

ГЕТЕРОГЕННАЯ СРЕДА С ЕДИНИЧНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2004 С.В. Сухов

Ульяновское отделение Института радиотехники и электроники РАН

Рассмотрены свойства гетерогенной среды, состоящей из взвеси металлических наночастиц в активной лазерной матрице. Показано, что при определенном соотношении параметров составляющих компонентов, показатель преломления гетерогенной среды может стать равным единице. То есть, может реализоваться ситуация, когда гетерогенная среда будет невидима для внешнего электромагнитного излучения.

Постановка задачи

Исследование электромагнитных свойств искусственных гетерогенных сред (метаматериалов) в настоящее время вызывает огромный интерес. Часть исследований касается изучения свойств искусственных сред, содержащих в своем составе наночастицы. Среди этих объектов можно выделить широко известные фотонные кристаллы, в которых фотоны ведут себя подобно электронам в обычных кристаллах [1]. Интенсивно исследуются “леворукие” материалы [2, 3], особенностью которых является отрицательный показатель преломления и следующие отсюда необычные электромагнитные свойства. Большой практический интерес представляют материалы с нулевым показателем преломления [4]. Теоретически исследуется возможность использования метаматериалов для получения высокого показателя преломления [5, 6].

В настоящей работе исследуется возможность получения гетерогенной среды с единичным показателем преломления. В качестве одной из возможных конструкций подобного метаматериала предлагается использовать активную матрицу, содержащую металлические шары нанометрового размера. Результатом получения материала с единичным показателем преломления является то, что электромагнитная волна не будет “замечать” эту среду, то есть эта среда будет невидима для электромагнитного поля. Материал с такими необычными оптическими свойствами может найти широкое практическое применение.

Созданные в настоящее время метаматериалы [3, 4] представляют собой упорядоченные структуры, состоящие из микроскопических объектов. Так как размеры микроскопических объектов обычно составляют несколько миллиметров, то полученные структуры проявляют свои необычные электромагнитные свойства в СВЧ области. Дальнейший прогресс в построении метаматериалов связывают с уменьшением размеров составляющих элементов до нанометровых размеров и переносе “области действия” метаматериалов в оптическую область. В данной работе при проведении расчетов будет иметься в виду именно оптическая область.

Технологии сборки наночастиц в трехмерные структуры в настоящее время интенсивно развиваются. В июне 2003 года компания IBM объявила о создании упорядоченной трехмерной структуры, содержащей частицы нанометровых размеров. Для создания наночастиц одинакового размера была разработана специальная технология. Полученные частицы располагались в упорядоченной трехмерной матрице с помощью специальных химических реакций. Таким образом, построение рассматриваемого в настоящей статье метаматериала является практически осуществимым уже в настоящее время.

Основные уравнения

Как уже было упомянуто выше, в данной работе предполагается, что гетерогенная среда представляет собой некоторую матрицу с внедренными в нее наночастицами. Счита-

ем, что наночастицы представляют собой наносферы, регулярно распределенные в матрице. Исходным соотношением для дальнейшего анализа будем считать формулу Максвелла-Гарнета [6]. В случае если мы имеем наночастицы только одного сорта, эта формула запишется в следующем виде:

$$\frac{\varepsilon_{mix} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{mix} + 2\varepsilon_m} = \eta \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_m}{\varepsilon_b + 2\varepsilon_m}, \quad (1)$$

где ε_m и ε_b -- диэлектрические проницаемости матрицы и наносфер, соответственно, ε_{mix} -- диэлектрическая проницаемость результирующей гетерогенной среды, h/h -- относительный объем, занимаемый наночастицами. Нас интересует такое соотношение параметров ε_m , ε_b и h/h , при котором выполняется равенство $\varepsilon_{mix} = 1$. Учитывая, что $0 < \eta < 1$, из (1) можно получить следующее условие для ε_b :

$$\varepsilon_b \in (-2\varepsilon_m, 1).$$

Отсюда следует, что если в качестве материала для матрицы принять некоторую диэлектрическую среду, то в качестве материала для наносфер можно выбрать металлы, обладающие отрицательной диэлектрической проницаемостью в интересующей нас оптической области. Наряду с отрицательной действительной частью, металлы в оптической области имеют и отличную от нуля мнимую часть диэлектрической проницаемости, что может привести к возникновению поглощения результирующей гетерогенной среды. Материал для наносфер необходимо выбрать таким образом, чтобы поглощение гетерогенной среды было минимальным. Наиболее подходящим материалом в этом отношении, по-видимому, является серебро. Серебро имеет не слишком большую по модулю действительную часть диэлектрической проницаемости в оптической области, так что для него возможно подобрать диэлектрическую матрицу с необходимыми параметрами. Кроме того, мнимая часть диэлектрической проницаемости серебра достаточно мала.

Предполагая, что поглощение гетерогенной среды определяется исключительно по-

глощением в наносферах, из (1) можно получить следующие выражения для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости гетерогенной среды

$$\varepsilon_{mix} = \varepsilon'_{mix} + i\varepsilon''_{mix} :$$

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{mix} &= \frac{\varepsilon_m}{\Delta} \{ [\varepsilon'_b(1+2\eta) + 2\varepsilon_m(1-\eta)] \times \\ &\times [\varepsilon'_b(1-\eta) + \varepsilon_m(2+\eta)] + \varepsilon_b''^2(1+2\eta)(1-\eta) \}, \\ \varepsilon''_{mix} &= \frac{9\varepsilon_m^2\varepsilon_b''\eta}{\Delta}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\Delta = [\varepsilon'_b(1-\eta) + \varepsilon_m(2+\eta)]^2 + [\varepsilon_b''(1-\eta)]^2.$$

Принимая во внимание, что показатель преломления гетерогенной среды должен быть равен единице, ε'_{mix} , ε''_{mix} можно связать с показателем поглощения κ :

$$\varepsilon'_{mix} = 1 - \kappa^2, \quad \varepsilon''_{mix} = 2\kappa. \quad (3)$$

На основе уравнений (2) и (3) для известных значений ε_b можно подобрать оптимальное соотношение параметров ε_m и η . Предположим, что длина волны излучения, попадающего в гетерогенную среду, равна $\lambda = 550$ нм. При этом $\varepsilon_b(Au) = -11 + i0.365$. Близкая к оптимальной концентрация наносфер равна $\eta = 0.2$. При этом $\varepsilon_m = 10.44$, а коэффициент поглощения результирующей гетерогенной среды равен $\kappa \approx 0.18$. Получившийся коэффициент поглощения является довольно большим. Интенсивность волны в такой среде уменьшается в e раз на толщине порядка длины волны. Таким образом, для того чтобы гетерогенная среда поглотила лишь небольшую часть внешней волны, ее толщина должна составлять величину сравнимую с длиной волны.

Дополнительным недостатком использования в качестве матрицы прозрачной диэлектрической среды является то, что при получающемся значении κ амплитудный коэффициент отражения от поверхности гетерогенной среды равен 9%, то есть является достаточно большим. Значит, среду уже нельзя считать невидимой.

Одним из вариантов решения задачи по

уменьшению поглощения гетерогенной среды является использование в качестве матрицы активной лазерной среды.

Гетерогенная среда на основе активной матрицы

Предположим, что матрица, содержащая наночастицы, является активной средой. Будем считать, что коэффициент усиления обнаруживает сравнительно узкий резонанс на интересующей нас длине волны. Это приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость матрицы имеет ненулевую отрицательную мнимую часть:

$$\varepsilon_m = \varepsilon'_m + i\varepsilon''_m, \quad \varepsilon''_m < 0.$$

К сожалению, формула (1) в этом случае оказывается достаточно сложной для анализа, поэтому сделаем упрощающее предположение о том, что мнимые части диэлектрических проницаемостей матрицы и наночастиц малы по сравнению с их действительными частями

$$|\varepsilon''_b| \ll |\varepsilon'_b|, \quad |\varepsilon''_m| \ll |\varepsilon'_m|. \quad (4)$$

Именно этот случай и представляет наибольший интерес для практической реализации рассматриваемых гетерогенных сред, так как усиление, получаемое в современных активных средах, является достаточно слабым.

Учитывая условие (4), разложим правую часть уравнения (1) по малым параметрам $\varepsilon''_m / \varepsilon'_m$, $\varepsilon''_b / \varepsilon'_b$. Ограничиваясь линейными членами разложения, можно получить следующие уравнения, связывающие параметры ε_b , ε_m и η :

$$\varepsilon'_m \frac{\varepsilon'_b(1+2\eta) + 2\varepsilon'_m(1-\eta)}{\varepsilon'_b(1-\eta) + \varepsilon'_m(2+\eta)} = 1, \quad (5)$$

$$\varepsilon''_m = -\varepsilon''_b \frac{\eta}{1-\eta} \frac{9\varepsilon'^2_m}{(\varepsilon'_b + 2\varepsilon'_m)^2 + 2(\varepsilon'_b - \varepsilon'_m)^2 \eta}. \quad (6)$$

Задавая параметры ε'_b и η , из уравнения (5) можно определить ε'_m . Затем на основе известного значения ε''_b из уравнения (6) можно найти ε''_m . Необходимый коэффициент усиления активной матрицы определяется следующим выражением:

Таблица 1. Параметры активной матрицы для получения единичного показателя преломления гетерогенной среды, содержащей серебряные наночастицы

Длина волны $\lambda = 550$ нм, $\varepsilon'_b(Au) = -11$,

$$\varepsilon''_b(Au) = 0.365$$

η	ε'_m	$\kappa_{amp} \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$
10^{-3}	5.52	4.4
0.01	5.57	4.5
0.1	7.79	4.9
0.3	13.8	6.4

$$\kappa_{amp} = -\frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon''_m}{\sqrt{\varepsilon'_m}}.$$

Расчеты показывают, что наименьшие значения коэффициента усиления достигаются при малых концентрациях наночастиц ($\eta < 0.1$). В этом случае

$$\kappa_{amp} \approx \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon''_b}{\sqrt{-2\varepsilon'_b}}.$$

Соответствующие параметры гетерогенной среды для случая, когда в качестве материала наночастиц используется серебро, представлены в таблице 1. Получающийся коэффициент усиления $\kappa_{amp} \approx 4.5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ является исключительно высоким, однако он достигался в ряде экспериментов [7]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что получение материалов с единичным показателем преломления является принципиально осуществимым.

Обсуждение результатов

Приведенные выше соображения показывают принципиальную возможность получения материала с единичным показателем преломления. Однако задачу по выбору оптимальных материалов и параметров для практической реализации подобного материала нельзя считать завершенной. Используемое в данной работе уравнение Максвелла-Гарнета, на самом деле, весьма приблизительно описывает свойства реальных гетерогенных сред. Существующее альтернативное уравнение -- Клаузиуса-Мосотти [5] -- применимо также при весьма ограниченном ди-

апазоне параметров.

Таким образом, первым направлением для развития дальнейших исследований является получение более адекватного уравнения для электромагнитного поля внутри гетерогенной среды. При этом необходимо учесть ряд факторов, которые не принимаются во внимание ни в формуле Максвелла-Гарнета, ни в формуле Клаузиуса-Мосотти. Во-первых, наночастицы, составляющие гетерогенную среду, имеют конечные размеры. При больших концентрациях ($\eta \geq 0.1$) расстояние между наночастицами становится сравнимым с размерами самих наночастиц. Это приводит к тому, что локальные поля внутри наночастиц будут сильно неоднородными, что должно существенно сказаться на общей картине распространения электромагнитного поля. Второй фактор, который необходимо учитывать в расчетах – это запаздывание взаимодействия между наночастицами. Расстояния, на которых располагаются наночастицы в матрице, намного больше обычных межатомных расстояний. Возникающие при распространении от одной наночастицы к другой фазовые задержки могут привести к существенному изменению эффективного показателя преломления. Аналогичный эффект присутствует и в обычной диэлектрической среде при учете ее дискретного строения и носит название эффекта ближнего поля [8]. Следует ожидать, что в рассматриваемой гетерогенной среде этот эффект будет многократно усилен. Следует упомянуть еще об одном отличии метаматериалов от обычных сред. Наночастицы, в отличие от атомов, расположены не в вакууме, а некоторой матрице. Неоднородность поля в матрице, создаваемая наночастицами, также может влиять на эффективный показатель преломления. В этом случае для описания свойств гетерогенной среды, возможно, потребуется привлечение теории, описывающей свойства фотонных кристаллов [9].

Для того чтобы рассеяние было релеевским, размеры наночастиц должны быть намного меньше длины волны. Обычно, этот размер не должен превышать нескольких десятков нанометров [6]. При таких малых раз-

мерах диэлектрические свойства наночастиц уже не будут совпадать с диэлектрическими свойствами объемных сред. В работе [10], например, показано, что при уменьшении размеров металлических частиц их поляризуемость также уменьшается. При этом уменьшение поляризуемости происходит быстрее, чем уменьшение объема наночастицы. При достаточно малых размерах наночастицы (порядка одного нанометра) в зависимости поляризуемости от частоты начинает проявляться тонкая структура, связанная с квантово-размерными эффектами. Таким образом, третьим фактором, который необходимо принимать во внимание при выводе уравнения распространения поля в гетерогенной среде, является учет квантовых эффектов в свойствах наночастиц.

Наряду с вопросами теоретического описания свойств гетерогенных сред не вполне выясненным остается и вопрос о конструкции метаматериала. Конструкция, состоящая из наночастиц, распределенных в другом материале, не является единственным вариантом. В работах [11, 12], например, рассматриваются свойства искусственных сред, в которых периодическая структура образована тонкими металлическими нитями.

Выше была продемонстрирована возможность получения метаматериала с единичным показателем преломления для определенной длины волны. При этом поглощение в наночастицах компенсировалось дополнительным усилением в матрице. Ввиду того, что усиление в среде можно обеспечить, скорее всего, только в узком частотном диапазоне, вопрос о реализации невидимости метаматериала для электромагнитной волны в широком оптическом диапазоне остается открытым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Joannopoulos J. D., Villeneuve P.R., Fan S.H.* Photonic Crystals: Putting a New Twist on Light // *Nature*. 1997. №6621.
2. *Pendry J. B.* Negative refraction makes a perfect lens // *Phys. Rev. Lett.* 2000. №3966.
3. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-*

- Nasser S.C., Schultz S.* Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // *Phys. Rev. Lett.* 2000. №18.
4. *Enoch S., Tayeb G., Sabouroux P., Guïrin N., Vincent P.* A metamaterial for directive emission // *Phys. Rev. Lett.* 2002. №213902.
 5. *Ораевский А.Н., Проценко И.Е.* Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред // *Письма в ЖЭТФ.* 2000. №9.
 6. *Ораевский А.Н., Проценко И.Е.* Оптические свойства гетерогенных сред // *Квантовая электроника.* 2001. №3.
 7. *Васильев П.П.* Роль сильного усиления среды в возникновении сверхизлучения и наблюдении когерентных эффектов в полупроводниковых лазерах // *Квантовая электроника.* 1999. №1.
 8. *Gadomsky O.N., Krutitsky K.V.* Near-field effect in surface optics // *J.Opt.Soc.Am. B.* 1996. №8.
 9. *Ohtaka K., Ueta T., Amemiya K.* Calculation of photonic bands using vector cylindrical waves and reflectivity of light for an array of dielectric rods // *Phys. Rev. B* 1998. №4.
 10. *Xiao M., Bozhevolnyi S., Keller O.* Numerical study of configurational resonances in near-field optical microscopy with a mesoscopic metallic probe // *Appl. Phys. A* 1996. Vol.62.
 11. *Pendry J. B., Holden A. J., Stewart W. J., Youngs I.* Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // *Phys. Rev. Lett.* 1996. №25.
 12. *Pokrovsky A.L., Efros A.L.* Electrodynamics of Metallic Photonic Crystals and the Problem of Left-Handed Materials // *Phys. Rev. Lett.* 2002. №9.

HETEROGENEOUS MEDIUM WITH A UNIT INDEX OF REFRACTION

© 2004 S.V.Sukhov

Ulyanovsk Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences

The properties of heterogeneous medium consisting of metal nanospheres in active laser matrix are considered. It is demonstrated that refractive index of heterogeneous medium can be equal to unity under the definite relations in parameters of constituents. Hence, the situation may be realized when heterogeneous medium is invisible for the external electromagnetic radiation.