

УДК 535.32

А. С. Кадочкин, А. С. Шалин, Н. А. Маслов, А. М. Низаметдинов

НЕПОГЛОЩАЮЩИЙ МЕТАМАТЕРИАЛ С ДИСПЕРСИЕЙ ЭФФЕКТИВНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ¹

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для многих приложений важным является определение так называемых эффективных материальных параметров, позволяющих описывать их в привычных терминах показателя преломления или диэлектрической и магнитной проницаемостей. В данной работе исследуется применимость методов определения эффективного показателя преломления к композитной пленке, составленной из упорядочено распределенных в пространстве нанообъектов. Нами показано ранее, что нанокompозитный слой со сферическими либо цилиндрическими пора́ми может придавать отраженной волне дополнительный фазовый сдвиг, зависящий от частоты падающего поля, обеспечивая тем самым широкополосное просветление, что формально соответствует частотной дисперсии эффективного показателя преломления наноструктуры, что вызывает интерес, поскольку материал компонентов системы частотной дисперсией не обладает. *Материалы и методы.* В данной работе для определения эффективного показателя преломления системы упорядочено распределенных в пространстве используется метод NRW (Nicholsson-Ross-Weir), позволяющий определить эффективный показатель преломления нанокompозитной пленки по известным коэффициентам отражения и пропускания. *Результаты.* Показано, что проведение процедуры гомогенизации невозможно в общем случае для описания оптических свойств композитных пленок, обладающих существенной неоднородностью даже при условии малости их оптической толщины по сравнению с длиной волны. Вместе с тем найдены конфигурации, для которых данный метод работает; для найденных конфигураций показано наличие частотной дисперсии показателя преломления при полном отсутствии поглощения в пленке. Показано, что полученная частотная зависимость эффективного показателя преломления не противоречит соотношениям Крамерса – Кронига. *Выводы.* Показано, что предложенное ранее наноструктурное просветляющее покрытие, представляющее собой нанопоры в поверхности среды, расположенные в виде упорядоченной решетки, обладает дисперсией эффективного показателя преломления, что может быть использовано для «подстройки» его оптических свойств и обеспечения просветления в более широком диапазоне длин волн, нежели это возможно при использовании гомогенных пленок. Обнаруженный эффект может быть использован при построении тонкопленочных композитных оптических покрытий различного назначения.

Ключевые слова: метаматериал, эффективный показатель преломления, композитная среда, частотная дисперсия.

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания на 2012–2014 гг., госконтракт № 14.В37.21.1634, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов № 12-02-31423-мол_а, № 14-02-31765, № 14-08-31730, № 13-02-90765.

A. S. Kadochkin, A. S. Shalin, N. A. Maslov, A. M. Nizametdinov

NON-ABSORBING METAMATERIAL WITH DISPERSION OF EFFECTIVE REFRACTIVE INDEX

Abstract. *Background.* For many applications it is important to define the so-called effective material parameters that allow describing them in familiar terms of the refractive index or the dielectric permittivity and magnetic permeability. The article investigates the applicability of the method for determining the effective refractive index of a composite film consisting of ordered nano-objects. The authors have shown previously that the nanocomposite layer with spherical or cylindrical pores of the reflected wave can impart additional phase shift dependent on the frequency of the incident field, thus providing broadband illumination, which formally corresponds to the frequency dispersion of the effective refractive index nanostructure that is of interest, because the material components are non-dispersive. *Materials and methods.* In this paper, the researchers use the NRW-method (Nicholsson-Ross-Weir) to determine the effective refractive index of the nanocomposite films from reflection and transmission coefficients. *Results.* It is shown that homogenization procedure is not always appropriate for describing the optical properties of composite films, having substantial inhomogeneity even in condition when its optical thickness is smaller compared with the wavelength. However, the authors discovered a configuration for which this method works. For the found configuration the researchers showed the presence of the frequency dispersion of the refractive index in the absence of absorption in the film. It is also shown that the frequency dependence of the effective refractive index does not contradict to the Kramers-Kronig relation. *Conclusions.* It is shown that the previously proposed nanostructured antireflective coating, consisting of nano-pores in the surface of the medium, disposed in a lattice arrangement, has a dispersion of the effective refractive index that can be used to "tune" the optical properties and to provide broadband antireflection, than is not possible for the homogeneous films. The present effect can be used to construct the composite thin-film optical coatings for various purposes.

Key words: metamaterial, effective refractive index, effective parameters, frequency dispersion.

Введение

Метаматериалы – это искусственные структуры, которые обладают свойствами, не присущими их составным частям, и не встречаются в природе. Для многих приложений (например, конструирование и исследование «левых» сред, гиперболических метаматериалов, структур с близким к единице показателем преломления) [1] важным является определение так называемых эффективных материальных параметров таких сред, позволяющих описывать их в привычных терминах показателя преломления или диэлектрической и магнитной проницаемостей. Нахождение указанных характеристик, или процедура гомогенизации, заключается в замещении реальной композитной среды некоторой однородной эффективной, обладающей теми же оптическими свойствами. Имеется ряд работ (см., например, [2]), в которых показывается, что в общем случае для произвольной композитной среды построение полностью эквивалентной эффективной среды невозможно. В работе [2] в связи с этим предлагается разделение определяемых в результате проводимой тем или иным образом процедуры гомогенизации оптических параметров на собственно эффективные, т.е. присущие эффективной среде, связанные не только

с параметрами композита, но и с конкретной физической ситуацией, для которой они определены (толщина пленки, угол падения и т.п.), и характеристические, т.е. характеризующие среду в различных физических условиях. В работе [3] также отмечено, что эффективные параметры, определенные для тонкого слоя, не могут быть напрямую применены к массивной среде, а параметры, найденные при нормальном падении излучения, не всегда применимы при других углах падения. В частности, при отражении света от периодических решеток при наклонном падении могут наблюдаться так называемые аномалии Вуда, когда в результате взаимодействия падающей волны с возникающей поверхностной при определенных углах падения энергия падающей волны перекачивается в первый порядок дифракции, что невозможно в эквивалентной однородной эффективной среде.

Известно несколько основных методов определения эффективных оптических параметров. В качестве приближенных подходов следует отметить существующие аналитические методы эффективной среды, например, теории Максвелла – Гарнетта, Бруггемана, Клаузиуса – Мосотти, а также их модифицированные версии [4, 5]. Достоинством указанных подходов является простота использования, однако область их применения весьма ограничена, что обусловлено введенными в них приближениями [5–7]. В работах [8, 9] рассматривается способ точного нахождения эффективного показателя преломления, для чего используется численное усреднение полей в объеме элементарной ячейки. При этом проблемой является выбор подходящего контура или поверхности интегрирования [10]. В работе [11] предлагается метод определения эффективных параметров квазипериодических метаматериалов, основанный на анализе распространения блоховских волн в квазипериодических композитных структурах.

Наиболее часто используемый метод определения эффективного показателя преломления композитной пленки развит, например, в работах [12–14] (метод RNW). Указанный подход позволяет определить материальные параметры среды по известным амплитудным коэффициентам отражения и пропускания (или S -параметрам).

В данной статье будет исследована применимость метода [12–14] для определения эффективного показателя преломления системы упорядочено распределенных в пространстве нанообъектов и, в частности, предложенного в наших работах [15–19] наноструктурного широкополосного просветляющего покрытия. В работе [15] показано, что подобный нанокомпозитный слой со сферическими либо цилиндрическими пораами может придавать отраженной волне дополнительный фазовый сдвиг, зависящий от частоты падающего поля, обеспечивая тем самым широкополосное просветление (слой является «четвертьволновым» в некотором спектральном диапазоне, а не на единственной длине волны, как это имеет место в гомогенной пленке). Формально это соответствует частотной дисперсии эффективного показателя преломления наноструктуры, что вызывает интерес, поскольку материал компонентов системы частотной дисперсией не обладает. В данной работе возможность возникновения подобной зависимости эффективных оптических констант наноструктурной пленки от длины волны излучения будет исследована при помощи прямого численного расчета.

Следует отметить, что, поскольку в рамках данного исследования мы не будем выходить за рамки определенной физической конфигурации,

а именно: нормального падения света на поверхность среды с тонкослойным композитным покрытием, нет необходимости определять характеристические параметры, и для адекватного описания взаимодействия электромагнитной волны с веществом в данном случае вполне достаточно эффективных параметров в терминах работы [2].

1. Эффективный показатель преломления пленки с внедренным слоем нанобъектов

Определим эффективный показатель преломления структуры, предложенной в [15], которая представляет собой диэлектрическую матрицу с показателем преломления $n = 1,5$ с внедренными в нее нанополостями сферической формы, расположенными в виде квадратной решетки. На рис. 1 представлена элементарная ячейка исследуемой структуры, используемая для численного расчета S -параметров.

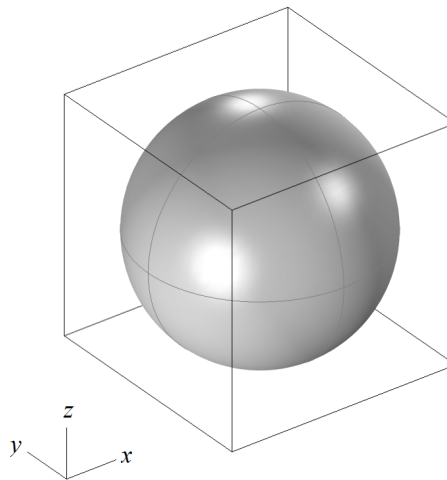


Рис. 1. Элементарная ячейка упорядоченного слоя нанополостей. Вектор $\mathbf{k}$ направлен вдоль оси z , вектор $\mathbf{E}$ – вдоль оси y ; размер ячейки – 100 нм

Эффективный показатель преломления связан с S -параметрами согласно [14] следующим выражением:

$$n_{eff} = \pm \frac{1}{k_0 d} \left\{ \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] + 2\pi m \right\}, \quad (1)$$

где k_0 – модуль вакуумного волнового вектора; d – толщина пленки; m – целое число, выбираемое так же, как и знак перед выражением из условия непрерывности и гладкости $n_{eff}(\lambda)$.

Если компоненты S -матрицы S_{11} и S_{21} в формуле (1) найдены каким-либо способом (экспериментально или путем численного расчета), становится возможным определение эффективного показателя преломления n_{eff} . Для непоглощающей среды, как показано в [20], выражение (1) можно упростить, в результате чего эффективный показатель преломления описывается выражением

$$n_{eff} = \frac{1}{k_0 d} \arccos \left[\operatorname{Re} \left(\frac{1}{S_{21}} \right) \right], \quad (2)$$

т.е. определяется только параметром S_{21} (знаки перед выражением и $2\pi t$ опущены).

В рамках данной работы для определения S -параметров рассматриваемой системы нами используется численный расчет на основе метода конечных элементов, реализованный в программной среде Comsol Multiphysics. На рис. 2 приведены результаты численного расчета для структуры, отображенной на рис. 1. На рис. 2,*а* представлена определенная при помощи выражения (2) дисперсионная зависимость эффективного показателя преломления композитной пленки. Видно, что эффективный показатель преломления сильно зависит от длины волны падающего излучения, кроме того, в спектральном интервале 250–280 нм зависимость не является гладкой, и в этом же диапазоне показатель преломления имеет мнимую часть (рис. 2,*б*). Поскольку материалы, составляющие композитную пленку, не являются поглощающими, физически такая ситуация невозможна. Пропускание системы, рассчитанное с помощью полученного эффективного показателя преломления (рис. 2,*в*), также не совпадает с результатами непосредственного численного расчета. На рис. 2,*г* приведена зависимость аргумента арккосинуса из выражения (2) от длины волны. Видно, что в диапазоне длин волн 250–280 нм данная величина превышает по модулю единицу, что и приводит к появлению возникающей в расчетах мнимой части эффективного показателя преломления. Таким образом, возникает вопрос о границах применимости выражений типа (2).

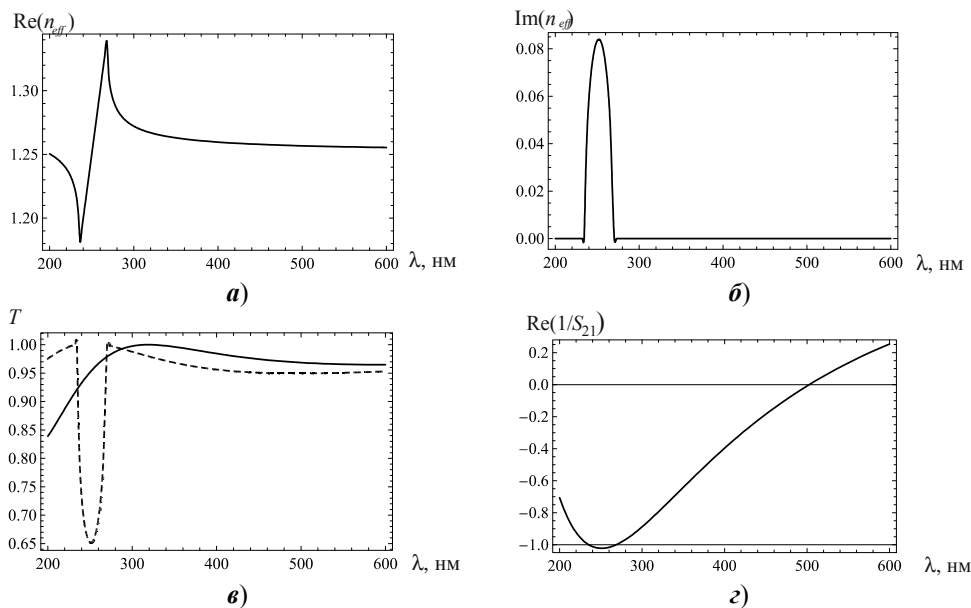


Рис. 2. Результаты численного расчета для конфигурации, изображенной на рис. 1:
 а, б – действительная и мнимая части эффективного показателя преломления;
 в – пропускание композитной пленки, рассчитанное аналитически с использованием найденного эффективного показателя преломления (пунктирная линия) и численно (сплошная линия); г – аргумент арккосинуса в формуле (2)

Для выяснения природы данного явления нами были исследованы три конфигурации, элементарные ячейки которых приведены на рис. 3. Геометрия, представленная на рис. 3,а, представляет собой хорошо известную многослойную структуру, отражение и пропускание которой легко рассчитать аналитически. Результаты численных и аналитических расчетов дают картину, качественно аналогичную наблюдающейся для сферической полости (рис. 4,а,в). У структур, изображенных на рис. 3,б,в, стенки полости параллельны вектору $\mathbf{k}$, а поперечные границы совпадают с границами пленки. Из рис. 4,б видно, что в случае, когда стенки полости параллельны плоскости падения, аномалии показателя преломления отсутствуют, он является действительной величиной, причем обладает небольшой дисперсией. Следует отметить, что качественно аналогичный результат (дисперсия) экспериментально был получен в работе [21]. Авторами измерен эффективный показатель преломления тонкого слоя, состоящего из «ворсинок» из диоксида кремния на кремниевой подложке, показано, что указанная величина убывает с ростом длины волны.

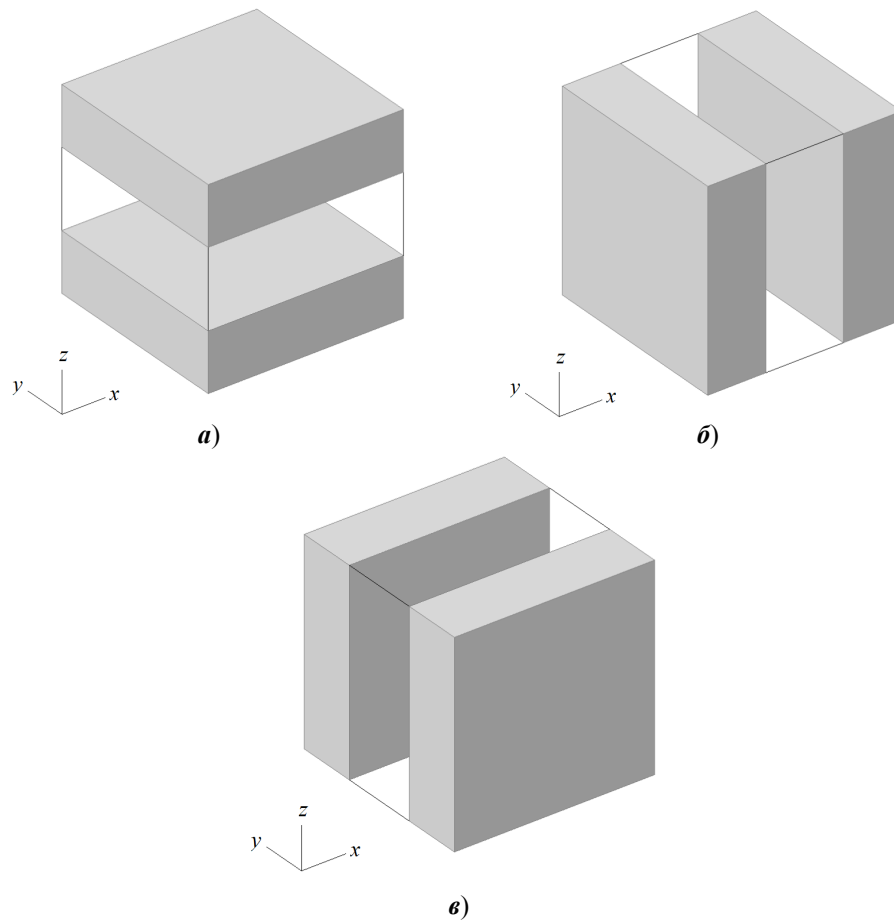


Рис. 3. Элементарные ячейки слоя нанополостей различной ориентации.
Вектор $\mathbf{k}$ направлен вдоль оси z , вектор $\mathbf{E}$ – вдоль оси y ; размер ячейки – 100 нм.
Серая область – показатель преломления, равен 1,5, прозрачная область – показатель преломления, равен 1

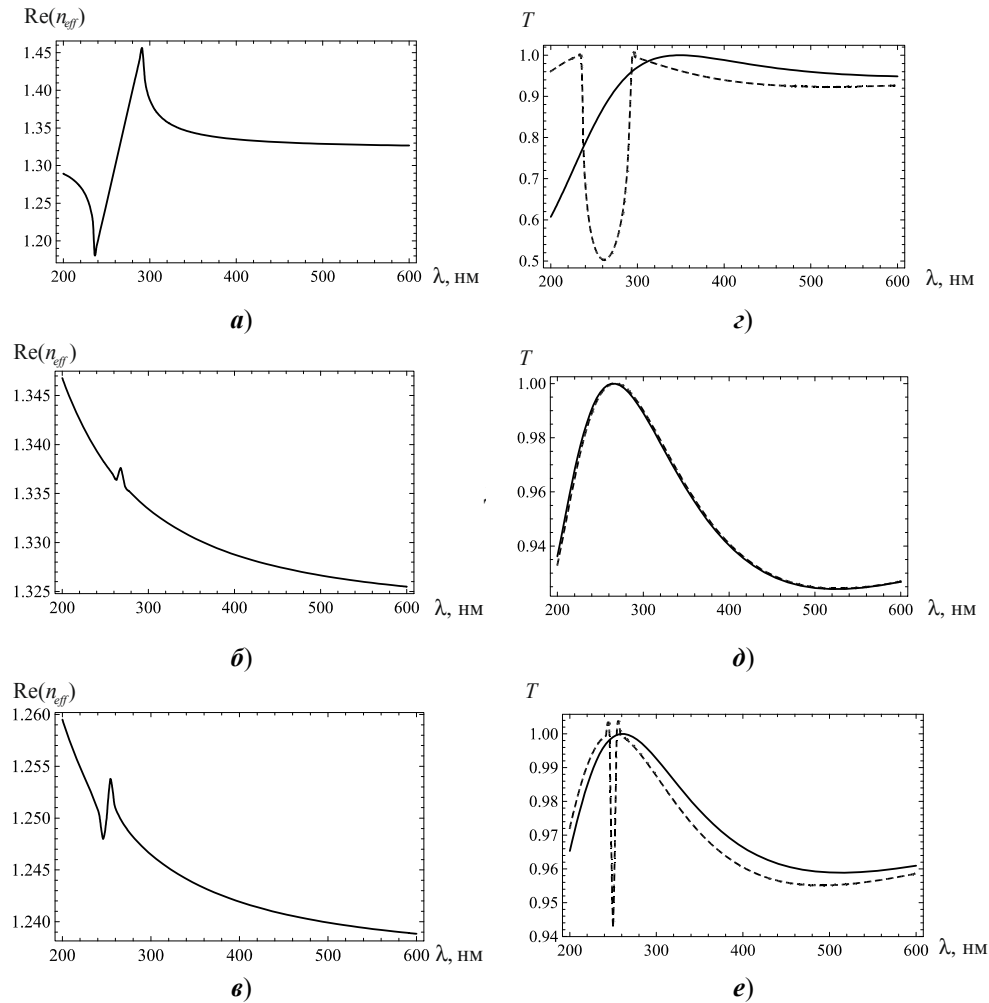


Рис. 4. Результаты расчетов для конфигураций, представленных на рис. 3, а – (а, з), рис. 3, б – (б, д) и рис. 3, в – (в, е); а, б, в – эффективный показатель преломления; з, д, е – пропускание композитной пленки, рассчитанное аналитически при помощи формул Эйри с использованием найденного эффективного показателя преломления (пунктирная линия) и рассчитанное численно (сплошная линия)

Пропускание, рассчитанное с использованием найденного эффективного показателя преломления, как видно из рис. 4, д, совпадает с определенным численно. В случае, когда стенки полости перпендикулярны плоскости падения (рис. 3, в), аномалии показателя преломления имеют место, но в значительно меньшем диапазоне длин волн, чем в случае сферической полости. Пропускание вне «аномального» диапазона также достаточно близко к рассчитанному численно (рис. 4, в, е).

Таким образом, обсуждения, на наш взгляд, заслуживают два момента: применимость модели эффективной среды в случае существенно неоднородных композитов и возможное наличие дисперсии в композитной среде, составленной из недиспергирующих компонентов.

2. Обсуждение результатов

Границы применимости метода эффективной среды. Из сравнения результатов, полученных для сферической полости (рис. 1), поперечного слоя (рис. 3,а) и конфигураций (рис. 3,б,в), видно, что адекватность получаемых результатов в наибольшей степени зависит от наличия в элементарной ячейке внутренних границ, перпендикулярных волновому вектору, назовем это поперечной неоднородностью. Если неоднородность имеет только продольный характер (границы неоднородности параллельны волновому вектору), аномалии эффективного показателя преломления либо полностью отсутствуют (конфигурация на рис. 3,б), либо наблюдаются в гораздо более узком диапазоне длин волн и оказывают меньшее влияние на вычисленное с его помощью пропускание (конфигурация на рис. 3,в). Отметим, что даже в случае, показанном на рис. 3,б, где нефизический резонанс показателя преломления практически отсутствует, наблюдается частотная дисперсия n_{eff} при отсутствующем поглощении.

На рис. 5,а приведен результат численного расчета структуры волнового фронта электромагнитной волны внутри элементарной ячейки, изображенной на рис. 3,б. Неоднородность в этом случае продольная. Видно, что при небольшом контрасте показателей преломления полостей и матрицы фронт волны близок к плоскому. Напряженность электрического поля при этом имеет только тангенциальную по отношению к границам полости компоненту, являющуюся в силу максвелловских граничных условий непрерывной. При увеличении контраста показателей преломления фронт волны внутри исследуемой структуры искривляется, и аномальная область показателя преломления растет. Для конфигурации, представленной на рис. 3,в, неоднородность также имеет продольный характер, но поле перпендикулярно границам полости и не является непрерывным на границах (рис. 5,б). В этом случае, однако, поперечное распределение полей внутри доменов структуры мало влияет на отражение и пропускание в силу малости их размеров по сравнению с длиной волны. Таким образом, для подобных структур, а также всевозможных цилиндров, ворсинок, проволок подход [12–14], изначально разработанный для однородных сред, дает достаточно адекватные результаты в широком диапазоне длин волн, по крайней мере, при указанных размерах и показателях преломления.

Дисперсия эффективного показателя преломления и соотношения Крамерса – Кронига. Наблюдаемая в результатах расчетов дисперсия показателя преломления, имеющая место при отсутствии нефизических резонансов последнего (например, рис. 3,б либо в случае указанных систем, в которых поле перпендикулярно границам нанообъекта) обусловлена спецификой рассеяния света нанообъектами, а также коллективными эффектами в квазикристалле, имеющими место при изменении соотношения между размерами нанообъектов и длиной волны. Например, при варьировании последней изменяется роль моментов различной мультипольности в спектре рассеяния нанообъектов, что приводит к зависимости амплитуды и фазы отраженного от наноструктуры поля от длины волны. Также к подобному эффекту приводит наличие электродинамического запаздывания во взаимодействии нанообъектов, расположенных в виде упорядоченной решетки. Более детально данная

частотная зависимость фазы отраженного от наноструктуры поля исследована в наших работах [15–19]. Таким образом, обнаруженная зависимость эффективного показателя преломления композитной пленки от длины волны излучения согласуется с полученными ранее аналитическими результатами. Следует отметить, что при этом система является непоглощающей. На первый взгляд, полученный результат противоречит соотношениям Крамерса – Кронига, являющимся следствием принципа причинности и требующим наличия мнимой части диэлектрической проницаемости в случае дисперсии реальной. Тем не менее указанное противоречие отсутствует.

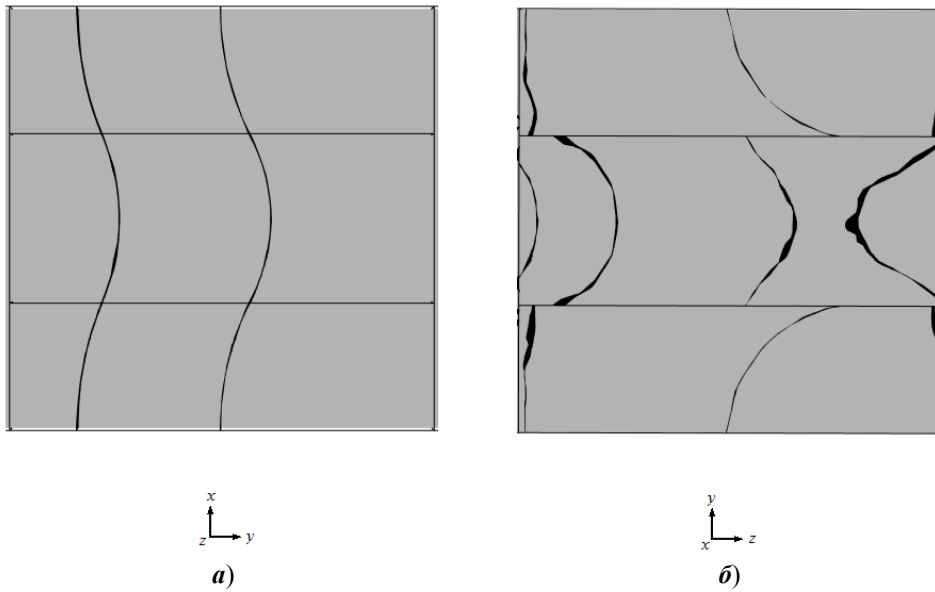


Рис. 5. Результаты численного расчета формы фронта волны (линии постоянной напряженности E). Вектор k падающей волны направлен вдоль оси z , вектор E направлен вдоль оси y

Соотношения Крамерса – Кронига могут быть введены для диэлектрической проницаемости двумя способами [22]:

1. В соответствии с принципом причинности. Диэлектрическая проницаемость описывает реакцию (отклик) системы на внешние воздействия. Функцией отклика называется величина, устанавливающая связь между воздействием на систему и его результатом:

$$(\text{результат воздействия}) = (\text{функция отклика}) \times (\text{воздействие}). \quad (3)$$

В рамках уравнений Максвелла соотношение (3) выражает известную связь вектора смещения и напряженности внешнего поля:

$$D(\omega, k) = \tilde{\epsilon}(\omega, k) \cdot E(\omega, k). \quad (4)$$

Эта связь носит причинный характер (причина всегда предшествует по времени следствию), причем роль следствия играет левая часть (3), (4), а причины – второй множитель правой части. Отсюда вытекает [22, 23], что функция отклика (в данном случае диэлектрическая проницаемость среды)

обязательно удовлетворяет соотношению типа соотношения Крамерса – Кронига.

2. При помощи так называемого условия «спектральности», связывая величину $1/\tilde{\epsilon}$ с корреляцией флуктуаций поля [24], вводя полную промежуточную систему функций и учитывая, что соответствующие им частоты вещественны. Именно таким способом выводятся обычно соотношения Челлена – Лемана для функции Грина фотона в вакууме в квантовой теории поля, служащие прямым аналогом соотношения Крамерса – Кронига [22, 24].

В рассматриваемом случае мы намеренно разделяем понятия диэлектрической проницаемости вещества (материальной) и эффективной диэлектрической проницаемости наноструктурной пленки. Первая, как и следует из принципа причинности, является «функцией отклика» среды на внешнее воздействие и может быть использована для расчета вектора смещения. Вторая (эффективная) является абстрактной величиной, рассчитанной на основе анализа спектров пропускания и отражения системы как целого, и для определения вектора смещения в каждой точке пленки неприменима. Более того, в соотношениях, связывающие амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн, эффективная диэлектрическая проницаемость входит в неявном виде, соответственно не является «функцией отклика» и с этой точки зрения.

Аналогичный результат может быть получен и более строго, на основе второго способа, использующего принцип «спектральности», например, методом интегральных уравнений [25], связывающим диэлектрическую проницаемость вещества с концентрацией и спектральными свойствами составляющих его атомов и молекул, «реагирующих» на внешнее электромагнитное поле.

Таким образом, обнаруженная частотная дисперсия эффективного показателя преломления наноструктурной пленки при отсутствии поглощения не противоречит соотношениям Крамерса – Кронига.

Заключение

В данной работе исследованы оптические свойства диэлектрических пленок с внедренным квазикристаллическим слоем нанообъектов (нанополостей различной формы). Показано, что подход NRW [12–14] непригоден в общем случае для описания оптических свойств композитных пленок, обладающих существенной неоднородностью даже при условии малости их оптической толщины по сравнению с длиной волны. Вместе с тем найдены конфигурации, для которых данный подход работает; для данных конфигураций показано наличие частотной дисперсии показателя преломления при полном отсутствии поглощения в пленке. При этом компоненты композитной среды дисперсией оптических констант не обладают. Показано, что полученная частотная зависимость эффективного показателя преломления не противоречит соотношениям Крамерса – Кронига. Обнаруженный эффект может быть использован при построении тонкопленочных композитных оптических покрытий различного назначения. Нами показано, что предложенное ранее наноструктурное просветляющее покрытие, представляющее собой нанопоры в поверхности среды, расположенные в виде упорядоченной решетки, обладает дисперсией эффективного показателя преломления, что может быть использовано для «подстройки» его оптических свойств и обеспечения про-

светления в более широком диапазоне длин волн, нежели это возможно при использовании гомогенных пленок.

Список литературы

1. **Gadomskii, O. N.** Optical near-field resonances in the system of interacting nanoparticles / O. N. Gadomskii, A.S. Shalin // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2006. – Vol. 101. – P. 425–433.
2. **Simovski, C.R.** On electromagnetic characterization and homogenization of nanostructured metamaterials / C. R. Simovski // *Journal of Optics*. – 2011. – Vol. 13. – P. 013001.
3. **Белов, П. А.** Исследование возможности извлечения материальных параметров из коэффициентов отражения и прохождения плоской волны для многослойных метаматериалов на основе металлических наносеток / П. А. Белов, Е. А. Янковская, И. В. Мельчакова, К. Р. Симовский // *Оптика и спектроскопия*. – 2010. – Т. 109, № 1. – С. 90–101.
4. **Борен, К.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
5. **Хлебцов, Н. Г.** Функционализированные наночастицы с плазмонным резонансом / Н. Г. Хлебцов // *Квантовая электроника*. – 2008. – Т. 38. – С. 504.
6. **Шалин, А. С.** Микроскопическая теория оптических свойств композитных сред с хаотическим распределением наночастиц / А. С. Шалин // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т. 40, № 11. – С. 1004–1011.
7. **Шалин, А. С.** Отрицательный эффективный показатель преломления металлических наночастиц в неупорядоченных нанокомпозитах / А. С. Шалин // *Физика металлов и металловедение*. – 2010. – Т. 110, № 2. – С. 125–137.
8. **Smith, D. R.** Homogenization of metamaterials by field averaging / D. R. Smith, J. B. Pendry // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2001. – Vol. 23. – P. 391–403.
9. **Lerat, J.** Determination of the effective parameters of a metamaterial by field summation method / J. Lerat, N. Mallejac, O. Acher // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 100. – P. 084908.
10. **Silveirinha, M. G.** Metamaterial homogenization approach with application to the characterization of microstructured composites with negative parameters / M. G. Silveirinha // *Physical Review B*. – 2007. – Vol. 75. – P. 115104.
11. **Andryieuski, A.** Bloch-mode analysis for retrieving effective parameters of metamaterials / A. Andryieuski, S. Ha, A. A. Sukhorukov, Yu. S. Kivshar, A. V. Lavrinenko. – *Physical Review B*. – 2012. – Vol. 86. – P. 035127.
12. **Smith, D. R.** Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials / D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, C. M. Soukoulis // *Physical Review E*. – 2005. – Vol. 71. – P. 036617.
13. **Weir, W. B.** Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies / W. B. Weir // *Proceedings of the IEEE*. – 1974. – Vol. 62. – P. 33.
14. **Nicholson, A. M.** Transactions on Instrumentation and Measurement / A. M. Nicholson, G. F. Ross // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1970. – IM-19. – P. 377.
15. **Шалин, А. С.** Широкополосное просветление среды, модифицированной внедренным слоем из нанополостей / А. С. Шалин // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2010. – Т. 12. – С. 705–711.
16. **Shalin, A. S.** Optical Properties of Nanostructured Layers on the Surface of an Underlying Medium / A. S. Shalin, S. G. Moiseev // *Optics and Spectroscopy*. – 2009. – Vol. 106. – P. 916–925.
17. **Shalin, A.S.** Optical antireflection of a medium by nanostructural layers / A. S. Shalin // *Progress in Electromagnetic Research B*. – 2011. – P. 45–66.

18. **Shalin, A. S.** Approximate Model for Universal Broadband Antireflection Nano-Structure / A. S. Shalin, S. A. Nikitov // *Progress in Electromagnetic Research B.* – 2013. – Vol. 47. – P. 127–144.
19. **Шалин, А. С.** Регулирование отражательной способности границы раздела двух сред монослоем наночастиц / А. С. Шалин, С. Г. Моисеев // *Квантовая электроника.* – 2009. – Т. 39, № 12. – С. 1175–1181.
20. **Starr, A. F.** Fabrication and characterization of negative-refractive-index composite metamaterial / A. F. Starr, P. M. Rye, D. R. Smith, S. Nemat-Nasser // *Physical Review B.* – 2004. – Vol. 70. – P. 113102.
21. **Xi, J.-Q.** Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection / J.-Q. Xi, M. F. Schubert, J. K. Kim, E. F. Schubert // *Nature Photonics Letters.* – 2007. – Vol. 1. – P. 176–179.
22. **Киржниц, Д. А.** Всегда ли справедливы соотношения Крамерса – Кронига для диэлектрической проницаемости вещества? / Д. А. Киржниц // *Успехи физических наук.* – 1976. – Т. 119. – № 2. – С. 357.
23. **Пайнс, Д.** Теория квантовых жидкостей / Д. Пайнс, Ф. Нозьер. – М. : Мир, 1967. – 230 с.
24. **Силин, В. П.** Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред / В. П. Силин, А. А. Рухадзе. – М. : Госатомиздат, 1961. – 345 с.
25. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 720 с.

References

1. Gadomskii O. N., Shalin A. S. *The Physics of Metals and Metallography.* 2006, vol. 101, pp. 425–433.
2. Simovski C. R. *Journal of Optics.* 2011, vol. 13, p. 013001.
3. Belov P. A., Yankovskaya E. A., Mel'chakova I. V., Simovskiy K. R. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy]. 2010, vol. 109, no. 1, pp. 90–101.
4. Boren K., Khafmen D. *Pogloshchenie i rasseyanie sveta malymi chastitsami* [Absorption and scattering of light by small particles]. Moscow: Mir, 1986, 664 p.
5. Khlebtsov N. G. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. 2008, vol. 38, p. 504.
6. Shalin A. S. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. 2010, vol. 40, no. 11, pp. 1004–1011.
7. Shalin A. S. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2010, vol. 110, no. 2, pp. 125–137.
8. Smith D. R., Pendry J. B. *Journal of the Optical Society of America B.* 2001, vol. 23, pp. 391–403.
9. Lerat J., Mallejac N., Acher O. *Journal of Applied Physics.* 2006, vol. 100, p. 084908.
10. Silveirinha M. G. *Physical Review B.* 2007, vol. 75, p. 115104.
11. Andryieuski A., Ha S., Sukhorukov A. A., Kivshar Yu. S., Lavrinenko A. V. *Physical Review B.* 2012, vol. 86, p. 035127.
12. Smith D. R., Vier D. C., Koschny Th., Soukoulis C. M. *Physical Review E.* 2005, vol. 71, p. 036617.
13. Weir W. B. *Proceedings of the IEEE.* 1974, vol. 62, p. 33.
14. Nicholson A. M., Ross G. F. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 1970, IM-19, p. 377.
15. Shalin A. S. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of experimental and theoretical physics]. 2010, vol. 12, pp. 705–711.
16. Shalin A. S., Moiseev S. G. *Optics and Spectroscopy.* 2009, vol. 106, pp. 916–925.
17. Shalin A. S. *Progress in Electromagnetic Research B.* 2011, pp. 45–66.
18. Shalin A. S., Nikitov S. A. *Progress in Electromagnetic Research B.* 2013, vol. 47, pp. 127–144.

19. Shalin A. S., Moiseev S. G. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. 2009, vol. 39, no. 12, pp. 1175–1181.
20. Starr A. F., Rye P. M., Smith D. R., Nemat-Nasser S. *Physical Review B*. 2004, vol. 70, pp. 113102.
21. Xi J.-Q., Schubert M. F., Kim J. K., Schubert E. F. *Nature Photonics Letters*. 2007, vol. 1, pp. 176–179.
22. Kirzhnits D. A. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Progress of physical sciences]. 1976, vol. 119, no. 2, pp. 357.
23. Payns D., Noz'ér F. *Teoriya kvantovykh zhidkostey* [Theory of quantum liquids]. Moscow: Mir, 1967, 230 p.
24. Silin V. P., Rukhadze A. A. *Elektromagnitnye svoystva plazmy i plazmopodobnykh sred* [Electromagnetic properties of plasma and plasma-like media]. Moscow: Gosatomizdat, 1961, 345 p.
25. Born M., Vol'f E. *Osnovy optiki* [Basic optics]. Moscow: Nauka, 1973, 720 p.

Кадошкин Алексей Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра радиофизики
и электроники, Ульяновский
государственный университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Льва
Толстого, 42)

E-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru

Kadochkin Aleksey Sergeevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, sub-department of radio physics
and electronics, Ulyanovsk State University
(42 Lva Tolstogo street, Ulyanovsk, Russia)

Шалин Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники РАН
(Россия, г. Ульяновск,
ул. Гончарова, 48/2)

E-mail: shalin_a@rambler.ru

Shalin Aleksandr Sergeevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, senior staff scientist, Ulyanovsk
branch of the Institute of radio engineering
and electronics of the Russian Academy
of Sciences (48/2 Goncharova street,
Ulyanovsk, Russia)

Маслов Николай Александрович

аспирант, Ульяновский государственный
университет (Россия, г. Ульяновск,
ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: n.a.maslov@yandex.ru

Maslov Nikolay Aleksandrovich

Postgraduate student, Ulyanovsk State
University (42 Lva Tolstogo street,
Ulyanovsk, Russia)

Низаметдинов Азат Маратович

младший научный сотрудник,
Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники РАН,
(Россия, г. Ульяновск,
ул. Гончарова, 48/2)

E-mail: shalin_a@rambler.ru

Nizametdinov Azat Maratovich

Junior researcher, Ulyanovsk branch
of the Institute of radio engineering
and electronics of the Russian Academy
of Sciences (48/2 Goncharova street,
Ulyanovsk, Russia)

УДК 535.32

Кадочкин, А. С.

Непоглощающий метаматериал с дисперсией эффективного показателя преломления / А. С. Кадочкин, А. С. Шалин, Н. А. Маслов, А. М. Низаметдинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 119–132.