

УДК 535.016

ББК 22.343

**Разработка информационного сопровождения изучения темы,  
посвященной изучению приближения эффективной среды в курсе  
нанооптики**

**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

**Аннотация.** Представлены результаты разработки информационного сопровождения темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике. Основными элементами информационного сопровождения являются структурная схема организации темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике, презентация с элементами теории, страница темы в составе сайта по курсу нанооптики, интерактивная презентация с тестовым заданием. Разработанные элементы позволяют обеспечить информационное сопровождение изучения темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике.

**Ключевые слова:** нанооптика, эффективная среда, приближение эффективной среды, теория эффективной среды, эффективные параметры среды, композит, нанокompозит, страница сайта, интерактивная презентация.

Теоретическое описание оптических свойств металл-полимерных плёночных наноструктур, содержащих хаотически распределённые сферические металлические наночастицы, представлено в работе [1]. Наиболее распространённым теоретическим методом описания оптических свойств металл-полимерных плёночных наноструктур является приближение эффективной среды. В приближении эффективной среды для описания

анизотропных наноструктур вводятся такие эффективные параметры, как эффективная диэлектрическая проницаемость и эффективная магнитная проницаемость, эффективный показатель преломления и эффективный импеданс среды. Для записи полевых уравнений в случае анизотропных наноструктур достаточно использовать эффективные материальные параметры анизотропных наноструктур такие, как эффективная диэлектрическая проницаемость и эффективная магнитная проницаемость. Для описания оптических свойств анизотропных наноструктур удобнее использовать эффективные оптические параметры такие, как эффективный показатель преломления и эффективный импеданс среды.

Повышенный практический интерес представляет случай усиленного оптического пропускания композитных наноструктурных плёнок [15] и нанокompозитных плёнок с наночастицами серебра на различных твердотельных подложках [2-5]. Случай усиленного оптического пропускания композитных наноструктурных плёнок используется при проектировании высокоэффективных просветляющих оптических покрытий из нанокompозитных материалов, обладающих квазиулевыми значениями эффективного показателя преломления и эффективного показателя поглощения в широком диапазоне оптических длин волн [6].

Особый класс оптических наноматериалов представляют металл-полимерные наноматериалы, обладающие близкими к нулю эффективными показателями преломления и поглощения [7, 9].

Приближение эффективной среды используется также для описания сверхпрозрачных композитных наноматериалов, обладающих квазиулевыми значениями показателя преломления, которые используются для повышения просветления поверхностей солнечных панелей в солнечной энергетике [10]. Действие высокоэффективных просветляющих покрытий для солнечных панелей основано на гигантском фотовольтаическом эффекте [13].

Повышение эффективности просветляющих покрытий солнечных панелей может также обеспечить экстраординарное оптическое пропускание

композитных плёнок с наноструктурами [5].

Существенную возможность для повышения эффективности солнечных панелей предоставляют нанокластеры и атомные кластеры, состоящие из металлических наночастиц. Присутствие нанокластеров в просветляющих покрытиях солнечных панелей значительно увеличивает эффективность солнечных панелей за счёт гигантского усиления света в кластерах [16]. Радиационная теория металлического кластера позволяет определить эффективные параметры системы металлических нанокластеров, оказывающих существенное влияние на интенсивность оптического излучения [14]. В теории радиационного взаимодействия металлических нанокластеров в качестве основных эффективных параметров вводятся такие параметры, как эффективный дипольный момент квантового перехода и эффективная частота квантового перехода носителей заряда в нанокластере.

Описание анизотропных сред на основе метода нелокальных полевых интегральных уравнений в оптике предлагалось в работе [11]. Метод нелокальных полевых интегральных уравнений может быть адаптирован на случай анизотропных нанокомпозитных сред с использованием приближения эффективной среды для материальных параметров.

Приближение эффективной среды с использованием выражения эффективного тензора диэлектрической проницаемости в случае гиперболической дисперсии успешно применяется для описания гиперлинзы из графена для терагерцового диапазона [12].

Теория эффективной среды, основанная на борновском приближении, применяется для топологического полуметалла Дирака, представляющего собой новое экзотическое квантовое состояние материи [17]. Топологические полуметаллы Дирака можно рассматривать как трёхмерные аналоги графена, в которых узлы Дирака защищены кристаллической симметрией.

Приближение эффективной среды с учётом функции Грина для установления формализма аппроксимации эффективной среды на основе уравнения множественного рассеяния и уравнения Липпмана-Швингера для

электромагнитных волн применяется для изучения эффективных констант распространения в плотной случайной среде [20]. Чтобы получить выражение для эффективных констант распространения, в импульсном представлении вычисляются матричные элементы конфигурационного среднего оператора диадического перехода.

При исследовании распространения фононов в гибридных нитридах бора и графеновых листах, больших и неупорядоченных структурах графена получаются результаты, которые выходят за рамки любого приближения эффективной среды [18].

Теория перколяции и приближение эффективной среды используется для моделирования зависимости насыщения газа и растворенного вещества в пористых средах в процессе прогнозирования переноса загрязняющих веществ в частично насыщенных пористых средах [19].

Рассмотрим результаты разработки информационного сопровождения изучения темы "Приближение эффективной среды" в составе курса по нанооптике. Основными элементами информационного сопровождения являются структурная схема организации темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике, презентация с элементами теории, страница темы в составе сайта по курсу нанооптики, интерактивная презентация с тестовым заданием.

Тематическое направление развития темы, связанной с приближением эффективной среды, в курсе по нанооптике показано на рис. 1. Сплошные среды и оптические материалы описываются уравнениями Максвелла с соответствующими граничными условиями. В случае использования приближения дискретно-непрерывной среды становится целесообразным применять метод интегральных уравнений в оптике. Для описания оптических свойств наноматериалов и метаматериалов требуется использовать модифицированные микроскопические уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями. Для описания оптических свойств нанокластеров и атомных кластеров требуется дополнить систему уравнений

квантовыми уравнениями для атомных переменных.

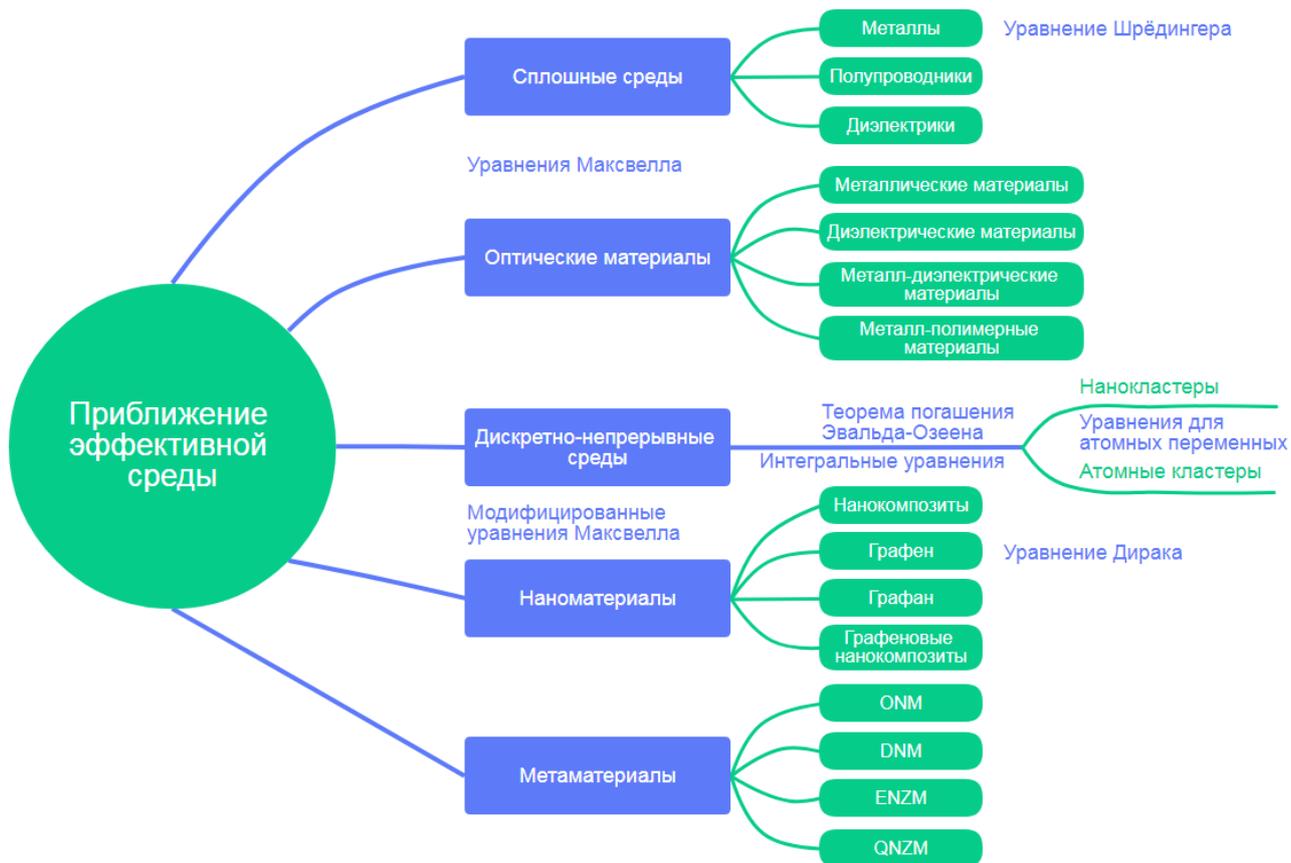


Рис. 1. Структурная организация развития темы, связанной с приближением эффективной среды, в курсе по нанооптике.

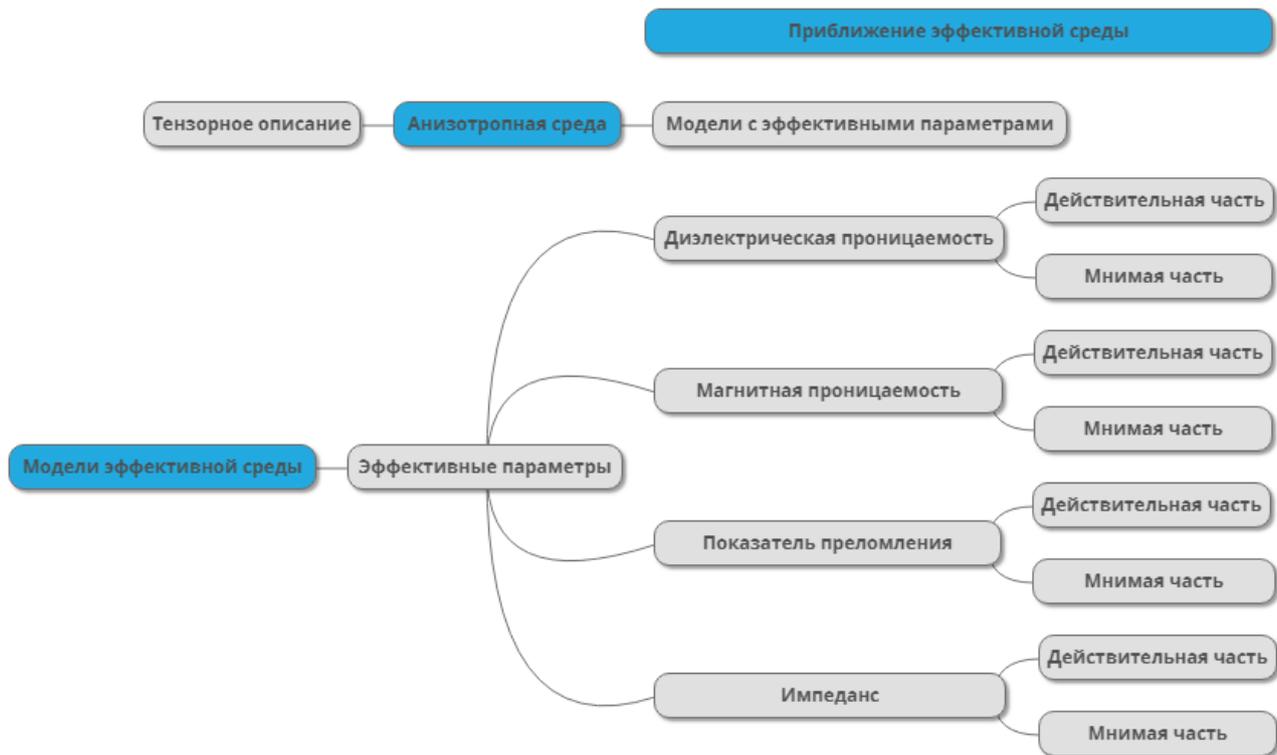


Рис. 2. Система эффективных параметров в модели эффективной среды для

описания анизотропной среды, используемая в курсе по нанооптике.

На рис. 2 представлена система эффективных параметров в модели эффективной среды для описания анизотропной среды, используемая при изучении темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике. В классической электродинамике сплошных сред используется тензорное описание анизотропных сред. Использование тензорного формализма приводит к громоздким вычислениям с использованием тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей анизотропных веществ. Использование альтернативного подхода, связанного с введением эффективных параметров среды позволяет резко упростить вычисления и добиться адекватного согласия с экспериментальными данными оптических и электрических измерений.

В электродинамических задачах чаще используется пара параметров: диэлектрическая проницаемость и магнитная проницаемость. В оптических задачах чаще используется пара параметров: показатель преломления и импеданс. В оптическом приближении из четырёх параметров остаются только показатель преломления и диэлектрическая проницаемость. Все эффективные параметры являются комплексными числами и функциями частоты излучения. Можно использовать приближение эффективной среды для описания границы раздела двух метаматериалов. Модели эффективной среды часто используются в современных автоматизированных системах расчёта физических систем.

На рис. 3 изображена страница сайта в поддержку изучения дисциплины по нанооптике, посвящённая изучению приближения эффективной среды для различных материалов. Этапы разработки электронного образовательного ресурса по курсу для педагогических специальностей физико-математического профиля в университете были рассмотрены в [8].

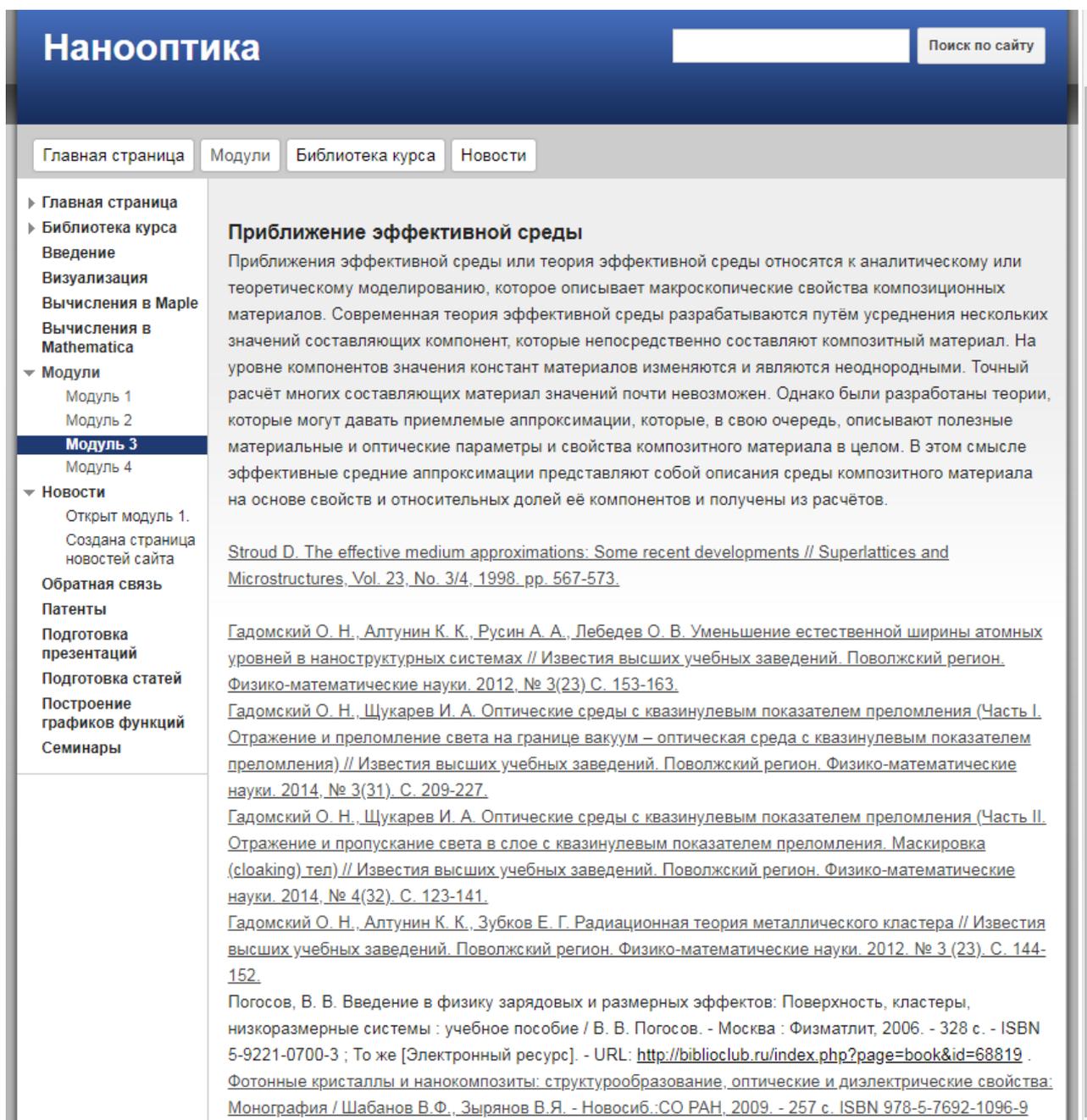


Рис. 3. Страница сайта в поддержку изучения дисциплины по нанооптике, посвящённая изучению приближения эффективной среды для различных материалов.

На рис. 4 представлены слайды из презентации, посвящённой изучению приближения эффективной среды. Презентация с элементами теории по приближению эффективной среды подготовлена с использованием средств издательской системы LaTeX и размещена в составе электронного образовательного ресурса в виде сайта по нанооптике.

**Визуализация**

**Оптическое приближение для границы раздела двух сред**

Выбираем в качестве первичных параметров оптической среды в приближении эффективной среды диэлектрические проницаемости двух сред, находящихся на границе раздела.

$$\epsilon_{1z} = \epsilon_{1y} = \frac{f_1 \epsilon_1^{NP} p_1 + (1 - f_1) \epsilon_1^m}{f_1 p_1 + (1 - f_1)} \quad (1)$$

$$\epsilon_{1x} = f_1 \epsilon_1^{NP} + (1 - f_1) \epsilon_1^m, \quad (2)$$

где  $p_1 = \frac{2\epsilon_1^m}{\epsilon_1^{NP} + \epsilon_1^m}$ .

$$\epsilon_{2z} = \epsilon_{2y} = \frac{f_2 \epsilon_2^{NP} p_2 + (1 - f_2) \epsilon_2^m}{f_2 p_2 + (1 - f_2)} \quad (3)$$

$$\epsilon_{2x} = f_2 \epsilon_2^{NP} + (1 - f_2) \epsilon_2^m, \quad (4)$$

где  $p_2 = \frac{2\epsilon_2^m}{\epsilon_2^{NP} + \epsilon_2^m}$ .

К. К. Агулов, Н. Д. Юсупов | Приближение эффективной среды

**Визуализация**

**Случай границы раздела двух метаматериалов**

Выбираем в качестве первичных параметров метаматериалов в приближении эффективной среды диэлектрическую проницаемость и магнитную проницаемость.

$$\epsilon_{1z} = \epsilon_{1y} = \frac{f_1 \epsilon_1^{NP} p_1 + (1 - f_1) \epsilon_1^m}{f_1 p_1 + (1 - f_1)} \quad (5)$$

$$\epsilon_{1x} = f_1 \epsilon_1^{NP} + (1 - f_1) \epsilon_1^m, \quad (6)$$

$$\mu_{1z} = \mu_{1y} = \frac{f_1 \mu_1^{NP} q_1 + (1 - f_1) \mu_1^m}{f_1 q_1 + (1 - f_1)} \quad (7)$$

$$\mu_{1x} = f_1 \mu_1^{NP} + (1 - f_1) \mu_1^m, \quad (8)$$

$$\epsilon_{2z} = \epsilon_{2y} = \frac{f_2 \epsilon_2^{NP} p_2 + (1 - f_2) \epsilon_2^m}{f_2 p_2 + (1 - f_2)} \quad (9)$$

$$\epsilon_{2x} = f_2 \epsilon_2^{NP} + (1 - f_2) \epsilon_2^m, \quad (10)$$

$$\mu_{2z} = \mu_{2y} = \frac{f_2 \mu_2^{NP} q_2 + (1 - f_2) \mu_2^m}{f_2 q_2 + (1 - f_2)} \quad (11)$$

$$\mu_{2x} = f_2 \mu_2^{NP} + (1 - f_2) \mu_2^m, \quad (12)$$

где  $p_1 = \frac{2\epsilon_1^m}{\epsilon_1^{NP} + \epsilon_1^m}$ ,  $q_1 = \frac{2\mu_1^m}{\mu_1^{NP} + \mu_1^m}$ ,  $p_2 = \frac{2\epsilon_2^m}{\epsilon_2^{NP} + \epsilon_2^m}$ ,  $q_2 = \frac{2\mu_2^m}{\mu_2^{NP} + \mu_2^m}$ .

К. К. Агулов, Н. Д. Юсупов | Приближение эффективной среды

**Визуализация**

**Оптическое приближение для границы раздела двух сред**

Выбираем в качестве первичных параметров оптической среды в приближении эффективной среды показатели преломления двух сред, находящихся на границе раздела.

$$n_{1z} = n_{1y} = \frac{f_1 n_1^{NP} p_1 + (1 - f_1) n_1^m}{f_1 p_1 + (1 - f_1)} \quad (13)$$

$$n_{1x} = f_1 n_1^{NP} + (1 - f_1) n_1^m, \quad (14)$$

где  $p_1 = \frac{2n_1^m}{n_1^{NP} + n_1^m}$ .

$$n_{2z} = n_{2y} = \frac{f_2 n_2^{NP} p_2 + (1 - f_2) n_2^m}{f_2 p_2 + (1 - f_2)} \quad (15)$$

$$n_{2x} = f_2 n_2^{NP} + (1 - f_2) n_2^m, \quad (16)$$

где  $p_2 = \frac{2n_2^m}{n_2^{NP} + n_2^m}$ .

К. К. Агулов, Н. Д. Юсупов | Приближение эффективной среды

**Визуализация**

**Случай границы раздела двух метаматериалов**

Выбираем в качестве первичных параметров метаматериалов в приближении эффективной среды показатель преломления и импеданс.

$$n_{1z} = n_{1y} = \frac{f_1 n_1^{NP} p_1 + (1 - f_1) n_1^m}{f_1 p_1 + (1 - f_1)} \quad (17)$$

$$n_{1x} = f_1 n_1^{NP} + (1 - f_1) n_1^m, \quad (18)$$

$$\zeta_{1z} = \zeta_{1y} = \frac{f_1 \zeta_1^{NP} q_1 + (1 - f_1) \zeta_1^m}{f_1 q_1 + (1 - f_1)} \quad (19)$$

$$\zeta_{1x} = f_1 \zeta_1^{NP} + (1 - f_1) \zeta_1^m, \quad (20)$$

$$n_{2z} = n_{2y} = \frac{f_2 n_2^{NP} p_2 + (1 - f_2) n_2^m}{f_2 p_2 + (1 - f_2)} \quad (21)$$

$$n_{2x} = f_2 n_2^{NP} + (1 - f_2) n_2^m, \quad (22)$$

$$\zeta_{2z} = \zeta_{2y} = \frac{f_2 \zeta_2^{NP} q_2 + (1 - f_2) \zeta_2^m}{f_2 q_2 + (1 - f_2)} \quad (23)$$

$$\zeta_{2x} = f_2 \zeta_2^{NP} + (1 - f_2) \zeta_2^m, \quad (24)$$

где  $p_1 = \frac{2n_1^m}{n_1^{NP} + n_1^m}$ ,  $q_1 = \frac{2\zeta_1^m}{\zeta_1^{NP} + \zeta_1^m}$ ,  $p_2 = \frac{2n_2^m}{n_2^{NP} + n_2^m}$ ,  $q_2 = \frac{2\zeta_2^m}{\zeta_2^{NP} + \zeta_2^m}$ .

К. К. Агулов, Н. Д. Юсупов | Приближение эффективной среды

Рис. 4. Слайды презентации, посвящённой изучению приближения эффективной среды в составе электронного курса по нанооптике.

На рис. 5 представлены некоторые слайды презентации для интерактивной доски Panasonic, посвящённой контролю теоретических знаний, связанных с приближением эффективной среды в нанокompозитных средах. Презентация для интерактивной доски Panasonic содержит тестовые задания по теории эффективной среды с выбором одного правильного ответа и с множественными вариантами правильных ответов. Система тестовых вопросов по теме "Приближение эффективной среды" базируется на знаниях из электродинамики наноматериалов и оптики наноструктур. Созданная интерактивная презентация позволяет проводить опрос по теории эффективной среды на занятиях по нанооптике.

Эффективная диэлектрическая проницаемость металл-полимерного нанокompозита, содержащего металлические наночастицы, определяется

- 1) свойствами диэлектрической подложки
- 2) временем релаксации окружающей среды
- 3) весовым содержанием наночастиц в нанокompозите
- 4) площадью поверхности среды
- 5) объёмом нанокompозита

Эффективная магнитная проницаемость металл-полимерного нанокompозита, содержащего металлические наночастицы, определяется

- 1) свойствами магнитной подложки
- 2) остаточной намагниченностью окружающей среды
- 3) весовым содержанием наночастиц в нанокompозите
- 4) площадью поверхности среды
- 5) объёмом нанокompозита

Какие из перечисленных величин являются материальными параметрами нанокompозита?

- 1) диэлектрическая проницаемость
- 2) магнитная проницаемость
- 3) интенсивность оптической волны
- 4) напряжённость локального поля



Какие из перечисленных величин являются оптическими параметрами нанокompозита?

- 1) показатель преломления
- 2) импеданс
- 3) длина волны излучения
- 4) интенсивность оптической волны



Рис. 5. Слайды интерактивной презентации, посвящённой изучению приближения эффективной среды в составе курса по нанооптике.

Разработанные элементы позволяют обеспечить информационное сопровождение изучения темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике. Изучение темы "Приближение эффективной среды" базируется на знаниях из теоретической электродинамики и волновой оптики. Приближение эффективной среды широко используется в современных прикладных пакетах для расчёта оптических свойств объёмных материалов и наноматериалов в процессе проектирования новых оптоэлектронных устройств. Приближение эффективной среды может быть применено к широкому классу искусственных веществ и наноматериалов. Информационное сопровождение изучения темы "Приближение эффективной среды" в курсе по нанооптике необходимо для оперативного доступа к актуальной информации и организации систематизированного хранения и использования учебных материалов.

## Список литературы

1. Алтунин К. К. Оптические свойства металл-полимерных плёночных наноструктур с сферическими наночастицами // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2017. Т. 8. № 4. С. 8-12.
2. Алтунин К. К. Усиленное оптическое пропускание нанокompозитных плёнок с наночастицами серебра на различных подложках. Часть 1. Вопросы теории и модель // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2015. Т. 6. № 2. С. 4-14.
3. Алтунин К. К. Усиленное оптическое пропускание нанокompозитных плёнок с наночастицами серебра на различных подложках. Часть 2. Численное моделирование // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2015. Т. 6. № 3. С. 3-13.
4. Алтунин К. К. Усиленное оптическое пропускание в композитных слоях из металл-полимерных наноматериалов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2013. Т. 13. № 1. С. 7-10.
5. Алтунин К. К. Экстраординарное оптическое пропускание композитных плёнок с наноструктурами // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2011. Т. 11. № 2. С. 11-14.
6. Алтунин К. К. Высокоэффективные просветляющие оптические покрытия из нанокompозитных материалов с квазиулевыми показателями преломления и поглощения // Радиоэлектронная техника. 2013. № 1. С. 168-177.
7. Алтунин К. К. Оптические наноматериалы с квазиулевыми показателями преломления и поглощения // Радиоэлектронная техника. 2012. № 1 (5). С. 10-14.
8. Алтунин К. К. Разработка электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментов Google Site и MOODLE // Поволжский педагогический поиск. 2017. № 3 (21). С. 116-124.
9. Алтунин К. К. Особенности оптического пропускания в наноразмерных

металл-полимерных структурах с показателями преломления и поглощения, близкими к нулю // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2014. Т. 5. № 3. С. 3-8.

10. Алтунин К. К. Сверхпрозрачные композитные наноматериалы с квази нулевыми значениями показателя преломления для солнечной энергетики // Радиоэлектронная техника. 2013. № 1. С. 178-189.
11. Алтунин К. К. Метод нелокальных уравнений в оптике квантовых вычислений // В сборнике: Молодые ученые - 2003 Материалы Международной научно-технической школы-конференции "Молодые ученые - науке, технологиям и профессиональному образованию". Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). 2003. С. 14-16.
12. Andryieuski A., Lavrinenko A. V., Chigrin D. N. Graphene hyperlens for terahertz radiation // Physical Review B. — 2012. — sep. — Vol. 86, No. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.121108>.
13. Gadomsky O. N., Altunin K. K., Ushakov N. M., Kulbackii D. M. Giant photovoltaic effect // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. Т. 93. № 6. С. 353-358. [В англоязычном издании: Gadomsky O. N., Altunin K. K., Ushakov N. M., Kulbackii D. M. Giant photovoltaic effect // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2011. Vol. 93. № 6. pp. 320-325.]
14. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Зубков Е. Г. Радиационная теория металлического кластера // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 3 (23). С. 144-152.
15. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Русин А. А., Зубков Е. Г. Усиленное оптическое пропускание композитных наноструктурных толстых плёнок с квази нулевым показателем преломления (II. Теория) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2013. № 1 (25). С. 122-134.

16. Гадомский О. Н., Гадомская И. В., Алтунин К. К. Гигантское усиление света в атомных кластерах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 136. № 1. С. 31-36. [Gadomsky O. N., Gadomskaya I. V., Altunin K. K. Giant light enhancement in atomic clusters // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2009. Т. 109. № 1. С. 23-28.]
17. Chen R., Xu D.-H., Zhou B. Topological Anderson insulator phase in a Dirac-semimetal thin film // Physical Review B. — 2017. — Jun. — Vol. 95, No. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.95.245305>.
18. Effects of domains in phonon conduction through hybrid boron nitride and graphene sheets / H. Sevincli [et al.] // Physical Review B. — 2011. — Nov. — Vol. 84, No. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.84.205444>.
19. Gas and solute diffusion in partially saturated porous media: Percolation theory and Effective Medium Approximation compared with lattice Boltzmann simulations / B. Ghanbarian [et al.] // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2015. — Jan. — Vol. 120, No. 1. — P. 182–190. — URL: <https://doi.org/10.1002/2014jb011645>.
20. Zhu P. Y., Fung A. K., Wong K. W. Effective propagation constants in dense random media under effective medium approximation // Radio Science. — 1987. — Mar. — Vol. 22, No. 2. — P. 234–250. — URL: <https://doi.org/10.1029/rs022i002p00234>.