

Фонон-поляритонные мета-атомы для дальнего ИК-диапазона

Ж. О. Домбровская,* А. В. Журавлев, Г. В. Белокопытов, А. Н. Боголюбов
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Исследованы поляризуемости субволновых сферических частиц из кварцевого стекла с учетом материальной дисперсии. Показано, что диапазоны отрицательных значений электрической и магнитной поляризуемостей практически совпадают. Это позволяет использовать такие частицы для создания среды с отрицательным показателем преломления.

PACS: 78.66.Sq

УДК: 537.874

Ключевые слова: мета-атом, фононные поляритоны, дисперсия кварцевого стекла, электрическая и магнитная поляризуемости, метапленка.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы, метаматериалы и фотонные кристаллы, являются, как правило, периодически структурированными. Они состоят из поляризуемых частиц, обладающих частотно избирательным резонансным откликом на электрическое и магнитное поля. Такие частицы в настоящей работе будем называть мета-атомами.

В СВЧ, терагерцовом и ближнем ИК диапазонах для создания сред с отрицательным показателем преломления в качестве мета-атомов чаще всего используются металлические частицы. Это связано с тем, что на длинах волн выше плазменной металлы обладают отрицательной реальной частью диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon < 0$. Отрицательная магнитная проницаемость $\text{Re}\mu < 0$ обеспечивается магнитными резонансами.

Высокие значения поляризуемостей металлических частиц обусловлены возбуждением локализованных плазмон-поляритонов. Однако это не единственный способ обеспечить отрицательные проницаемости метаматериалов. Так в [1] были рассмотрены свойства полупроводниковых фотонных кристаллов, резонансный отклик которых является следствием возбуждения экситонных поляритонов. В настоящей работе рассмотрена еще одна возможность — использование в качестве мета-атомов сферических субволновых частиц из кварцевого стекла SiO_2 .

В данном материале в дальнем ИК-диапазоне ([8.03; 9.28] мкм и [19.88; 21.46] мкм) присутствуют резонансы диэлектрической проницаемости. Они обусловлены возбуждением фононных поляритонов, то есть колебанием цепочек атомов Si–O–Si, которые сопровождаются осцилляциями дипольных моментов решетки (см. рис. 1а) [2]. Резонансы диэлектрической проницаемости будут приводить к резонансам электрической поляризуемости частиц из данного материала. В дополнении к этому, при определен-

ных параметрах дифракции в мета-атомах также могут возбуждаться магнитные резонансы, что может приводить к резонансам магнитной поляризуемости $\text{Re}\mu < 0$. Следовательно, показатель преломления метаматериала, составленного из таких диэлектрических включений, может быть отрицательным в некотором диапазоне длин волн.

1. МОДЕЛЬ ДИСПЕРСИИ

В большинстве работ по изучению оптических свойств частиц из кварцевого стекла для описания показателя преломления n используется трехпараметрическая модель Селлмейера [3]. Однако она не применима вблизи резонансов, ее корректность, согласно работе [4], подтверждена экспериментально только в диапазоне от 0.21 до 6.7 мкм. Рассматриваемые в настоящей работе диапазоны лежат за его пределами. Аппроксимация в них может быть осуществлена модифицированными функциями Фойгта [5]. Такой подход учитывает естественную ширину колебательной линии и уширение вследствие структурной неупорядоченности материала. Если второй фактор доминирует, то модель может быть упрощена. В этом случае аппроксимация осуществляется с помощью функций Гаусса g_{cj}^{kkg} и g_{cj} по формуле [6]

$$\epsilon(\lambda) = \epsilon_\infty + \sum_j [g_{cj}^{kkg}(\lambda) + i g_{cj}(\lambda)], \quad (1)$$

где ϵ_∞ — диэлектрическая проницаемость на высоких частотах (для SiO_2 $\epsilon_\infty = 1$), λ — длина волны, i — мнимая единица.

Результаты расчетов $n(\lambda)$ в рамках описанной модели были проведены в работе [2], они представлены на рис. 1б. На графике отчетливо прослеживаются три области значительного поглощения: [9; 9.5] мкм, [12; 13] мкм и [21; 21.5] мкм. Первый резонанс возникает вследствие продольных колебаний атома О, при этом связи Si–O и O–Si растягиваются и сжимаются в противофазе [7]. Второй и третий максимумы обусловлены колебаниями атома О перпендикулярно линии, соединяющей атомы Si–Si. Молекулярные связи растягиваются и сжимаются симметрично [8].

*E-mail: dombrovskaya@physics.msu.ru

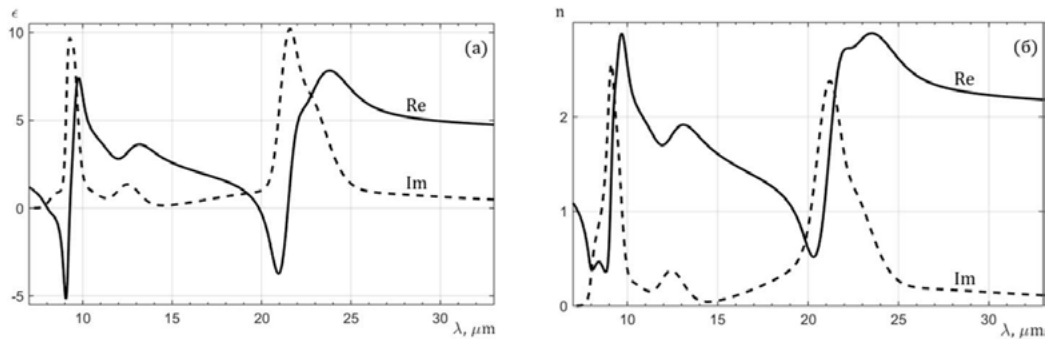


Рис. 1: Дисперсия кварцевого стекла при комнатной температуре: (а) диэлектрическая проницаемость ϵ , (б) показатель преломления n . Сплошная кривая — действительная часть, пунктирная — мнимая.

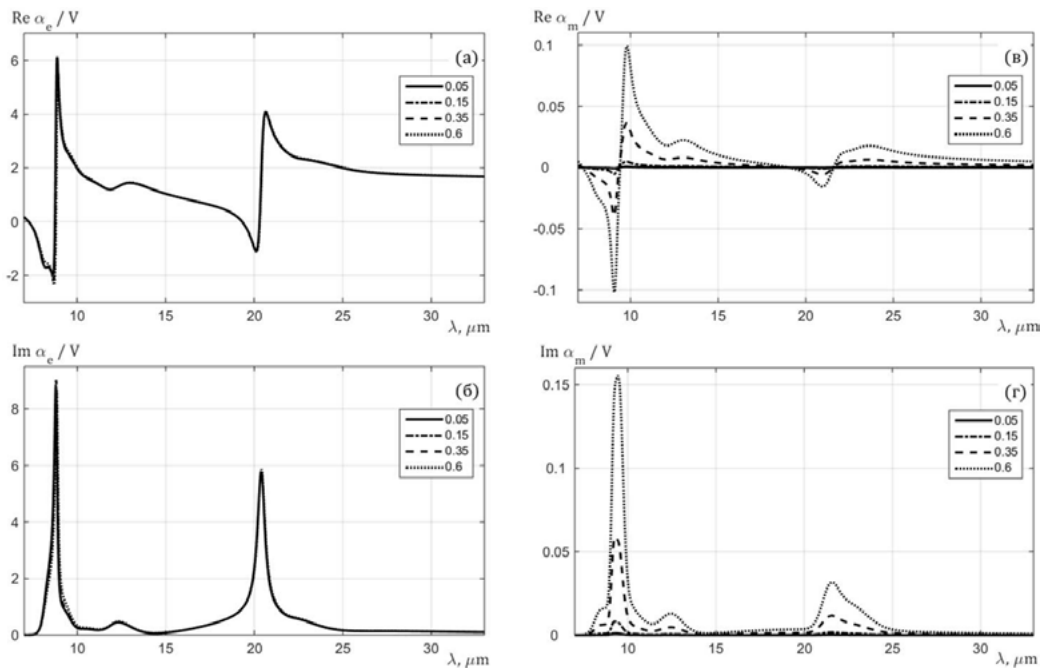


Рис. 2: Спектры действительной и мнимой частей нормированных поляризуемостей: (а, б) — электрической α_e/V и (в, г) — магнитной α_m/V .

2. ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Для исследования свойств двумерных метаматериалов (метапленок) необходимо предварительно изучить поляризуемости составляющих их мета-атомов. Электрическая α_e и магнитная α_m поляризуемости сферических частиц могут быть рассчитаны на основе аналитических соотношений теории рассеяния Ми:

$$\alpha_e = \frac{6\pi i}{k_0^3} a_1(n, x); \quad \alpha_m = \frac{6\pi i}{k_0^3} b_1(n, x), \quad (2)$$

где a_1 и b_1 — первые парциальные амплитуды разложения рассеянного излучения в ряд по сферическим гармоникам (выражаются через функции Бесселя–Риккати) [9], $x = k_0 a$ — параметр дифракции, k_0 — волновое число в вакууме, a — радиус частицы. Фор-

мулы (2) были получены в рамках дипольного приближения [10] и могут применяться даже если для мета-атомов не выполнено условие квазистационарности [11].

Ниже на рис.2 представлены результаты расчета компонент поляризуемости, нормированных на объем V частицы. При изменении размеров мета-атомов кривые зависимости действительной части нормированной электрической поляризуемости $\text{Re}\alpha_e/V$ практически не меняются. Это справедливо и для $\text{Im}\alpha_e/V$ (см. рис.2а, б). Такое безразмерное поведение резонансов, несвойственное для металлов, обусловлено дисперсией диэлектрической проницаемости диэлектрика SiO_2 . По этой же причине $\text{Re}\alpha_e < 0$ в приблизительно тех же диапазонах, где $\text{Re}\epsilon < 0$. Наличие магнитных резонансов в мета-атоме приводит к тому, что $\text{Re}\alpha_m < 0$. Глубина минимума зависит от размера ча-

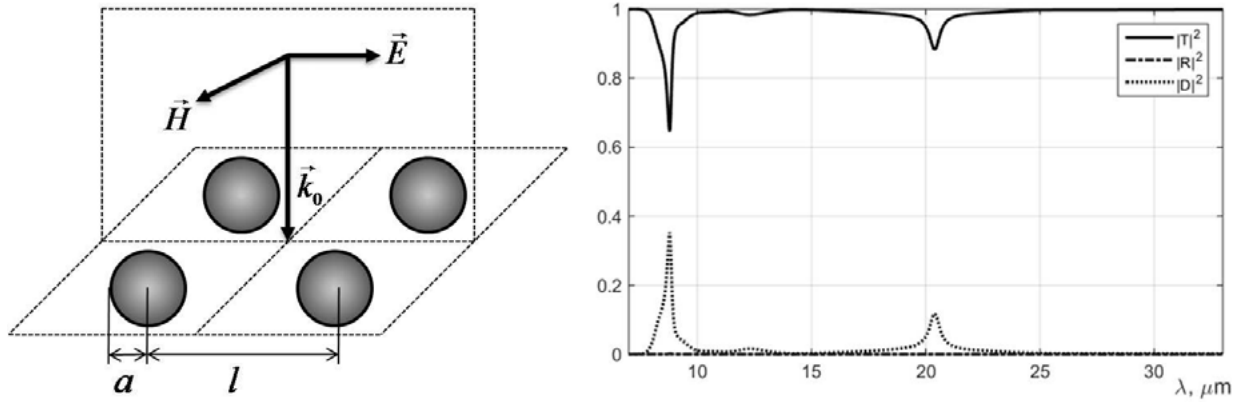


Рис. 3: Структура метапленки и спектры ее мощностных коэффициентов прохождения $|T|^2$, отражения $|R|^2$ и поглощения $|D|^2$.

стицы (см. рис. 2в). Следует отметить, что присутствуют ограничения сверху на радиус, связанные с применимостью дипольного приближения [12].

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАПЛЕНКИ

Методика расчета коэффициентов прохождения T и отражения R метапленки основана на шивании полей над и под ней с учетом эффективных граничных условий [13]. В случае нормального падения [14]

$$\begin{aligned} T &= \frac{1 + (k_0/2)^2}{1 - (k_0/2)^2 + i(k_0/2)(\alpha_{es} + \alpha_{ne})}; \\ R &= \frac{-i(k_0/2)(\alpha_{es} - \alpha_{ne})}{1 - (k_0/2)^2 + i(k_0/2)(\alpha_{es} + \alpha_{ne})}, \end{aligned} \quad (3)$$

где α_{es} и α_{ms} — компоненты матрицы поверхностной плотности поляризуемости метапленки, которые рассчитываются по поляризуемостям отдельных сферических частиц согласно соотношениям [15]

$$\alpha_{es} = \frac{N\langle\alpha_e\rangle}{1 - N\langle\alpha_e\rangle/4r}; \quad \alpha_{ne} = \frac{N\langle\alpha_m\rangle}{1 + N\langle\alpha_m\rangle/4r}. \quad (4)$$

Здесь угловые скобки обозначают усреднение по поверхности метапленки, $N = 1/l^2$ — концентрация частиц, $r \approx 0.6956l$ — радиус области влияния [16]. Ко-

эффициент поглощения D связан с T и R соотношением $|D|^2 = 1 - |T|^2 - |R|^2$.

Электродинамические характеристики метапленки, составленной из шариков SiO_2 радиусом $a \approx 0.15$ мкм, который в шесть раз меньше периода решетки l , представлены на рис. 3. Минимумы прохождения и максимумы поглощения соответствуют резонансным длинам волн $n(\lambda)$. Интересно, что в дальнем ИК-диапазоне метапленки из кварцевого стекла являются практически безотражательными поверхностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормированная электрическая поляризуемость рассмотренных субволновых мета-атомов не зависит от их размеров, а нормированная магнитная поляризуемость увеличивается с ростом радиуса. Диапазоны отрицательных значений обеих поляризуемостей практически совпадают. Отклик исследованной метапленки является резонансным. При этом на резонансных длинах волн значения коэффициентов прохождения $|T|^2$ и поглощения $|D|^2$ по порядку величины сопоставимы с единицей, а коэффициент отражения на три порядка меньше: $|R|^2 \leq 1.7 \cdot 10^{-3}$. Поэтому такие метапленки могут быть использованы для покрытия линз приборов ночного видения и видеокамер, чтобы уменьшить вероятность их обнаружения.

- [1] *Ивченко Е. Л., Поддубный А. Н.* Физ. тв. тела. **48**. С. 540. (2006).
- [2] *Kitamura R. et al.* Appl. Opt. **46**. P. 8118. (2007).
- [3] *Malitson I. H.* J. Opt. Soc. America. **55**. P. 1205. (1965).
- [4] *Tan C.* J. Non-Cryst. Solids. **223**. P. 158. (1998).
- [5] *Meneses D. D. S. et al.* J. Non-Cryst. Solids. **351**. P. 124. (2005).
- [6] *Meneses D. D. S. et al.* J. Non-Cryst. Solids. **352**. P. 769. (2006).

- [7] *Fanderlik I.* Optical Properties of Glass. (N.Y: Elsevier Science, 1983).
- [8] *Efimov A. M.* Optical Constants in Inorganic Glasses. (Boca Raton: CRC, 1995).
- [9] *Bohren C. F., Huffman D. R.* Absorption and Scattering of Light by Small Particles. (N.Y.: Wiley, 1983).
- [10] *Белокопытов Г. В., Журавлёв А. В.* Физ. волн. проц. радиотехн. сист. **11**. С. 41. (2008).
- [11] *Belokopytov G. V. et al.* Phys. WavePhenom. **23**. P. 39.

- (2015).
- [12] Журавлев А.В. Резонансное рассеяние электромагнитных волн сферическими частицами. Дис. канд. физ.-мат. наук 01.04.03. (М., 2009).
- [13] Idemen M. J. Phys. Soc. Japan. **59**. P.71. (1990).
- [14] Holloway C.L. et al. IEEE Ant. Propag. Magaz. **54**. P.10. (2012).
- [15] Holloway C.L. et al. IEEE Trans. Electromagn. Compat. **47**. P. 853. (2005).
- [16] Kuester E.F. et al. IEEE Trans. Antennas. Propag. **51**. P.2641. (2003).

Phonon–polariton meta–atoms for far infrared

Zh. O. Dombrovskaya^a, A. V. Zhuravlev, G. V. Belokopytov, A. N. Bogolyubov

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^adombrovskaya@physics.msu.ru

The polarizabilities of subwave spherical silica glass particles are investigated with taking material dispersion into account. It is shown that the ranges of negative values for electric and magnetic polarizabilities are practically coinciding. This permits to use such particles for constructing of the medium with negative refractive index.

PACS: 78.66.Sq

Keywords: metaatom, phonon polaritons, silica glass dispersion, electric and magnetic polarizabilities, metafilm.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Домбровская Жанна Олеговна — аспирантка; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: dombrovskaya@physics.msu.ru.
2. Журавлев Антон Викторович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-32-61, e-mail: antonzh@mail.ru.
3. Белокопытов Геннадий Васильевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-32-61, e-mail: gvb@phys.msu.ru.
4. Боголюбов Александр Николаевич — докт. физ.-мат. наук, заслуженный профессор, профессор; тел: (495) 939-10-33, e-mail: bogan7@yandex.ru.