

05;07;09

## **К возможности создания искусственных сред с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями**

© С.И. Масловский

С.-Петербургский государственный технический университет  
E-mail: stas@cc.hut.fi*Поступило в Реакцию 6 августа 2002 г.*

Рассмотрены искусственные магнитодиэлектрики, образованные двумя подсистемами: подсистемой, обладающей отрицательной диэлектрической проницаемостью, и подсистемой, обладающей отрицательной магнитной проницаемостью. Показано, что результирующий материал имеет отрицательный коэффициент преломления только при выполнении особых условий, а именно: при отсутствии сильной квазистатической связи между двумя подсистемами.

Искусственные материалы, преломляющие свет (или радиоволны сверхвысокочастотного диапазона) по закону „отрицательной рефракции“, в последнее время получили необычайно большую популярность. Эффекты отрицательной рефракции, будучи интересны сами по себе, также способны дать применение так называемым „фотонным кристаллам“, изучение которых ведется в последние годы столь же интенсивно.

Основополагающей работой в теории отрицательно преломляющих сред следует считать работу В.Г. Веселаго [1], опубликованную в 60-х годах. В статье [1] была отмечена возможность создания оптических устройств нового типа, работающих на основе законов отрицательной рефракции. В направлении создания таких устройств и сконцентрировались усилия многих ученых сегодня.

Цель настоящей статьи показать, что далеко не любая „смесь“ двух материалов, обладающих по отдельности отрицательным  $\epsilon$  или  $\mu$ , также обладает и отрицательным коэффициентом преломления. Мы покажем это на примере подсистемы резонирующих включений в виде сдвоенных разомкнутых колец (СРК), встроеной внутрь кристалла, образованного

прямолинейными проводниками, т.е. на примере системы, рассмотренной в работах [2–4] и др.

Как показано в работе [5], диада комплексной диэлектрической проницаемости кристалла, образованного тонкими, прямолинейными, неидеально проводящими металлическими цилиндрами радиусом  $r_0$ , ориентированными вдоль направления единичного вектора  $\mathbf{z}_0$ , может быть найдена, в квазистатическом приближении, как

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 \left( \bar{I} - \frac{2\pi \mathbf{z}_0 \mathbf{z}_0}{(ka)^2 \log \frac{a^2}{4r_0(a-r_0)} - \frac{jka^2 Z_s}{r_0 \eta}} \right), \quad (1)$$

где  $\bar{I}$  — единичная диада,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $a$  — постоянная решетки (квадратной),  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число в свободном пространстве,  $\eta = 377 \Omega$  — волновое сопротивление свободного пространства,  $Z_s$  — эффективный поверхностный импеданс цилиндров, описывающий потери в скин-слое металла. Формула (1) получена в предположении, что цилиндры помещены в среду с диэлектрической и магнитной проницаемостями, равными проницаемостям свободного пространства. Прделав выкладки, аналогичные [5], для вмещающей среды с относительными проницаемостями  $\epsilon$ ,  $\mu$  получаем для проницаемости кристалла (потерями пренебрегаем):

$$\bar{\epsilon}_{\text{mix}} = \epsilon_0 \left( \epsilon \bar{I} - \frac{2\pi \mathbf{z}_0 \mathbf{z}_0}{\mu (ka)^2 \log \frac{a^2}{4r_0(a-r_0)}} \right). \quad (2)$$

Видно, что эффективная диэлектрическая проницаемость кристалла, полученная в квазистатическом приближении, оказывается зависящей от магнитных свойств вмещающей среды. Этот необычный факт связан с тем, что в кристалле проводящих цилиндров диэлектрический отклик среды, т.е. средний ток поляризации, является ничем иным, как результатом усреднения обычных электрических токов, текущих по поверхностям цилиндров. Величина продольной (параллельной оси цилиндров) компоненты этих токов определяется, как показано в [5], эффективной индуктивностью цилиндрических проводников, которая, конечно, оказывается зависящей от магнитных свойств вмещающей среды.

Более того, из (2) видно, что, если магнитная проницаемость вмещающей среды отрицательна (одновременно с  $\epsilon > 0$ ), получить

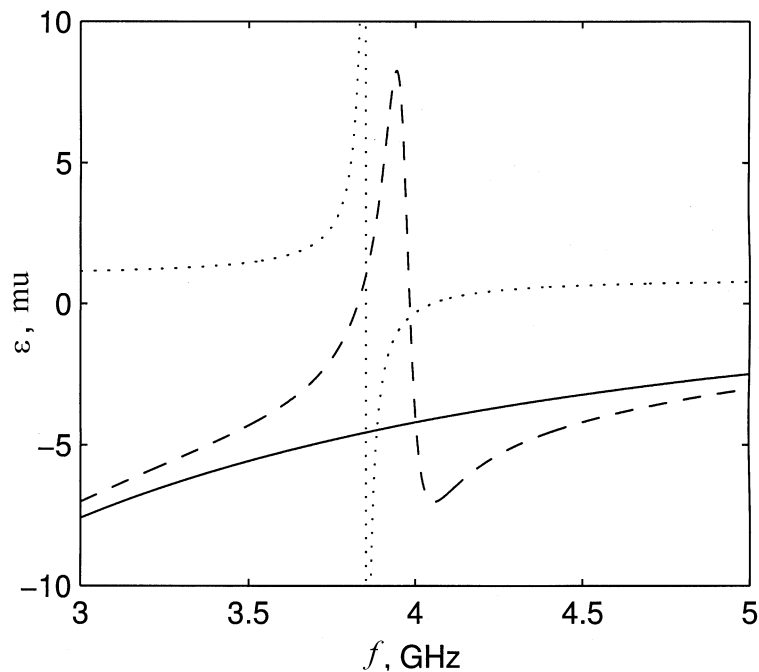
отрицательные значения эффективной диэлектрической проницаемости смеси  $\epsilon_{\text{mix}z}$  невозможно. Как же подобный вывод согласуется с результатами работ [3,4] и др., где делается простое предположение о равенстве материальных параметров смеси материальным параметрам ее „электрического“ и „магнитного“ компонентов по отдельности?

Внимательное изучение структуры образцов, использованных в экспериментах и при моделировании авторами [3,4], дает ответ на этот вопрос. СРК, обеспечивающие отрицательную магнитную проницаемость композита, помещены в такие точки внутри кристалла, где квазистатическое магнитное поле подсистемы цилиндров, пронизывающее СРК, обращается в нуль. Благодаря этому, две подсистемы оказываются развязанными по ближнему магнитному полю и отрицательность магнитной проницаемости подсистемы СРК не сказывается на эффективной диэлектрической проницаемости подсистемы цилиндров, а следовательно, и всей системы в целом. Подобное же заключение можно сделать и о влиянии отрицательной диэлектрической проницаемости подсистемы цилиндров на магнитную проницаемость подсистемы СРК: по отношению к СРК цилиндры помещены в такие точки, где усредненная по поверхностям цилиндров продольная компонента ближнего электрического поля, созданного подсистемой СРК, равна нулю.

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов, иллюстрирующие основные выводы предыдущей секции. Графики даны для системы, образованной СРК, резонирующими на частоте 3.85 GHz и помещенными внутрь кристалла проводящих цилиндров. „Плазменная частота“ подсистемы цилиндров (частота, на которой вещественная часть диэлектрической проницаемости меняет знак) выбрана близкой к 10 GHz.

Резонансная частота и магнитная поляризуемость СРК-частицы рассчитывались с помощью простой LC-модели, справедливой в области длин волн, заметно превышающих поперечник СРК. Магнитная проницаемость полной подсистемы СРК вычислялась затем в рамках модифицированного подхода Максвелла–Гарнетта, позволяющего правильно учесть отсутствие потерь на рассеяние в регулярных системах, см. [6]. В то же время тепловые потери в металле и в диэлектрической подложке СРК учитывались. Для вычисления диэлектрической проницаемости подсистемы проводящих цилиндров использовалась формула (1).

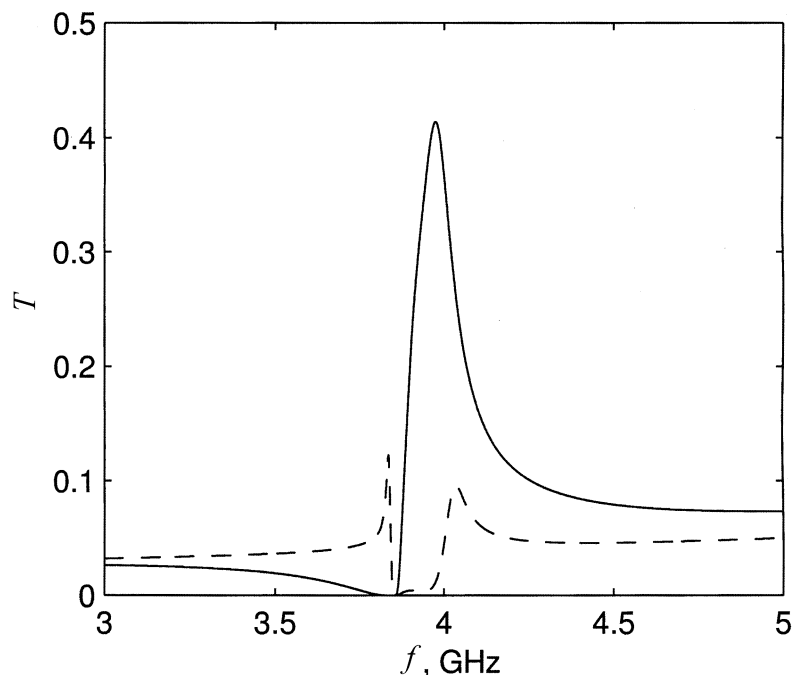
Пунктирная линия на рис. 1 показывает зависимость вещественной части магнитной проницаемости подсистемы СРК от частоты. Зависимость имеет явно выраженный резонансный характер. В некоторой об-



**Рис. 1.** Диэлектрическая и магнитная проницаемости подсистем проводящих цилиндров и СРК в зависимости от частоты.

ласти частот выше резонансной частоты вещественная часть магнитной проницаемости отрицательна.

Сплошной линией на рис. 1 изображена зависимость вещественной части диэлектрической проницаемости подсистемы цилиндров от частоты. Полная система обладает такой проницаемостью при отсутствии сильной квазистатической связи между подсистемами цилиндров и СРК. Если взаимодействием двух подсистем по ближнему полю пренебречь нельзя, при вычислении диэлектрической проницаемости композита необходимо использовать формулу, аналогичную (2). График вещественной части диэлектрической проницаемости для данного случая приведен на рис. 1 в виде штриховой линии. Видно, что вещественная



**Рис. 2.** Частотные зависимости коэффициентов прохождения для случаев слабой и сильной связи.

часть диэлектрической проницаемости композита становится положительной в области сильного резонанса подсистемы СРК.

На рис. 2 изображены частотные зависимости модулей коэффициентов прохождения для слоя рассматриваемого материала. Сплошная линия соответствует случаю особого взаимного расположения подсистем, когда квазистатическим взаимодействием между ними можно пренебречь, штриховая — случаю сильного взаимодействия. Видно, что пик прозрачности, присутствующий на первом графике, исчезает на втором.

Основываясь на результатах данного небольшого исследования, мы можем заключить, что одновременная отрицательность материальных параметров искусственного композита, образованного двумя подсисте-

мами: „электрической“ и „магнитной“, — возможна только при выполнении определенных условий, обеспечивающих слабое взаимодействие этих подсистем.

В случае сильного взаимодействия, например, когда характерные пространственные масштабы двух подсистем сильно отличаются и одна подсистема может быть рассмотрена как эффективная вмещающая среда для другой подсистемы, получить одновременно отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей смеси невозможно.

## Список литературы

- [1] *Веселого В.Г.* // УФН. 1967. Т. 92. № 3. С. 517–526.
- [2] *Kostin M.V., Shevchenko V.V.* // Sov. J. Commun. Technol. Electronics. 1993. V. 38. N 5. P. 78–83.
- [3] *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 18. P. 4184–4187.
- [4] *Shelby R.A., Smith D.R., Shultz S.* // Science. 2001. V. 292. P. 77–79.
- [5] *Maslovski S.I., Tretyakov S.A., Belov P.A.* Wire media with negative effective permittivity: a quasi-static model. To appear in Microwave Opt. Technol. Lett. October 2002.
- [6] *Sipe J.E., Van Kranendonk J.* // Phys. Rev. A. 1974. V. 9. N 5. P. 1806–1822.