

УДК 535.3

ББК 22.343

Проблема нахождения оптимального значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности

Алтунин Константин Константинович,

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», г. Ульяновск, Россия

Агентова Виктория Сергеевна,

ученица университетских классов ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», г. Ульяновск, Россия

Аннотация. Предложен графический способ нахождения оптимального значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности нанокompозитной плёнки. Графическим способом решается проблема нахождения оптимального значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным. Представлены результаты численных расчётов эффективного показателя преломления по заданным значениям энергетического коэффициента отражения нанокompозитной плёнки на фиксированной длине волны оптического излучения. Знание значения эффективного показателя нанокompозитной плёнки позволяет использовать исследованную нанокompозитную плёнку в многослойных нанокompозитных покрытиях различных оптических и оптоэлектронных приборов.

Ключевые слова: нанокompозитная плёнка, нанокompозит, оптическое излучение, показатель преломления, разброс значений показателя преломления, показатель преломления, коэффициент отражения, графический метод решения уравнения

В последние десять лет в мире ведётся интенсивная разработка наноматериалов – материалов, содержащих включения из различных наноразмерных систем или нанообъектов, которые создаются для приложений в области наноэлектроники и наноразмерной оптоэлектроники. Наноматериалы компонуются из структурных наноразмерных элементов, вид и взаимное расположение которых можно задавать в процессе изготовления. Если размер структурных элементов наноматериала и характерное расстояние между ними существенно меньше длины волны оптического излучения, то наноматериал можно рассматривать в приближении эффективной среды, характеризующийся эффективными материальными параметрами такими, как эффективный показатель преломления. Возможно создание наноструктур с необычными оптическими откликами.

В настоящей работе решается проблема нахождения оптимального значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности. Предложен графический способ нахождения оптимального значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности нанокompозитной плёнки.

Целью работы является нахождение значений эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности плёнки.

Объектом исследования является нанокompозитная плёнка.

Предметом исследования является процесс расчёта эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по экспериментальным данным отражательной способности.

В качестве методов исследования используются численные методы решения уравнения для отражательной способности плёнки, расположенной между двумя полубесконечными средами из воздуха.

Характерная структура наноструктурных плёнок представлена в работе [1], где обсуждается также алгоритм численного моделирования показателя преломления таких плёнок. Плёнки, состоящие из PMMA+Ag нанокompозитных материалов с близкими к нулю показателями преломления и поглощения, представляют собой высокоэффективные просветляющие покрытия в диапазоне длин волн от 420 до 1055 нм [2].

В нанопокровениях из нанокompозитных материалов возможны физические процессы усиленного пропускания оптического излучения в активных нанокompозитных материалах [3-4] или волнового огибания сред из сильно анизотропных наноматериалов [5-6].

В процессе исследования рассмотрим характерные особенности металл-полимерных нанокompозитных плёнок. Наиболее распространённым методом описания оптических свойств нанокompозитов является метод, основанный на использовании формул Френеля. Во всех случаях амплитудные коэффициенты Френеля являются комплексными величинами кроме случая отражения оптического излучения от непоглощающих диэлектриков и преломления на границе раздела непоглощающих диэлектриков. Оптические свойства нанокompозитной плёнки рассмотрим в приближении эффективной среды, в которой среда характеризуется эффективным показателем преломления n_1 . Энергетический коэффициент отражения при нормальном падении s -поляризованной оптической волны от поверхности нанокompозитной плёнки толщины d_1 , расположенной между двумя полубесконечными средами из воздуха, находится по формуле

$$R_1^s(n_1) = \frac{2(n_1 + 1)^2(n_1 - 1)^2(1 - \cos(2k_0 d_1 n_1))}{(n_1 + 1)^4 - 2(n_1 + 1)^2(n_1 - 1)^2 \cos(2k_0 d_1 n_1) + (n_1 - 1)^4}, \quad (1)$$

которая эквивалентна формуле

$$R_1^s(n_1) = \frac{(n_1^2 - 1)^2 \operatorname{tg}^2(2k_0 d_1 n_1)}{(n_1^2 + 1)^2 \operatorname{tg}^2(2k_0 d_1 n_1) + 4n_1^4}, \quad (2)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ - волновое число вакуума, λ - длина волны внешнего излучения оптической волны.

Энергетический коэффициент оптического пропускания нанокompозитной плёнки толщины d_1 , расположенной между двумя полубесконечными средами из воздуха, находится по формуле

$$T_1^s(n_1) = \frac{16n_1^2}{(n_1 + 1)^4 - 2(n_1 + 1)^2(n_1 - 1)^2 \cos(2k_0 d_1 n_1) + (n_1 - 1)^4}. \quad (3)$$

Рассмотрим решение уравнения

$$R_1^s(n_1) = R_{1\text{exp}}^s(n_1), \quad (4)$$

где $R_{1\text{exp}}^s(n_1)$ - экспериментальное значение энергетического коэффициента оптического отражения от поверхности нанокompозитной плёнки толщины d_1 . Уравнение (4) для нахождения значений эффективного показателя преломления n_1 можно представить в виде

$$\frac{2(n_1 + 1)^2(n_1 - 1)^2(1 - \cos(2k_0 d_1 n_1))}{(n_1 + 1)^4 - 2(n_1 + 1)^2(n_1 - 1)^2 \cos(2k_0 d_1 n_1) + (n_1 - 1)^4} = R_{1\text{exp}}^s(n_1), \quad (5)$$

из которого графическим и численным способами найдём решения уравнения. Графики, изображённые на рис. 1-4, показывают графический способ поиска нулей функции разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки из уравнения (5) в зависимости от эффективного показателя преломления плёнки на длине волны $\lambda = 514$ нм. На рис. 1 изображена зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 0.8$ мкм, б) $d_1 = 0.85$ мкм, в) $d_1 = 0.9$ мкм, д) $d_1 = 0.95$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм. Экспериментальное значение энергетического коэффициента оптического отражения для металл-полимерной нанокompозитной плёнки с весовым

содержанием наночастиц серебра 5 % и средним радиусом наночастиц 2.5 нм на данной длине волны равно 0.02 [6]. Металл-полимерная нанокомпозитная плёнка состоит из полимерной матрицы из полиметилметакрилата и системы наноразмерных включений в виде сферических наночастиц серебра.

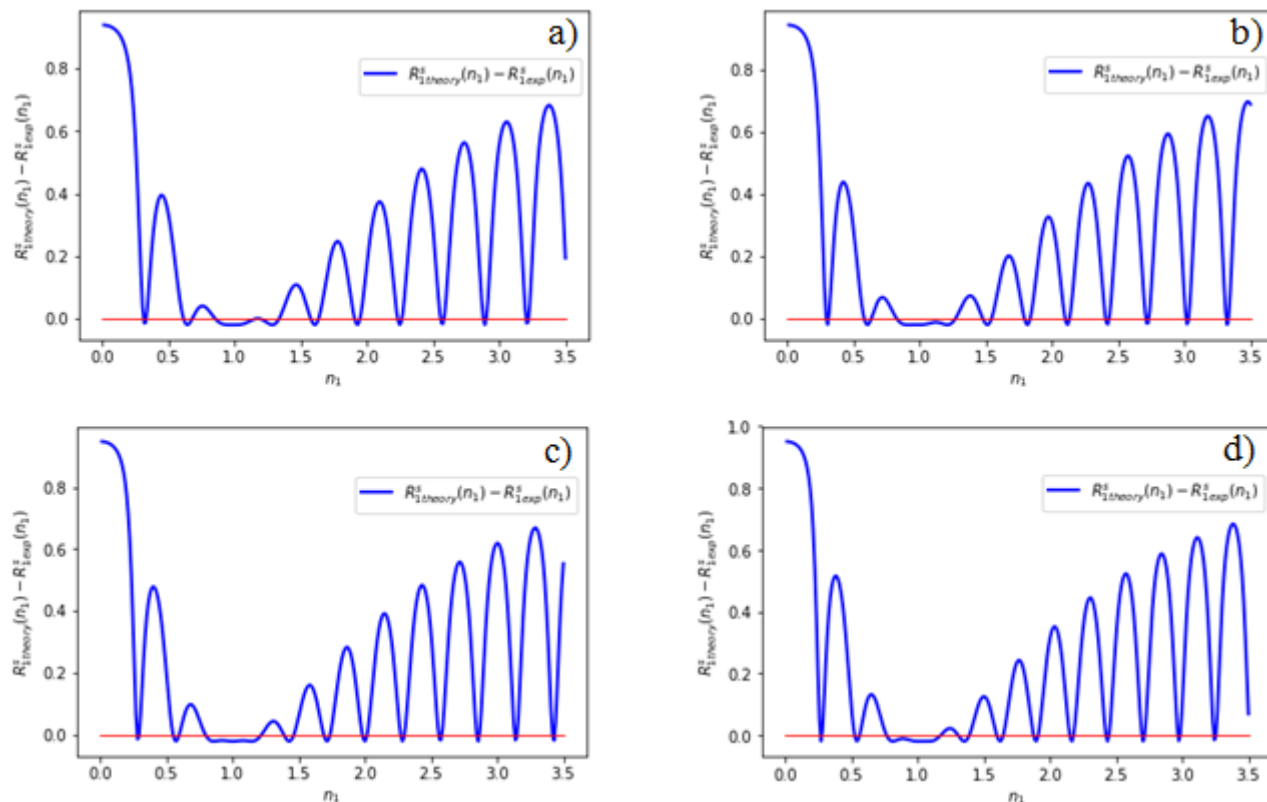


Рис. 1. Зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокомпозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 0.8$ мкм, б) $d_1 = 0.85$ мкм, в) $d_1 = 0.9$ мкм, г) $d_1 = 0.95$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны $\lambda = 514$ нм.

Пересечения линии графика с линией нулевых значений указывают искомые нули функции. В случае пассивной "правой" среды следует отбирать решения, удовлетворяющие условию $1 < n_1 < n_m$, которые принимают наименьшее значение, близкое к единице. Показатель преломления матрицы из полиметилметакрилата нанокомпозитной плёнки $n_m = 1.492$. Поэтому по рис. 1 выбираем первый положительный корень в области $1 < n_1 < n_m$. Значение

эффективного показателя преломления n_1 , отвечающего толщине $d_1 = 0.8$ мкм равно $n_1 = 1.3368$, толщине $d_1 = 0.85$ мкм равно $n_1 = 1.2703$, толщине $d_1 = 0.9$ мкм равно $n_1 = 1.2160$, толщине $d_1 = 0.95$ мкм равно $n_1 = 1.3044$.

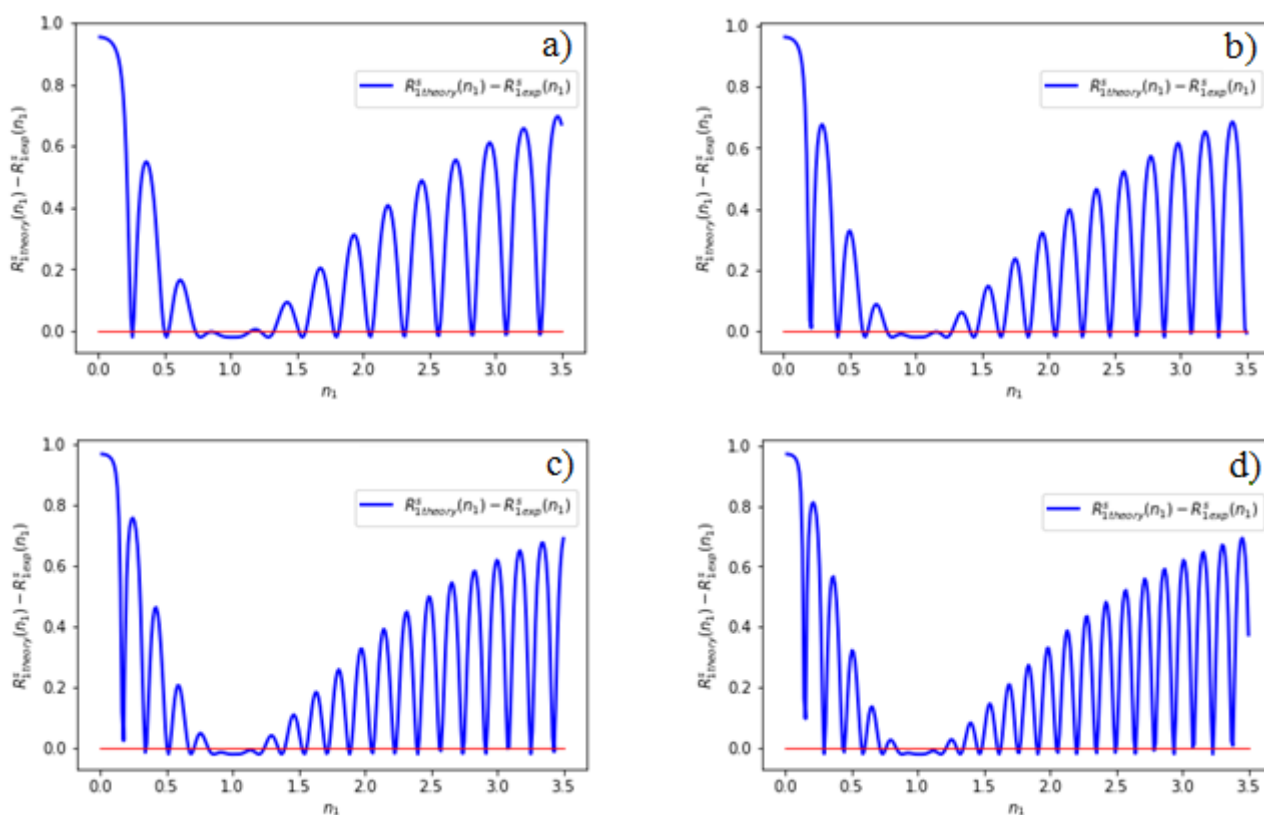


Рис. 2. Зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 1$ мкм, б) $d_1 = 1.25$ мкм, в) $d_1 = 1.5$ мкм, г) $d_1 = 1.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны $\lambda = 514$ нм.

На рис. 2 изображена зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 1$ мкм, б) $d_1 = 1.25$ мкм, в) $d_1 = 1.5$ мкм, г) $d_1 = 1.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм. Пересечения линии графика с линией нулевых значений указывают искомые нули функции. По рис. 2 выбираем первый положительный корень $n_1 > 1$. Значение эффективного

показателя преломления n_1 , отвечающего толщине $d_1 = 1$ мкм равно $n_1 = 1.2199$, толщине $d_1 = 1.25$ мкм равно $n_1 = 1.2744$, толщине $d_1 = 1.5$ мкм равно $n_1 = 1.2388$, толщине $d_1 = 1.75$ мкм равно $n_1 = 1.2133$.

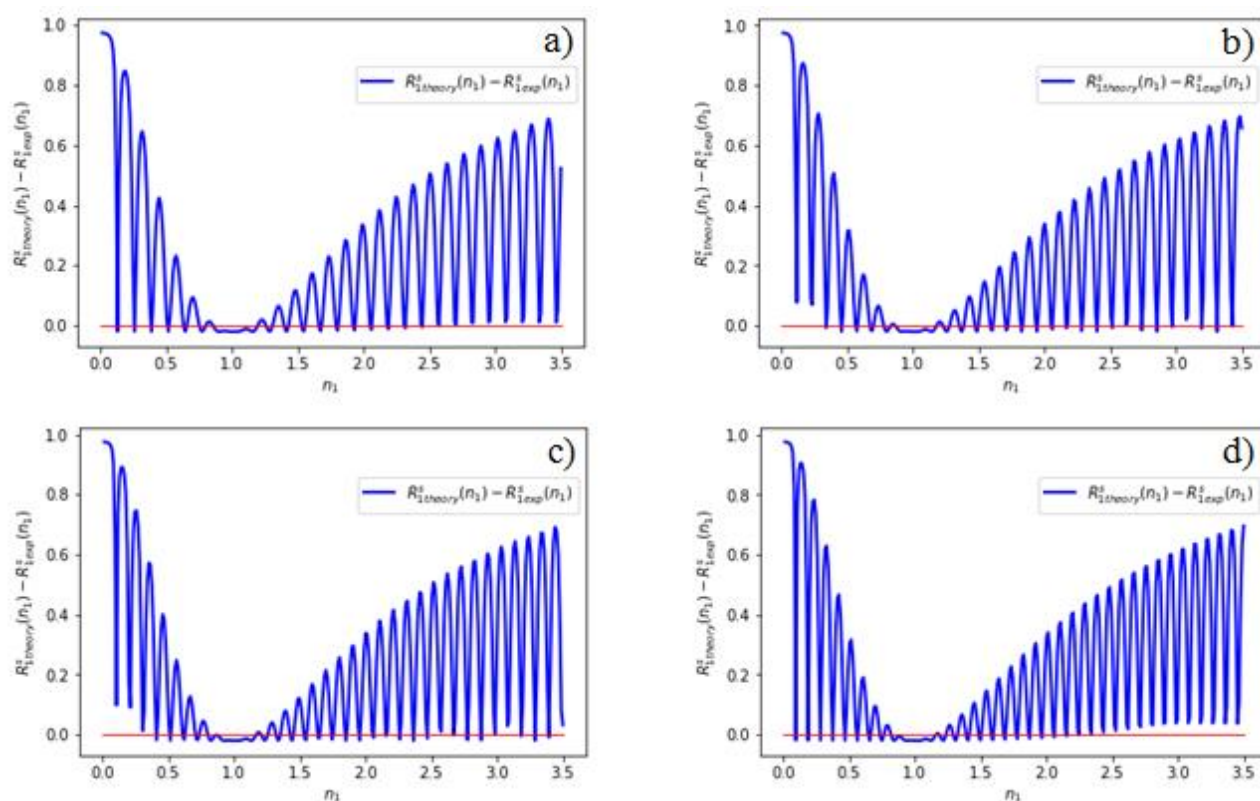


Рис. 3. Зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 2.0$ мкм, б) $d_1 = 2.25$ мкм, в) $d_1 = 2.5$ мкм, г) $d_1 = 2.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны $\lambda = 514$ нм.

На рис. 3 изображена зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 2.0$ мкм, б) $d_1 = 2.25$ мкм, в) $d_1 = 2.5$ мкм, г) $d_1 = 2.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм. Экспериментальное значение энергетического коэффициента отражения плёнки на данной длине волны равно 0.02. Пересечения линии графика с линией нулевых значений указывают

искомые нули функции. По рис. 3 выбираем первый положительный корень $n_1 > 1$. Значение эффективного показателя преломления n_1 , отвечающего толщине $d_1 = 2.0$ мкм равно $n_1 = 1.2578$, толщине $d_1 = 2.25$ мкм равно $n_1 = 1.2289$, толщине $d_1 = 2.5$ мкм равно $n_1 = 1.2556$, толщине $d_1 = 2.75$ мкм равно $n_1 = 1.2366$.

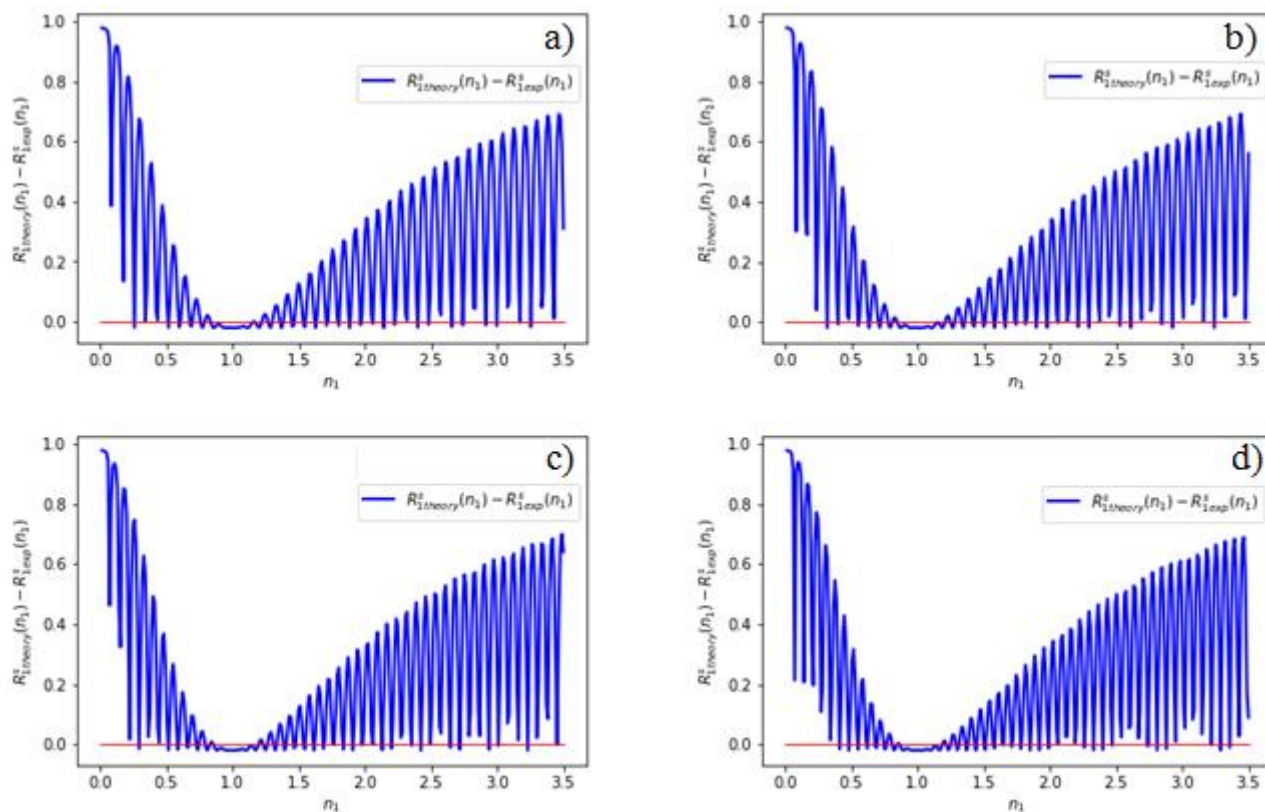


Рис. 4. Зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 3.0$ мкм, б) $d_1 = 3.25$ мкм, в) $d_1 = 3.5$ мкм, г) $d_1 = 3.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны $\lambda = 514$ нм.

На рис. 4. изображена зависимость разности теоретического и экспериментального энергетических коэффициентов отражения нанокompозитной плёнки толщиной а) $d_1 = 3.0$ мкм, б) $d_1 = 3.25$ мкм, в) $d_1 = 3.5$ мкм, г) $d_1 = 3.75$ мкм как функция эффективного показателя преломления плёнки на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм. Экспериментальное значение энергетического коэффициента отражения плёнки на данной длине волны

равно 0.02. Пересечения линии графика с линией нулевых значений указывают искомые нули функции. По рис. 4 выбираем первый положительный корень $n_1 > 1$. Значение эффективного показателя преломления n_1 , отвечающего толщине $d_1 = 3.0$ мкм равно $n_1 = 1.2676$, толщине $d_1 = 3.25$ мкм равно $n_1 = 1.2477$, толщине $d_1 = 3.5$ мкм равно $n_1 = 1.2307$, толщине $d_1 = 3.75$ мкм равно $n_1 = 1.2487$.

Усреднение всех значений эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки, полученных в результате численных расчётов, даёт значение эффективного показателя преломления $n_1 = 1.1733$ на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм. Полученное значение меньше значений показателя преломления стёкол, что свидетельствует о высокой прозрачности нанокompозита на длине волны излучения $\lambda = 514$ нм.

Если учитывать разброс значений эффективного показателя преломления для вычисления действующих амплитуд отражённой и прошедшей волн от нанокompозитной плёнки необходимо усреднять по интервалу разброса значений эффективного показателя преломления по всем индуцированным волновым пакетам из отражённых или прошедших волн соответственно [7].

Рассмотренные особенности графического и численного поиска значений эффективного показателя преломления имеют большую практическую значимость в современной оптике нанокompозитных материалов для проектирования новых наноразмерных приборов оптоэлектроники. Знание значения эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки позволяет использовать исследованную нанокompозитную плёнку в многослойных нанокompозитных покрытиях различных оптических и оптоэлектронных приборах.

Список использованных источников

1. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Ушаков Н. М. Идеальное оптическое просветление композитных плёнок, активированных сферическими наночастицами // Письма в ЖЭТФ. 2009. Том 90. № 4. С. 273-278.
2. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Ушаков Н. М., Кособудский И. Д., Подвигалкин В. Я., Кульбацкий Д. М. Высокоэффективные просветляющие наноструктурные оптические покрытия для солнечных элементов // Журнал технической физики. 2010. Том 80. № 7. С. 83-89.
3. Гадомский О. Н., Степин С. Н., Ушаков Н. М., Алтунин К. К., Русин А. А., Зубков Е. Г. Усиленное оптическое пропускание композитных наноструктурных толстых плёнок с квазинулевым показателем преломления (I. Экспериментальные данные) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 4 (24). С. 227-236.
4. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Русин А. А., Зубков Е. Г. Усиленное оптическое пропускание композитных наноструктурных толстых плёнок с квазинулевым показателем преломления (II. Теория) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2013. № 1 (25). С. 122-134.
5. Гадомский О. Н., Гадомская И. В., Щукарев И. А. Обтекание светом плоской границы раздела вакуум–оптическая среда с квазинулевым показателем преломления // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 5. С. 831-838. [Gadomsky O. N., Gadomskaya I. V., Shchukarev I. A. The wave flow effect on a plane boundary vacuum and an optical medium with a quasi-zero refractive index // Optics and Spectroscopy. 2016. Vol. 120. № 5. pp. 781-787.]
6. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Ушаков Н. М., Кособудский И. Д., Подвигалкин В. Я., Кульбацкий Д. М. Высокоэффективные просветляющие наноструктурные оптические покрытия для солнечных элементов // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. № 7. С. 83-89. [Gadomskii O. N., Altunin K. K., Ushakov N. M., Kosobudskii I. D., Podvigalkin V. Y., Kulbatskii D. M. High-efficiency antireflection nanostructural optical coatings for solar

cells // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 55. № 7. pp. 996-1002.]

7. Гадомский О. Н., Щукарев И. А. Эффект огибания светом в плоскопараллельном слое с квазинулевым показателем преломления под действием ограниченных световых пучков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. Т. 150. № 2. С. 214-228. [Gadomsky O. N., Shchukarev I. A. The light wave flow effect in a plane-parallel layer with a quasi-zero refractive index under the action of bounded light beams // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2016. Vol. 123. № 2. pp. 184-196.]