. **Azzam R.M.A. – 1975.** Combined Reflection and Transmission Thin-Film Ellipsometry: A Unified Linear Analysis / R. M. A. Azzam, M. Elshazly-Zaghoul, N. M. Bashara // Appl. Opt. – V. 14. – 1652-1663.
12. **Кособуцкий П.С. 2006.** Определение параметров однослойных структур по методу анализа огибающих спектров Фабри-Перо / П. С. Кособуцкий // Оптический журнал. – Т. 73, № 12. – 73-76.
13. **Swanepoel R. 1984.** Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films / R. Swanepoel // J. Phys. E: Sci Instrum. – V. 17. – 896-903.
14. **Siapkas D. 1991.** Optical constants of tin-telluride determined from infrared interference spectra / D. Siapkas, D. B. Kushev, N. N. Zheleva et al. // Infrared Phys. – V. 31, No. 5. – 425-433.
15. **Kushev D.B. 1995.** Transmittivity, reflectivities and absorptivities of a semiconductor film with a linear variation in thickness / D. B. Kushev, N. N. Zheleva // J. Phys. D: Appl. Phys. – V. 8. – 1239-1243.
16. **Kushev D.B. 1991.** An envelope method for determination of thin optical constants of absorptive films on absorptive substrate / D. B. Kushev, N. N. Zheleva, M. I. Gyulmezov, M. H. Koparanova // Infrared Phys. – V. 34, No. 2. – 163-167.
17. **Филиппов В.В. 2006.** Метод огибающих для исследования системы двух пленок на отражающей подложке / В. В. Филиппов // Оптика и спектроскопия. – Т. 101. – 485-489.
18. **Kushnir O.P. 2009.** Application of spectral envelope functions of multilayer structures for analytical determination of antireflection conditions / O. P. Kushnir // Ukrainian Journal of Physical Optics. – V. 10, № 2. – 82-88.
19. **Кособуцкий П.С. 2009.** Определение оптических параметров прозрачной двухслойной структуры / П. С. Кособуцкий, П. И. Кушнир, Я. М. Бильий, О. П. Кушнир // Вестник ЛДАУ, Агроинженерные исследования, №13, 401-406.
20. **Гребенщиков И.В. 1946.** Просветление оптики / И. В. Гребенщиков, А. Г. Власов, Б. С. Непорент, Н. В. Суйковская. – Ленинград: ОГИЗ. – 215.
21. **Гавриленко В.И. 1987.** Оптические свойства полупроводников (Справочник) / В. И. Гавриленко, А. М. Грехов, Д. В. Корбутяк и др. – К: Наукова думка. – 608.

DETERMINATION OF THE OPTICAL CONSTANTS AND LAYER'S THICKNESSES OF WEAKLY ABSORBING DOUBLE-LAYER STRUCTURE

Summary. Using expressions for minimums and maximums envelope of the reflection spectra of weakly absorbing two-layer structure, the method of layer's optical constants and thicknesses definition have been developed. The proposed method is based on the analysis of two experimental reflection spectra. One of them is the reflection spectrum of double-layer structure with an explored upper layer for which the optical constants and thickness need to be determined. Second is the reflection spectrum of one-layer structure without an explored upper layer. Advantage of this method is possibility of a select of structure with any ratio between refractive indices of both layers. The proposed method can be used for definition of optical constants and thickness of an thin weakly absorbing layer coated on a thick transparent layer. Uses of a thick additional layer gives the possibility to obtain sufficient number of the extrema in the reflection spectrum for plotting envelopes and definitions of unknown parameters.

Key words: two-layer structure, reflection spectra envelopes, multi-beam interference, refractive index, optical constants.