

УДК 537.862

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАПЛЕНОК ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Ю.Е. Терехов, М.К. Ходзицкий, Г.В. Белокопытов

Методом численного конечно-элементного моделирования получены коэффициенты отражения и прохождения метапленок, составленных из П-образных резонаторов, в частотном диапазоне 0,1–1 ТГц. Пропорционально масштабировались длина стороны, глубина зазора и период резонаторов. Получены экспериментальные спектры коэффициентов прохождения метапленок с П-образными резонаторами. Показана перестройка резонансных мод с 0,12 до 0,51 ТГц при масштабировании геометрических параметров П-образных резонаторов.

Ключевые слова: метаматериалы, П-образный резонатор, электродинамическое подобие, терагерцовый диапазон, плазмонный резонанс, метапленка.

Введение

В настоящее время активно исследуются метаматериалы – искусственные композитные среды с включениями, размер которых и расстояния между которыми много меньше длины волны внешнего излучения [1]. Ключевой структурной единицей («атомом фотоники») композитной среды является металлический П-образный резонатор микронных или субмикронных размеров [2, 3], представляющий собой на рабочих частотах аналог сосредоточенного LC-контура, образованного индуктивной петлей с емкостным зазором. Периодические структуры на основе таких субволновых резонаторов позволяют получать заданный отклик на внешнее электромагнитное излучение. Это свойство актуально при создании маскирующих покрытий [4] на основе резонаторов и устройств на метаматериалах, работающих в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот [5]. Важным обстоятельством, которое облегчает создание метаматериалов ТГц диапазона, является свойство электродинамического подобия, которое проявляется в том, что собственные частоты субволновых резонансных элементов обратно пропорциональны их геометрическим размерам (при сохранении геометрических пропорций) [6, 7]. Вместе с тем, электродинамическое подобие всегда является неполным из-за дисперсии материальных параметров металлических и диэлектрических сред, причем именно в ТГц диапазоне частот дисперсия многих веществ особенно существенна. В связи с этим целью данной работы явилась проверка выполнения закономерностей электродинамического подобия в двумерных метаматериалах (метапленках) ТГц диапазона частот, которые представляли собой совокупность П-образных металлических резонаторов, расположенных в узлах квадратной решетки, а также моделирование и разработка механически перестраиваемого фильтра на метаматериалах (П-образных резонаторах) для ТГц диапазона частот.

Описание структуры исследуемых метаматериальных образцов

Исследуемая структура (метапленка) представляет собой массив периодически расположенных медных П-образных резонаторов высотой 15 мкм на ситалловой подложке толщиной 0,56 мм. Для адекватного численного и экспериментального моделирования метапленки была исследована частотная дисперсия показателя преломления ситалловой подложки в диапазоне частот 0,1–1 ТГц. Показатель преломления ситалла был измерен двумя методами:

1. по положениям резонансов Фабри–Перо в спектре прохождения через ситалловую пластину;
2. по разности фазовых задержек сигнала в свободном пространстве и пространстве с подложкой.

Спектры прохождения и отражения подложки были получены на ТГц фотометре [8] и рефлектометре [9] соответственно и представлены на рис. 1.

В первом методе показатель преломления ситалла определялся по формулам [10]

$$n = \frac{c \cdot k}{2d \cdot (v_{m+k} - v_m)},$$

где c – скорость света; d – толщина ситалловой подложки; v_{m+k} и v_m – частоты $m+k$ и m -го резонансов Фабри–Перо соответственно. Полученный этим методом средний показатель преломления равен $\bar{n} = 2,9$. Во втором методе показатель преломления определялся по формуле [11]

$$n(v) = 1 + \frac{c}{2\pi v d} [\varphi_s(v) - \varphi_r(v)],$$

где $\varphi_s(v)$ и $\varphi_r(v)$ – фазы комплексных амплитуд коэффициентов прохождения для подложки и свободного пространства соответственно. Зависимость фазы от частоты для подложки и свободного

пространства, а также частотная дисперсия показателя преломления ситалла, рассчитанная вторым методом, представлены на рис. 2.

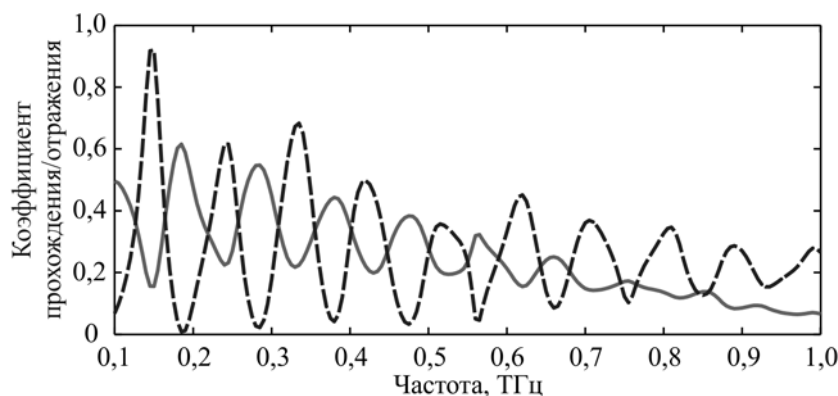


Рис. 1. Экспериментальные спектры прохождения (сплошная линия) и отражения (пунктирная линия) по мощности для ситалловой подложки толщиной 0,56 мм

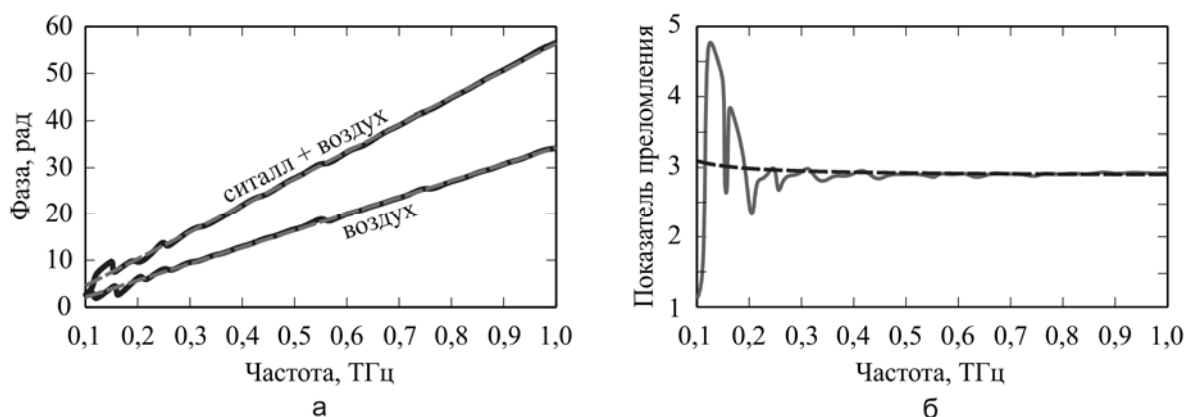


Рис. 2. Зависимость фазы от частоты (а) и дисперсия показателя преломления, определенная фазовым методом (б). Сплошные линии – экспериментально полученные фазы и показатель преломления, рассчитанный из разности экспериментальных фаз; пунктирные – фазы, полученные линейной аппроксимацией экспериментальных фаз и показатель преломления, рассчитанный из разности линейно-аппроксимированных экспериментальных фаз

Средний показатель преломления, определенный фазовым методом, в диапазоне частот 0,1–1 ТГц равен $\bar{n} = 2,9$. Разброс значений показателя преломления в области низких частот обусловлен погрешностями эксперимента.

Расчет коэффициентов прохождения и отражения метапленки

Численный расчет параметров прохождения и отражения исследуемой структуры производился методом конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics. Геометрия П-образного резонатора и области для численного расчета представлены на рис. 3.

В расчетах длина стороны резонатора l изменялась от 100 до 350 мкм с шагом 50 мкм и были выбраны следующие геометрические пропорции: $u/l = 0,6$; $g/l = 0,3$; $p/l = 1,5$. Для учета дисперсии материальных параметров резонаторов использовалась модель Друде–Лоренца

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_r)},$$

где плазменная частота $\omega_p = 8,76$ эВ, частота релаксации $\omega_r = 0,0955$ эВ (данные для меди в соответствии с [12]). Для моделирования в областях 1–3 показатель преломления принят равным $n = 1$, а в областях 5 и 6 показатель преломления подложки принят равным $n_{sub} = 2,9$ (средний показатель преломления ситалла в диапазоне 0,1–1 ТГц). На границе металлического резонатора для учета скин-слоя были заданы импедансные граничные условия, на внешних границах областей 1–6 (точечные линии на рис. 3, б), перпендикулярных осям x и z , установлены периодические граничные условия, а на внешних границах, перпендикулярных оси y , заданы граничные условия рассеяния. Таким образом, электродинамический

расчет производился (подобно [6]) для периодического массива частиц, при этом учитывалось взаимодействие между резонаторами. Ширина области моделирования p определяла период решетки резонаторов.

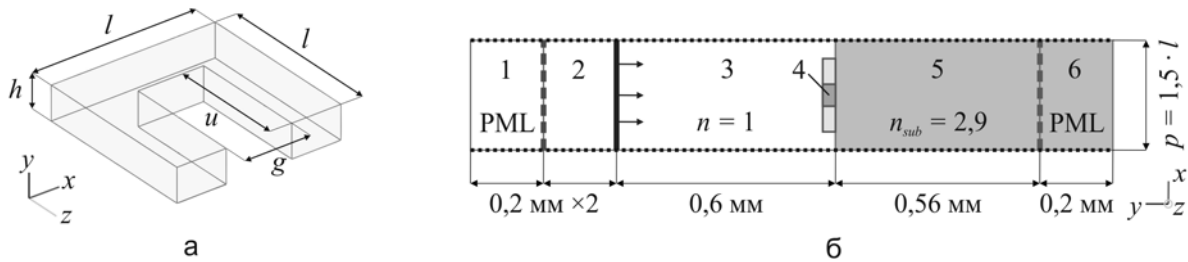


Рис. 3. Геометрия резонатора: l – сторона резонатора; h – высота; u – глубина зазора; g – ширина зазора (а). Вид области моделирования в плоскости xy : 1 – верхний поглощающий слой (PML); 2, 3 – области свободного пространства; 4 – резонатор; 5 – подложка; 6 – нижний поглощающий слой (PML) (б)

Плоская волна падает по нормали к поверхности резонатора (источник отмечен сплошной линией со стрелками на рис. 3, б), причем электрическая компонента поля поляризована перпендикулярно емкостному зазору резонатора (вдоль оси x). Интегрирование отраженной и прошедшей мощности производится по границам между областями 1/2 и 5/6 (пунктирные линии на рис. 3, б). Спектры коэффициентов прохождения и отражения метапленок рассчитывались в диапазоне длин волн 0,3–3 мм. Шаг по длинам волн составлял 30 мкм, соответственно каждый рассчитанный спектр состоял из 91 отсчета.

Результаты расчета приведены на рис. 4. Можно выделить две резонансные моды. Первая мода резонансов, LC-мода, соответствует круговому движению зарядов в плоскости резонатора, эффективно представляющему собой виток индуктивности с емкостным зазором. На рис. 4 эта низкодобротная мода наблюдается в диапазоне длин волн 0,6–3,0 мм и характеризуется резонансным увеличением коэффициента отражения и резонансным падением коэффициента прохождения. Вторая, коротковолновая, высокодобротная мода располагается в диапазоне 0,3–1,8 мм. Такие резонансы представляют собой согласованные локализованные колебания зарядов вдоль оснований резонаторов (далее – плазмонные резонансы). Для получения плазмонных резонансов на длине стороны резонатора, с учетом влияния подложки, должно укладываться целое число полуволн. В этом случае отклик П-образных резонаторов аналогичен отклику полуволновых антенн.

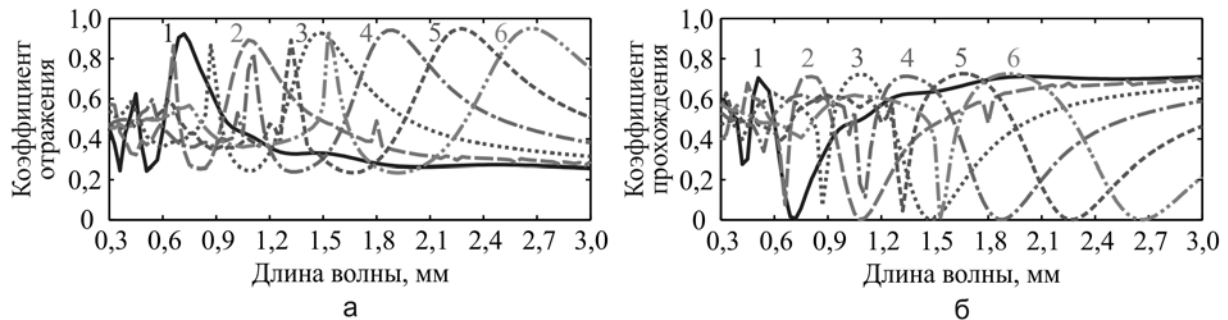


Рис. 4. Спектры коэффициентов отражения (а) и прохождения (б). Числами обозначены спектры метапленок, состоящие из П-образных резонаторов с различной длиной основания l : 1 – 100 мкм; 2 – 150 мкм; 3 – 200 мкм; 4 – 250 мкм; 5 – 300 мкм; 6 – 350 мкм

Зависимости резонансных длин волн и добротностей от длины П-образного резонатора представлены на рис. 5. Видно, что значения резонансных длин волн для обеих мод линейно зависят от длины стороны резонатора (рис. 5, а). Поскольку окружающая резонатор среда практически не имеет дисперсии, то при пропорциональном изменении геометрических параметров метапленки потери на излучение остаются неизменными, как следствие, не изменяется и добротность (рис. 5, б). Сильный разброс в добротностях плазмонных резонансов по сравнению с LC-резонансами связан с большими погрешностями моделирования на коротких длинах волн.

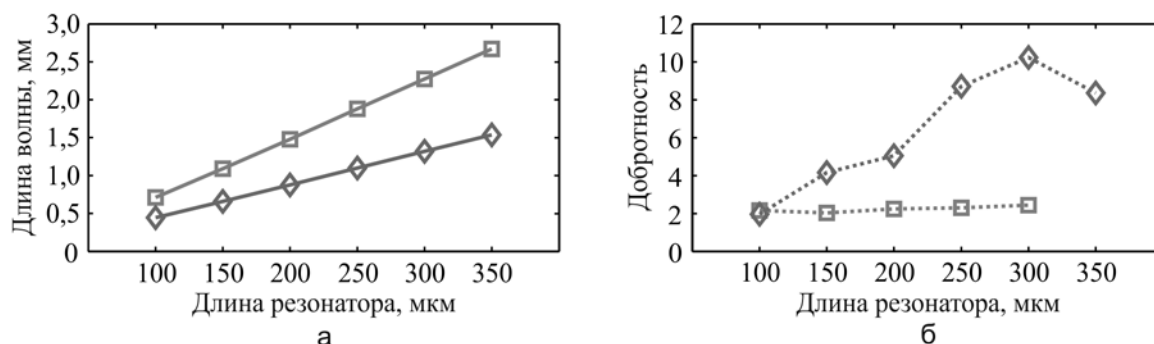


Рис. 5. Зависимость длины волны резонанса отражения (а) и его добротности (б) от длины резонатора. Квадратами отмечены значения для LC-резонансов, ромбами – для плазмонных резонансов

Эксперимент

По результатам расчета был изготовлен экспериментальный образец метапленки с 9 областями (рис. 6) с различными параметрами медных П-образных резонаторов (таблица), так чтобы каждая область имела свою LC-резонансную частоту. Метапленка представляет собой рисунок из П-образных резонаторов, выгравированных с точностью 5 мкм в слое меди на ситалле марки СТ-50-1. Медный слой толщиной 15 мкм наносился на ситалл методом ионно-вакуумного напыления. Для лучшей адгезии меди на ситалл предварительно напылялся слой хрома толщиной 10 нм.

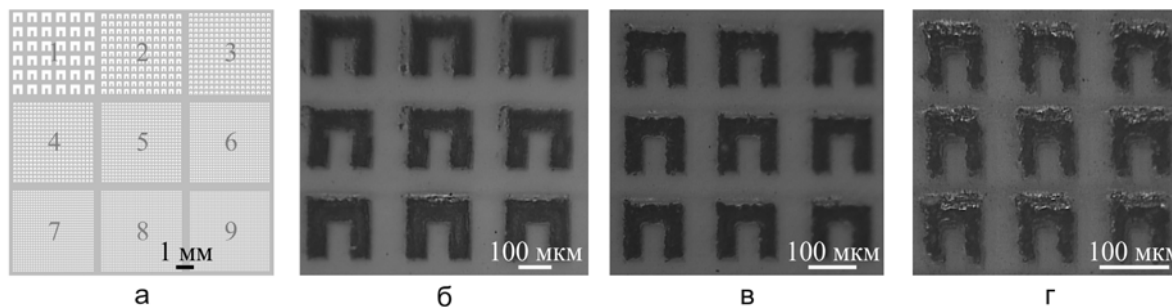


Рис. 6. Шаблон для изготовления экспериментального образца (а), цифрами отмечены номера областей. Фотографии резонаторов в областях № 3 (б), № 5 (в) и № 9 (г) изготовленного образца

Номер	l , мкм	u , мкм	p , мкм
1	542	325	813
2	282	169	423
3	195	117	293
4	152	91	228
5	126	76	189
6	108	65	162
7	96	58	144
8	87	52	131
9	79	47	119

Таблица. Параметры областей экспериментального образца

Размеры резонаторов для различных частот были определены с помощью зависимости на рис. 5. ТГц излучение по очереди фокусировалось в каждую из 9 областей размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Спектры прохождения и отражения для каждой из 9 областей метапленки были получены на ТГц фотометре ($P_{cp} = 48 \pm 4 \text{ мкВт}$; $\tau_{имп} = 3 \text{ пс}$; $\nu = 0,1-1,0 \text{ ТГц}$) [8] и рефлектометре ($P_{cp} = 30 \pm 3 \text{ мкВт}$; $\tau_{имп} = 3 \text{ пс}$; $\nu = 0,1-1,0 \text{ ТГц}$) [9] и представлены на рис. 7 в сравнении с рассчитанными спектрами. Как видно из рис. 7, в эксперименте наблюдается смещение частоты LC-резонанса в высокочастотную область при уменьшении геометрических размеров П-образного резонатора (механической перестройки сфокусированного ТГц излучения из одной области в другую) и хорошо согласуется с численным моделированием. Кроме того, следует отметить наличие дополнительных периодически расположенных резонансных особенностей, которые есть не что иное, как резонансы Фабри–Перо в толщине ситалловой подложки.

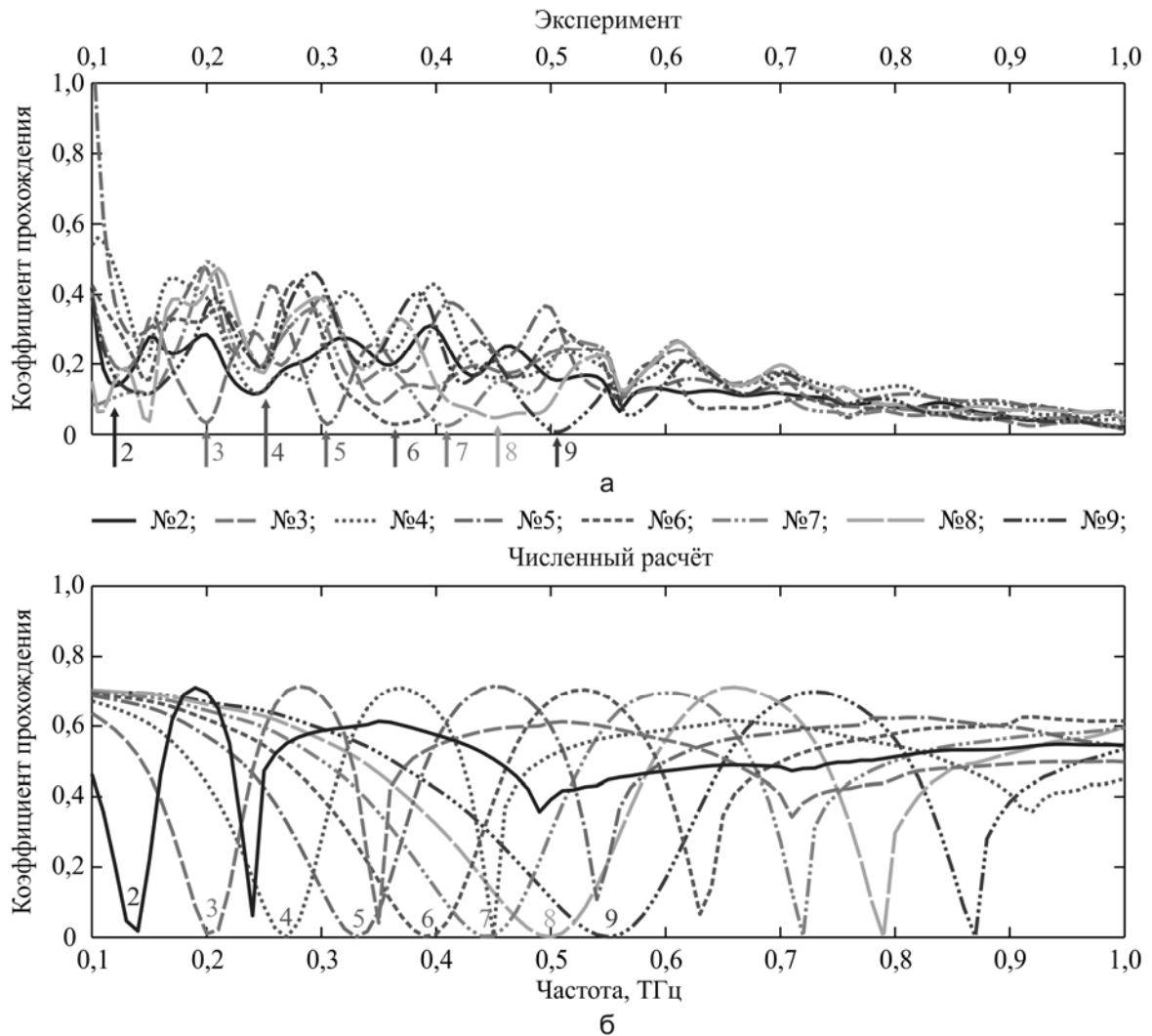


Рис. 7. Экспериментальные (а) и рассчитанные численно (б) спектры коэффициентов прохождения метапленок на ситалловой подложке. Числами обозначены кривые для резонаторов с различными геометрическими параметрами (сторона / глубина зазора / период решетки, мкм): 2 – 282/169/423 мкм; 3 – 195/117/293 мкм; 4 – 152/91/228 мкм; 5 – 126/76/189 мкм; 6 – 108/65/162 мкм; 7 – 96/58/144 мкм; 8 – 87/52/131 мкм; 9 – 79/47/119 мкм. Стрелками на экспериментальных графиках отмечены LC-резонансы

Заключение

В численных расчетах показана возможность перестройки частоты LC-резонанса как с помощью пропорционального изменения размеров резонатора, так и с помощью только изменения глубины зазора резонатора при постоянстве остальных геометрических параметров. Получены экспериментальные спектры прохождения метапленки с 9 областями, в которых перестройка частоты LC-резонанса с 0,12 ТГц до 0,51 ТГц осуществляется пропорциональным изменением размеров резонаторов. Продemonстрировано хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента.

Работа выполнена в соответствии с программой Министерства образования и науки РФ «Поддержка развития внутрироссийской мобильности научных и научно-педагогических кадров путем выполнения научных исследований молодыми учеными и преподавателями в научно-образовательных центрах» (ГК № 14.В37.21.0248) и программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 14.132.21.1421). Выражаем благодарность Я.В. Грачеву за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Кившарь Ю.С., Орлов А.А. Перестраиваемые и нелинейные метаматериалы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 1–10.
2. Pendry J.B., Holden A.J. et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – V. 47. – P. 2075–2084.

3. Smith D.R., Padilla W.J. et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – P. 4184–4187.
4. Возианова А.В., Ходзицкий М.К. Маскирующее покрытие на основе спиральных резонаторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 28–34.
5. Tao H., Padilla W.J., Zhang X., Averitt R.D. Recent Progress in Electromagnetic Metamaterial Devices for Terahertz Applications // IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics. – 2011. – V. 17. – № 1. – P. 92–101.
6. Klein M.W., Enkrich C., Wegener M. et al. Single-slit split-ring resonators at optical frequencies: limits of size scaling // Optics Letters. – 2006. – V. 31. – № 9. – P. 1259–1261.
7. Белокопытов Г.В., Журавлев А.В., Терехов Ю.Е. Размерная зависимость поляризуемости металлических частиц // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2012. – № 3. – С. 17–24.
8. Грачев Я.В., Куклин И.А., Смолянская О.А., Козлов С.А., Беспалов В.Г. и др. Исследование воздействия излучения 0,05–2 ТГц на биоткани разной толщины в медицинской диагностике // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 11. – С. 92–94.
9. Bepalov V.G., Gorodetsky A.A. et al. Influence of THz broadband pulse radiation on some biotissues // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7547. – P. 754707-1.
10. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ, Наука. – 2004. – 656 с.
11. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics. – NY: Springer, 2010. – 246 p.
12. Zeman E.J., Schatz G.C. An Accurate Electromagnetic Theory Study of Surface Enhancement Factors for Ag, Au, Cu, Li, Na, Al, Ga, In, Zn, and Cd // J. Phys. Chem. – 1987. – V. 91. – P. 634–643.

- | | |
|--|--|
| <i>Терехов Юрий Евгеньевич</i> | – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, аспирант, yury.terekhov@phys.msu.ru |
| <i>Ходзицкий Михаил Константинович</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, khodzitskiy@yandex.ru |
| <i>Белокопытов Геннадий Васильевич</i> | – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кандидат физ.-мат. наук, доцент, gvb@phys.msu.ru |