

УДК 537.8

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ¹

А.В. Щелокова^а, П.В. Капитанова^а, П.А. Белов^а

^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, alena.schelokova@phoi.ifmo.ru

Представлены исследования авторов статьи в области гиперболических метаматериалов. Гиперболические метаматериалы описываются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей, главные компоненты которых имеют разные знаки. В связи с этим такие метаматериалы имеют гиперболические изочастотные поверхности в пространстве волновых векторов, что приводит к ряду необычных свойств, таких как проявление волнами на границе отрицательного преломления, расхождение плотности фотонных состояний, сверхвысокая скорость спонтанного излучения и увеличение субволновых полей. Набор таких уникальных свойств делает концепцию гиперболических метаматериалов перспективной для исследования в современной науке и объясняет попытки многих научных групп по всему миру реализовать структуры с гиперболическим изочастотным контуром для различных частотных диапазонов. Нами показано, что на сегодняшний день гиперболические метаматериалы могут быть реализованы в виде слоистых металлodieлектрических структур, массивов нанопроводов, слоями графена, а также искусственными длинными линиями. Авторами статьи рассмотрены возможные практические применения гиперболических метаматериалов, в число которых входят гиперлинзы, способные увеличивать объекты наномасштаба; среды из проводов, которые применяются в спектроскопии для улучшения разрешения и увеличения расстояния до сканируемого объекта. Следует отметить, что гиперболические метаматериалы являются необычайно перспективными для применения в нанофотонике, в том числе для однофотонной генерации, зондирования и фотовольтаики.

Ключевые слова: метаматериал, гиперболический метаматериал, гиперболический изочастотный контур.

IMPLEMENTATIONS AND PRACTICAL APPLICATIONS OF HYPERBOLIC METAMATERIALS¹

A.V. Shchelokova^а, P.V. Kapitanova^а, P.A. Belov^а

^а Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, alena.schelokova@phoi.ifmo.ru

The paper presents a review on hyperbolic metamaterials which are normally described by the permittivity and permeability tensors with the components of the opposite sign. Therefore, the hyperbolic metamaterials have the hyperbolic isofrequency surfaces in the wave vector space. It leads to a number of unusual properties, such as the negative refraction, the diverging density of photonic states, ultra-high rate of spontaneous emission and increasing of subwavelength fields. The presence of the unique properties mentioned above makes the concept of hyperbolic metamaterials promising for research in modern science and explains the attempts of research groups around the world to realize structures with hyperbolic isofrequency curve suitable for applications in different frequency ranges. Hyperbolic metamaterials realized as layered metal-dielectric structures, arrays of nanowires, graphene layers, as well as artificial transmission lines are considered in the paper. Possible practical applications of hyperbolic metamaterials are described including hyperlens able to increase the nanoscale objects; wire mediums applied for spectroscopy to improve the resolution and increasing the distance to the object being scanned. Hyperbolic metamaterials are noted to be extremely promising for applications in nanophotonics, including single-photon generation, sensing and photovoltaics.

Keywords: metamaterial, hyperbolic metamaterial, hyperbolic isofrequency surface.

Введение

Метаматериалами называют искусственно созданные материалы, которые обладают уникальными электромагнитными свойствами, не наблюдаемыми в природе. Разработка таких материалов позволяет получать уникальные электромагнитные свойства, например, отрицательное преломление [1], обратные эффекты Доплера и Вавилова–Черенкова [2], искусственный магнетизм в оптике [3] и пр. Метаматериалы получили широкое применение в устройствах для передачи изображений с субволновым разрешением [4]; в создании покрытий, обеспечивающих невидимость [5]; в медицине [6]; в оптических наноантеннах [7, 8]; в создании материалов с огромной нелинейностью [9].

Одной из разновидностей метаматериалов являются гиперболические метаматериалы (hyperbolic metamaterials). Они представляют собой структуры, в которых поперечная и продольная составляющие тензора диэлектрической и (или) магнитной проницаемостей имеют противоположные знаки. По сравнению с обычной изотропной средой, в которой изочастотная поверхность в пространстве волновых векто-

¹ Работа поддержана Правительством Российской Федерации (проект № 11.G34.31.0020), Министерством образования и науки Российской Федерации (субсидия 074-U01), Фондом Династия, Фондом РФФИ, грантом и стипендией Президента Российской Федерации.

The work is supported by the Government of the Russian Federation (project № 11.G34.31.0020), the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 074-U01), Dynasty Foundation, the Russian Foundation for Basic Research and by grant and scholarship of the President of the Russian Federation.

ров (k_x, k_y, k_z) имеет форму сферы, в гиперболической среде изочастотная поверхность принимает форму гиперboloида. Такие структуры обладают рядом интересных свойств: огромным усилением спонтанного излучения [10], расходящейся плотностью состояний [10, 11], особыми свойствами отрицательного преломления [12, 13], увеличением субволновых объектов [14] и др. В связи с этим изучение гиперболических метаматериалов – это одно из новых и актуальных направлений в современной науке.

Задача настоящей работы – ознакомить читателя с концепцией гиперболических метаматериалов. В работе рассмотрена физика возникновения гиперболического режима в метаматериалах, их уникальные свойства, показаны пути практической реализации гиперболических метаматериалов в радиочастотном, инфракрасном (ИК) и оптическом диапазонах частот. Авторы обобщают результаты своих теоретических и экспериментальных исследований по данной тематике и результаты, полученные в других ведущих международных научно-исследовательских группах. Выявлены тенденции дальнейшего развития гиперболических метаматериалов для применения в различных областях науки и техники.

Определение гиперболического метаматериала

В 2003 году D. Smith и D. Schuring в своей работе [15] приводят классификацию анизотропных сред, реализованных с помощью кольцевых резонаторов и медных проводов (рис. 1). Показано, что в зависимости от строения материала можно получать отрицательное и положительное преломление как для TE-, так и для ТМ-поляризаций.

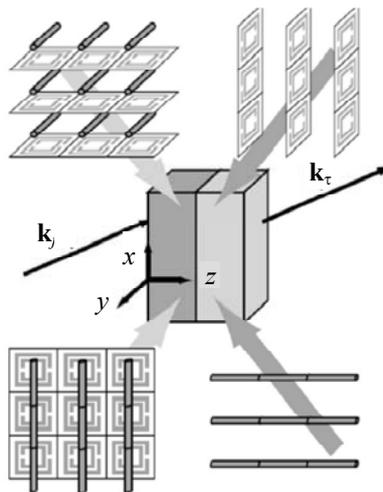


Рис. 1. Классификация материалов в зависимости от их строения. Структуры в верхней части картинки реализуют среды с TE-поляризацией. Верхняя левая структура обеспечивает отрицательное преломление, правая – положительное. Структуры в нижней части рисунка реализуют среды с ТМ-поляризацией: нижняя левая – для отрицательного преломления, правая – для положительного преломления [15]

Также в работе [15] авторы используют новый термин «неопределенные материалы» (indefinite materials) применительно к анизотропным средам. Известно, что любой материал можно охарактеризовать тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей. В зависимости от знаков компонент этих тензоров авторы делят неопределенные материалы на четыре класса: с отсечкой по частоте (cutoff); с обратной отсечкой (anti-cutoff); без отсечки (never cutoff); всегда с отсечкой (always cutoff).

На рис. 2 изображены материальные параметры и дисперсионные кривые для каждого типа неопределенной среды. Каждая из выделенных сред имеет два подтипа: положительное преломление (синий цвет) и отрицательное преломление (красный цвет). Исключения составляют среды «всегда с отсечкой», в которых не происходит ни распространения, ни преломления. Изображенные на диаграмме дисперсионные кривые отражают соотношения между составляющими волнового вектора (k_x и k_z) на фиксированной частоте. Составляющая k_x , отложенная по горизонтальной оси, принимает всегда вещественные значения, а k_z , отложенная по вертикальной оси, может принимать как вещественные (сплошная линия на графике), так и мнимые значения (пунктирная линия). Из вышеизложенной классификации можно заключить, что неопределенные материалы подразделяются на среды с изочастотным контуром в форме круга (среды с отсечкой) и с изочастотным контуром гиперболического вида (среды с обратной отсечкой и без отсечки). Последние два типа в связи с формой их дисперсионных кривых принято называть гиперболическими средами.

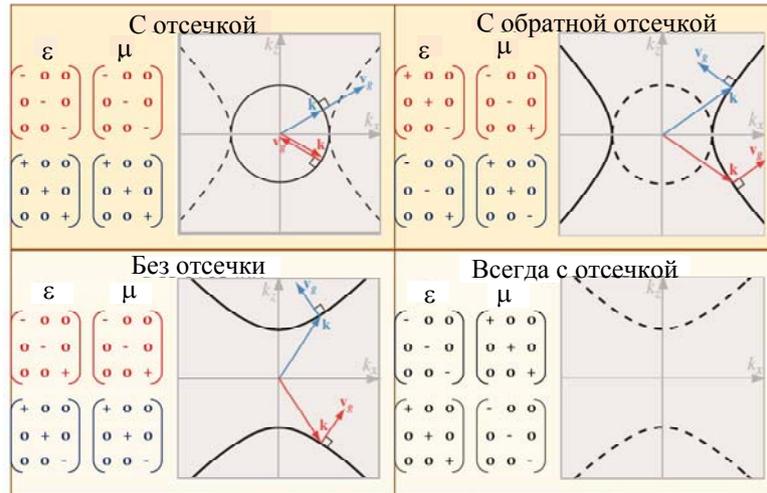


Рис. 2. Классификация неопределенных материалов [15]

В простейшем случае [13, 16] основные компоненты либо электрического ϵ , либо магнитного μ тензора имеют противоположные знаки (1):

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix}, \mu = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

т.е. $\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel} < 0$, $\mu_{\perp}\mu_{\parallel} > 0$ – электрический гиперболический метаматериал или $\mu_{\perp}\mu_{\parallel} < 0$, $\epsilon_{\perp} = \epsilon_{\parallel} > 0$ – магнитный гиперболический метаматериал. При этом изочастотная поверхность, образованная волновыми векторами \mathbf{k} необыкновенных волн на заданной частоте ω , может иметь форму разомкнутого или соединенного гиперboloида (рис. 3) соответственно для $(+ + -)$ и $(- - +)$ знаков продольной и поперечной составляющих тензора.

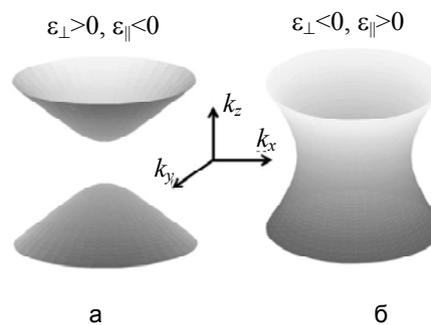


Рис. 3. Изочастотные дисперсионные поверхности $\omega(\mathbf{k})=\text{const}$ для двух типов гиперболического метаматериала: $\epsilon_{zz} = \epsilon_{\parallel} < 0$, $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{\perp} > 0$ (а); $\epsilon_{\parallel} > 0$, $\epsilon_{\perp} < 0$ (б)

Существующие реализации

Для создания гиперболического метаматериала необходим материал либо с электрическим, либо с магнитным откликом (реализовать который гораздо сложнее). Известно, что в металлах вещественная часть диэлектрической проницаемости отрицательна и является изотропной на частотах ниже плазменной частоты благодаря поляризационному отклику свободно движущихся электронов в направлении, обратном вектору напряженности электрического поля [17]. Для создания гиперболического режима в электрическом тензоре требуется получить отрицательные значения компонент только в одном или двух пространственных направлениях. Эта задача может быть достигнута, если разрешить свободным электронам перемещаться только по этим двум направлениям. Таким образом, самыми распространенными реализациями гиперболических метаматериалов являются слоистые металлодиэлектрические структуры и массивы металлических проводов [18–20], но, безусловно, существуют и другие реализации (рис. 4).

В многослойной металлодиэлектрической структуре эффективные диэлектрические проницаемости можно вычислить, пользуясь выражениями (2) [21]:

$$\epsilon_{\perp} = \frac{\epsilon_M d_M + \epsilon_D d_D}{d_M + d_D}, \frac{1}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{d_M/\epsilon_M + d_D/\epsilon_D}{d_M + d_D}, \quad (2)$$

где ϵ_m и ϵ_d – диэлектрические проницаемости соответственно металлических и диэлектрических слоев; d_m и d_d – толщины слоев. Меняя эти параметры структуры, можно получить гиперболический режим, где $\epsilon_{\perp}\epsilon_{\parallel} < 0$.

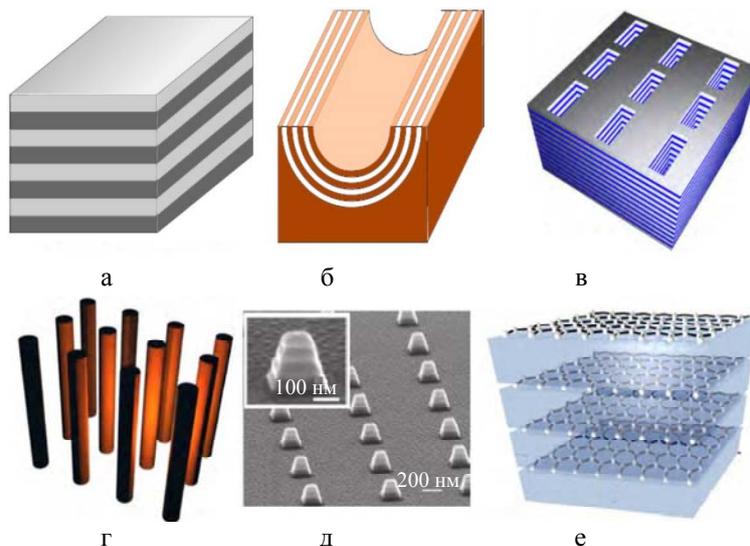


Рис. 4. Примеры реализаций гиперболических метаматериалов: слоистая металлодиэлектрическая структура (а); гиперлинзы (б); многослойная структура «рыболовная сеть» (fishnet) (в); массив нанопроводов (г); решетка гиперболических резонаторов, сделанных из слоистых металлодиэлектрических столбиков в наномасштабе (д); многослойная структура на основе графена (е) [17]

Первая экспериментальная реализация слоистого гиперболического метаматериала [18] представляет собой структуру, работающую в среднем ИК диапазоне длин волн и состоящую из чередующихся слоев легированного InGaAs и AlInAs. На сегодняшний момент известно множество реализаций гиперболических сред на основе слоистых металлодиэлектрических структур с использованием таких материалов, как Ag/Al₂O₃, Ag/PMMA, Ag/LiF, Si/Ge, Au/Al₂O₃ [14, 19, 22, 23] и др. Аналогом гиперболического метаматериала также служит трехслойная структура SiO₂/SiC/SiO₂ [24].

Другой распространенной реализацией гиперболических метаматериалов являются массивы параллельных друг другу металлических проводов [20] (рис. 4, г). В самом простом случае, для тонких проводов, находящихся в вакууме, компоненты электрического тензора имеют следующий вид [20]:

$$\epsilon_{\perp} = 1, \quad \epsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\Omega^2},$$

где Ω_p – эффективная плазменная частота. На частотах ниже Ω_p среда из проводов становится гиперболическим метаматериалом с $\epsilon_{\parallel} < 0$.

На практике создание среды из нанопроводов возможно при помощи стандартной техники электрохимического осаждения металла (золота или серебра) внутри пористой алюминиевой мембраны [25], при этом размеры создаваемых образцов достигают 1 см×1 см×50 мкм. Гиперболические свойства таких структур впервые были продемонстрированы на основе изучения отрицательного преломления на длине волны $\lambda = 780$ нм [26].

Кроме слоистых структур и нанопроводов, следует обратить внимание и на другие реализации гиперболических метаматериалов. Так, первая экспериментальная демонстрация гиперболического изочастотного контура была сделана в намагниченной плазме в микроволновом диапазоне частот [27–29]. В этом случае электроны двигаются только параллельно постоянному магнитному полю, и структура превращается в аналог среды из проводов. Известны гибридные структуры, представляющие собой решетку слоистых металлодиэлектрических нанопирамид (рис. 4, д) [22, 30]. Каждая такая пирамидка представляет собой резонатор (с размером порядка 100 нм), вся структура в целом образует гиперболический метаматериал. Структура работает в ИК диапазоне длин волн $\lambda \sim 2$ мкм. Экспериментально было продемонстрировано, что наблюдается необычное правило скейлинга для работы резонатора: моды высшего порядка могут обладать более низкой резонансной частотой [22].

Все реализации, представленные выше, подходят только для создания электрического гиперболического метаматериала. Реализовать же магнитный гиперболический метаматериал с $\mu_{\perp}\mu_{\parallel} < 0$ можно с помощью многослойной структуры «рыболовная сеть» (рис. 4, в) [1, 31]. Было продемонстрировано, что для случая магнитной гиперболической дисперсии, в сравнении с электрической, структура не будет обладать неколокальным откликом и в связи с этим будет вести себя как однородная среда, дисперсия которой полностью описывается тензорами ϵ и μ .

В радиочастотном диапазоне длин волн гиперболический метаматериал может быть выполнен в виде периодических структур на основе сосредоточенных емкостных и индуктивных элементов (рис. 5) [32–34]. Аналитически и экспериментально было показано, что пространственные распределения напряжения и магнитного поля имеют явно выраженную «крестообразную» форму, при этом в одном направлении происходит перенос энергии сигнала, а в другом направлении сигнал быстро затухает.

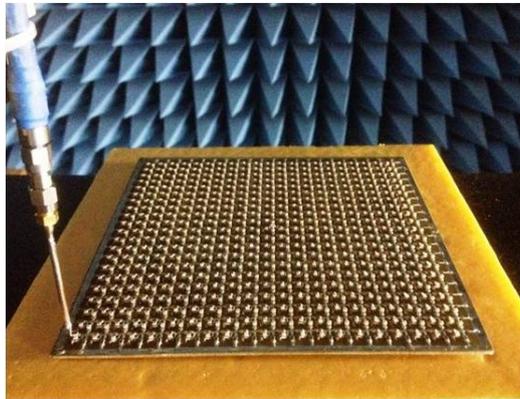


Рис. 5. Экспериментальный макет гиперболической среды [34]

Уникальные свойства и применения

Отрицательное преломление – один из первых эффектов, который был изучен для гиперболических метаматериалов [4, 12, 13, 35, 36]. Для объяснения данного феномена представим себе границу раздела немагнитной гиперболической среды и вакуума. Положим, что компонента диэлектрической проницаемости, перпендикулярная к границе раздела, имеет отрицательное значение, а две другие компоненты пусть будут положительными. Теперь рассмотрим ТМ-поляризованную плоскую волну, падающую на границу раздела двух сред с волновым вектором β , при этом электрическое поле и волновой вектор лежат в плоскости (x, z) , в то время как граница раздела находится в плоскости (x, y) .

Для определения характера преломления пучка (положительным оно будет или отрицательным) проверим, какой знак будет иметь тангенциальная компонента усредненного значения вектора Пойнтинга для проходящих волн:

$$S_x^t = \frac{c}{2\pi} \operatorname{Re}[-E_z^t H_y^{t*}], \quad (3)$$

где E_z^t и H_y^t – соответственно компоненты электрического и магнитного полей прошедшей волны, c – скорость света [17]. Далее, используя уравнение Максвелла $\frac{\partial H_y}{\partial x} = -i\left(\frac{\omega}{c}\right)\epsilon_{zz}E_z$, выразим электрическое поле через магнитное и подставим в (3):

$$S_x^t = \frac{\omega\epsilon_{zz}}{2\pi\beta} |H_y|^2 < 0,$$

откуда следует, что $\epsilon_{zz} < 0$. Таким образом, в данном случае падающий пучок будет испытывать отрицательное преломление (рис. 6).

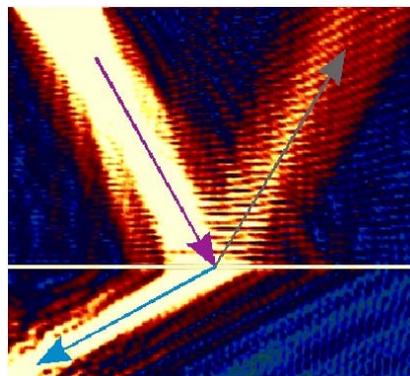


Рис. 6. Отрицательное преломление на границе раздела гиперболического метаматериала (слоистой металлдиэлектрической структуры) и воздуха [37]

Уникальным оптическим свойством гиперболической среды является картина излучения точечного дипольного источника, помещенного в такую среду, так называемая функция Грина. Тензор функции Грина $\mathbf{G}(\mathbf{r})$ можно найти из соотношения (4) [38]:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{G}(\mathbf{r}) - q^2 \epsilon \mathbf{G}(\mathbf{r}) = 4\pi q^2 \mathbf{I} \delta(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор и $q = \omega/c$.

Пусть диполь ориентирован вдоль оси z . На рис. 7, а, показано электрическое поле такого диполя, рассчитанное для $\epsilon_{\parallel} = -3$ и $\epsilon_{\perp} = 1$, а на рис. 7, б, – для $\epsilon_{\parallel} = 3$ и $\epsilon_{\perp} = -1$ [38]. Видно, что в гиперболическом метаматериале волны распространяются внутри некоторого конуса и затухают за его границами. Такая коническая форма картины излучения является аналогом реального пространства изочастотных конусов в пространстве волновых векторов.

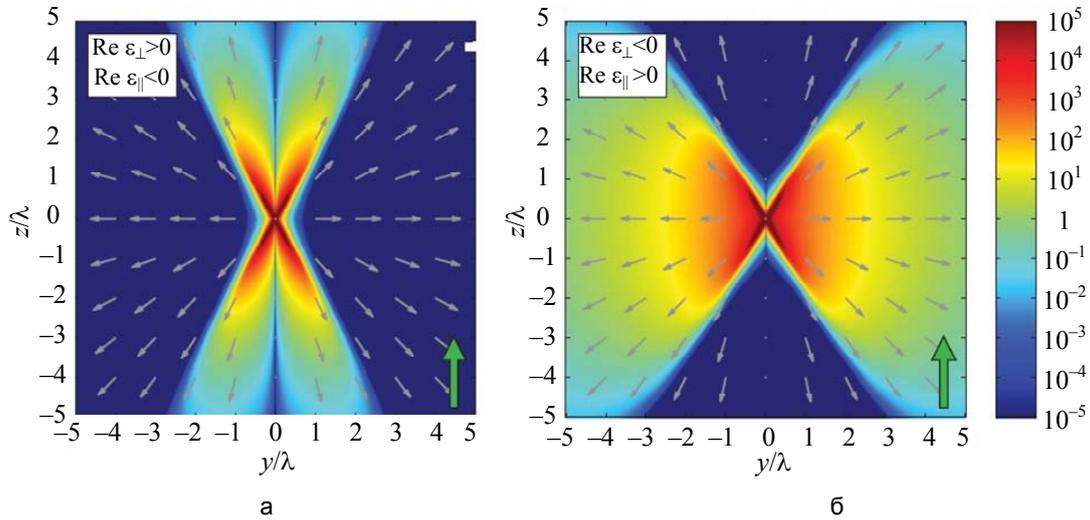


Рис. 7. Амплитуда электрического поля от дипольного источника, ориентированного вдоль оси симметрии в гиперболическом метаматериале [38]

В работе [34] представлена визуализация функции Грина – картина распределения магнитного поля в структуре (рис. 8).

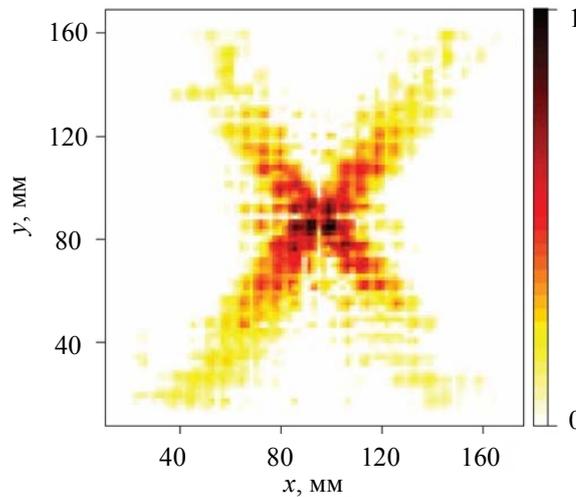


Рис. 8. Визуализация функции Грина [34]. Видно, что распределение магнитного поля в структуре имеет ярко выраженную крестообразную форму

Среды с гиперболическим изочастотным контуром обладают еще одним интересным свойством – эффектом Парселла [39]. Эффект Парселла – это усиление спонтанного затухания источника в резонаторе по сравнению с вакуумом. Максимальный фактор Парселла составляет порядка $(\lambda/a)^3$, где λ – длина волны излучения, a – характерный размер источника. Данный эффект продемонстрирован на рис. 9 для гиперболического метаматериала в сравнении с вакуумом.

Пожалуй, самым интересным применением гиперболических метаматериалов являются гиперлинзы – устройства, позволяющие преобразовывать ближнее поле объекта (излучаемое или рассеиваемое) в изображение в дальнем поле, которое может быть обработано обычными оптическими приборами. Самое лучшее на сегодняшний день субволновое разрешение в 130 нм было экспериментально продемонстрировано в работе [14]. Кроме того, гиперболические метаматериалы применяют при изготовлении волно-

водов [41–44], обладающих рядом уникальных свойств, таких как отсутствие основной моды, сосуществование прямых и обратных мод и существование поверхностных мод.

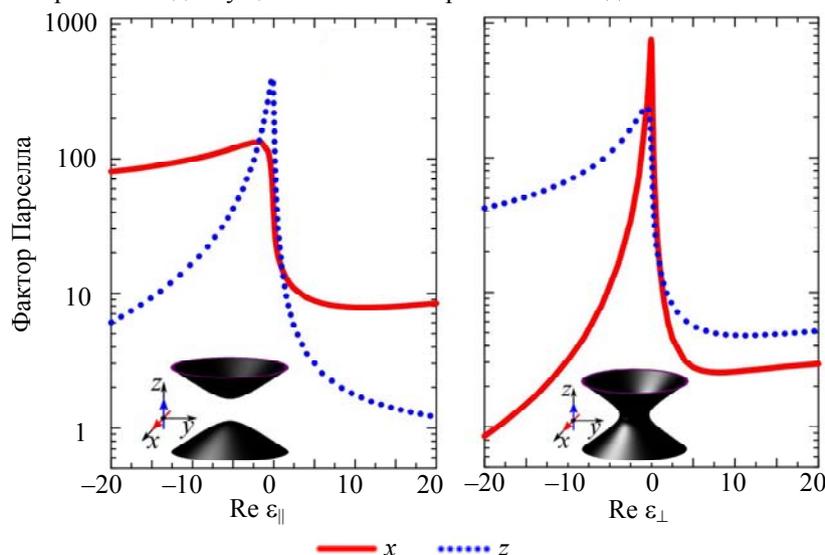


Рис. 9. Фактор Парселла в гиперболическом метаматериале относительно вакуума как функция от $\epsilon_{||}$ и ϵ_{\perp} [40]. Сплошной и пунктирной линией обозначены ориентации диполя вдоль осей x и z соответственно

Заключение

Гиперболические метаматериалы – новое, но активно развивающееся направление в современной науке. На сегодняшний день были предложены практические реализации таких сред в виде слоистых металлодиэлектрических структур или сред из проводов. Обзор теоретических и экспериментальных исследований, представленный в данной работе, подтверждает наличие в гиперболических метаматериалах таких уникальных свойств, как проявление волнами на границе отрицательного преломления, расхождение плотности фотонных состояний, сверхвысокая скорость спонтанного излучения и увеличение субволновых полей. Показан вклад авторов настоящей работы в исследование основных свойств и практическое применение гиперболических метаматериалов. В их числе – гиперлинзы на основе слоистых металлодиэлектрических структур, которые вытягивают субволновое поле и расширяют его в пространстве так, чтобы оно становилось видимо глазом или через обычный микроскоп, т.е. становится возможным наблюдать объекты наномасштаба. Гиперболические структуры на основе слоев графена демонстрируют огромное значение фактора Парселла и могут быть использованы для увеличения терагерцового излучения в полупроводниковых устройствах. Продемонстрировано отрицательное преломление волн на границе с гиперболическим метаматериалом, представлена визуализация функции Грина. Кроме того, авторами предложен и реализован магнитный гиперболический метаматериал в радиочастотном диапазоне на основе искусственных длинных линий. Таким образом, простая по своей природе концепция гиперболических метаматериалов может обеспечить значительное улучшение функциональности различных систем.

Reference

1. Valentine J., Zhang S., Zentgraf T., Ulin-Avila E., Genov D.A., Bartal G., Zhang X. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*, 2008, vol. 455, pp. 376–379. doi: 10.1038/nature07247
2. Veselago V.G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.*, 1968, vol. 10, pp. 509–514.
3. Linden S., Enkrich C., Wegener M., Zhou J., Koschny T., Soukoulis C.M. Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz. *Science*, 2004, vol. 306, pp. 1351–1353. doi: 10.1126/science.1105371
4. Belov P.A., Hao Y., Sudhakaran S. Subwavelength microwave imaging using an array of parallel conducting wires as a lens. *Physical Review B*, 2006, vol. 73, art. no. 0331081. doi: 10.1103/PhysRevB.73.033108
5. Schurig D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr A.F., Smith D.R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 2006, vol. 314, pp. 977–980. doi: 10.1126/science.1133628
6. Radu X., Garray D., Craeye C. Toward a wire medium endoscope for MRI imaging. *Metamaterials*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 90–99.
7. Filonov D.S., Krasnok A.E., Slobozhanyuk A.P., Kapitanova P.V., Nenasheva E.A., Kivshar Y.S., Belov P.A. Experimental verification of the concept of all-dielectric nanoantennas. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 20, art. no. 2011131. doi: 10.1063/1.4719209
8. Krasnok A.E., Belov P.A., Kivshar Y.S. Opticheskie dielektricheskie nanoantenny [Dielectric optical nanoantennas]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 5 (87), pp. 23–28.

9. Powell D.A., Shadrivov I.V., Kivshar Y.S. Nonlinear electric metamaterials. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, art. no. 084102. doi: 10.1063/1.3212726
10. Cortes C.L., Newman W., Molesky S., Jacob Z. Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 2012, vol. 14, art. no. 063001. doi: 10.1088/2040-8978/14/6/063001
11. Krishnamoorthy H.N.S., Jacob Z., Narimanov E., Kretzschmar I., Menon V.M. Topological transitions in metamaterials. *Science*, 2012, vol. 336, pp. 205–209. doi: 10.1126/science.1219171
12. Smith D.R., Kolinko P., Schurig D. Negative refraction in indefinite media. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2004, vol. 21, pp. 1032-1043.
13. Belov P.A. Backward waves and negative refraction in uniaxial dielectrics with negative dielectric permittivity along the anisotropy axis. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, vol. 37, pp. 259-263. doi: 10.1002/mop.10887
14. Liu Z., Lee H., Xiong Y., Sun C., Zhang X. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects. *Science*, 2007, vol. 315, p. 1686. doi: 10.1126/science.1137368
15. Smith D.R., Schurig D. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors. *Physical Review Letters*, 2003, vol. 90, no. 7, pp. 077405/1-077405/4.
16. Shum K.M., Xue Q., Chau W.N., Chan C.H. BW media – Media with negative parameters, capable of supporting backward waves. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, vol. 31, pp. 129-133. doi: 10.1002/mop.1378
17. Poddubny A., Iorsh I., Belov P., Kivshar Y. Hyperbolic metamaterials. *Nature Photonics*, 2013, vol. 7, no. 12, pp. 958-967. doi: 10.1038/nphoton.2013.243
18. Hoffman A.J., Alekseyev L., Howard S.S., Franz K.J., Wasserman D., Podolskiy V.A., Narimanov E.E., Sivco D.L., Gmachl C. Negative refraction in semiconductor metamaterials. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 946-950. doi: 10.1038/nmat2033
19. Tumkur T., Zhu G., Black P., Barnakov Yu.A., Bonner C.E., Noginov M.A. Control of spontaneous emission in a volume of functionalized hyperbolic metamaterial. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, art. no. 151115. doi: 10.1063/1.3631723
20. Belov P.A., Marques R., Maslovski S.I., Nefedov I.S., Silveirinha M., Simovski C.R., Tretyakov S.A. Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2003, vol. 67, art. no. 113103.
21. Agranovich V.M., Kravtsov V.E. Notes on crystal optics of superlattices. *Solid State Communications*, 1985, vol. 55, pp. 85-90.
22. Yang X., Yao J., Rho J., Yin X., Zhang X. Experimental realization of three-dimensional indefinite cavities at the nanoscale with anomalous scaling laws. *Nature Photonics*, 2012, vol. 6, no. 7, pp. 450-454. doi: 10.1038/nphoton.2012.124
23. Kim J., Drachev V.P., Jacob Z., Naik G.V., Boltasseva A., Narimanov E.E., Shalaev V.M. Improving the radiative decay rate for dye molecules with hyperbolic metamaterials. *Optics Express*, 2012, vol. 20, pp. 8100-8116. doi: 10.1364/OE.20.008100
24. Korobkin D., Neuner B., Fietz C., Jegenyés N., Ferro G., Shvets G. Measurements of the negative refractive index of sub-diffraction waves propagating in an indefinite permittivity medium. *Optics Express*, 2010, vol. 18, pp. 22734-22746. doi: 10.1364/OE.18.022734
25. Noginov M.A., Barnakov Yu.A., Zhu G., Tumkur T., Li H., Narimanov E.E. Bulk photonic metamaterial with hyperbolic dispersion. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, art. no. 151105. doi: 10.1063/1.3115145
26. Yao J., Liu Z., Liu Y., Wang Y., Sun C., Bartal G., Stacy A.M., Zhang X. Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires. *Science*, 2008, vol. 321, pp. 930. doi: 10.1126/science.1157566
27. Fisher R.K., Gould R.W. Resonance cones in the field pattern of short antenna in an anisotropic plasma. *Physical Review Letters*, 1969, vol. 22, pp. 1093-1095. doi: 10.1103/PhysRevLett.22.1093
28. Felsen L., Marcuvitz N. *Radiation and scattering of waves*. NY, Wiley Interscience, 2003, 464 p.
29. Seshardi S.R., Wu T.T. Radiation condition for a magnetoplasma medium. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1970, vol. 23, no. 2, pp. 285-313. doi: 10.1093/qjmam/23.2.285
30. Yao J., Yang X., Yin X., Bartal G., Zhang X. Three-dimensional nanometer-scale optical cavities of indefinite medium. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, vol. 108, no. 2, pp. 11327-11331. doi: 10.1073/pnas.1104418108
31. Kruk S.S., Powell D.A., Minovich A., Neshev D.N., Kivshar Y.S. Spatial dispersion of multilayer fishnet metamaterials. *Optics Express*, 2012, vol. 20, pp. 15100-15105. doi: 10.1364/OE.20.015100
32. Grbic A., Eleftheriades G.V. Periodic Analysis of a 2-D Negative Refractive Index Transmission Line Structure. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2003, vol 51, no. 10, pp. 2604-2611. doi: 10.1109/TAP.2003.817543
33. Grbic A., Eleftheriades G.V. An isotropic three-dimensional negative-refractive-index transmission-line metamaterial. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, no.4, art. no. 043106. doi: 10.1063/1.2007853
34. Chshelokova A.V., Kapitanova P.V., Poddubny A.N., Filonov D.S., Slobozhanyuk A.P., Kivshar Yu.S., Belov P.A. Hyperbolic transmission-line metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, no. 7, art. no. 073116. doi: 10.1063/1.4758287
35. Schilling J. Uniaxial metallo-dielectric metamaterials with scalar positive permeability. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2006, v. 74, no. 4, art. no. 046618. doi: 10.1103/PhysRevE.74.046618
36. Mackay T.G., Lakhtakia A., Depine R.A. Uniaxial dielectric media with hyperbolic dispersion relations. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, vol. 48, pp. 363-367. doi: 10.1002/mop.21350
37. Orlov A.A., Voroshilov P.M., Belov P.A., Kivshar Y.S. Engineered optical nonlocality in nanostructured metamaterials. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 2011, vol. 84, no. 4, art. no. 045424. doi: 10.1103/PhysRevB.84.045424

38. Potemkin A.S., Poddubny A.N., Belov P.A., Kivshar Y.S. Green function for hyperbolic media. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2012, vol. 86, no. 2, art. no. 023848. doi: 10.1103/PhysRevA.86.023848
39. Purcell E.M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*, 1946, vol. 69, p. 681.
40. Poddubny A.N., Belov P.A., Kivshar Y.S. Spontaneous radiation of a finite-size dipole emitter in hyperbolic media. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2011, vol. 84, no. 2, art. no. 023807. doi: 10.1103/PhysRevA.84.023807
41. Podolskiy V.A., Narimanov E.E. Strongly anisotropic waveguide as a nonmagnetic lefthanded system. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2005, vol. 71, no. 20, art. no. 201101. doi: 10.1103/PhysRevB.71.201101
42. Alekseyev L.V., Narimanov E.E. Slow light and 3D imaging with non-magnetic negative index systems. *Optics Express*, 2006, vol. 14, pp. 11184–11193. doi: 10.1364/OE.14.011184
43. Elser J., Podolskiy V.A. Scattering-free plasmonic optics with anisotropic metamaterials. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, no. 6, art. no. 066402. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.066402
44. Xu G.-D., Pan T., Zang T.-C., Sun J. Characteristics of guided waves in indefinite-medium waveguides. *Optics Communications*, 2008, vol. 281, no. 10, pp. 2819–2825. doi: 10.1016/j.optcom.2008.01.042

- Щелокова Алёна Вадимовна** – студент, инженер, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, alena.schelokova@phoi.ifmo.ru
- Капитанова Полина Вячеславовна** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, Kapitanova.poli@phoi.ifmo.ru, Kapitanova_poli@mail.ru
- Белов Павел Александрович** – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, belov@phoi.ifmo.ru
- Alena V. Shchelokova** – student, engineer, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, alena.schelokova@phoi.ifmo.ru
- Polina V. Kapitanova** – Research fellow, PhD, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, Kapitanova.poli@phoi.ifmo.ru, Kapitanova_poli@mail.ru
- Pavel A. Belov** – Chief research fellow, D.Sc., Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, belov@phoi.ifmo.ru

Принято к печати 18.02.14

Accepted 18.02.14