

# Метаматериалы и метаповерхности

УДК 537.86:620.22-022.532

**Аннотация.** Рассмотрены метаматериалы и метаповерхности, созданные на основе металлических спиралей и омега-элементов классической или прямоугольной формы, проанализированы сходство и различия между метаматериалами и кристаллами.

**Ключевые слова:** метаматериал, метаповерхность, спираль, омега-элемент, поглотитель, микроволны, терагерцовые волны.

**Для цитирования:** Семченко И., Хахомов С., Самофалов А., Балмаков А. Метаматериалы и метаповерхности // Наука и инновации. 2020. №8. С.23–27. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>

**Игорь Семченко,**

проректор по учебной работе Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, доктор физико-математических наук, профессор; isemchenko@gsu.by

**Сергей Хахомов,**

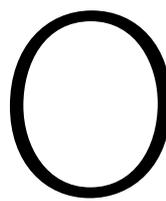
ректор Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, доктор физико-математических наук, доцент; khakh@gsu.by

**Андрей Самофалов,**

доцент кафедры общей физики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, кандидат физико-математических наук, доцент; samofalov@gsu.by

**Алексей Балмаков,**

доцент кафедры оптики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, кандидат физико-математических наук, доцент; balmakov@gsu.by



Одно из направлений развития современной оптики, радиофизики и физики твердого тела – параллельное исследование природных кристаллов и разработка с учетом их свойств новых типов искусственных сред, которые называются метаматериалами, поскольку обладают особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества. Греческое «мета» означает «вне», «за пределами», что подчеркивает непринадлежность метаматериалов к естественным объектам. Среди исключительных особенностей метаматериалов принято рассматривать: отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости, существующие одновременно, отрицательный показатель преломления, сильные киральные свойства и др. Можно исследовать метаматериалы как системы, состоящие из микрорезонаторов или «мета-атомов», обладающие желательными и управляемыми свойствами в оптическом, СВЧ и терагерцовом диапазонах. В последние несколько

лет особое внимание уделяется особо тонким метаматериалам, или метаповерхностям, в которых необходимые характеристики могут быть достигнуты при использовании только одного слоя искусственных частиц (мета-атомов), что повышает их эффективность.

Изучение метаматериалов и метаповерхностей вызывает интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и открывает широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, компактные антенны, линзы с субволновым разрешением, объекты, скрытые в определенном диапазоне частот, неотражающие поглотители, поляризаторы волн и др.

Для исследования распространения монохроматических волн в метаматериалах с учетом возможных магнитоэлектрических эффектов следует использовать уравнения связи:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} + i \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{H}, \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} - i \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa^T \vec{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – соответственно векторы индукции и напряженности электрического и магнитного полей;  
 $\epsilon_r$  и  $\mu_r$  – тензоры относительной диэлектрической и магнитной проницаемости;  
 $\kappa$  – тензор, характеризующий магнитоэлектрические, в том числе киральные, свойства среды;  
 индекс  $T$  – операция транспонирования;  
 $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;  
 $i$  – мнимая единица.

Материальные уравнения в такой форме были представлены в работах белорусских ученых [1–2] для природных кристаллов и в работах зарубежных авторов [3–5] – для би-изотропных сред. Уравнения связи в силу своей общности позволяют учесть диэлектрические, магнитные и магнитоэлектрические свойства природного кристалла или метаматериала, существующие одновременно в одном объекте. Следует отметить, что у природных кристаллов чаще проявляются либо диэлектрические свойства, либо магнитные, тогда соответствующий тензор проницаемости значительно отличается от единичного значения. Что касается магнитоэлектрических свойств, в том числе киральных, то в оптическом диапазоне частот для природных кристаллов они обычно слабые. Значения тензора  $\kappa$  пропорциональны отношению  $a/\lambda$ , где  $a$  – линейный размер моле-

кулы,  $\lambda$  – длина волны излучения. В оптике природных сред параметр  $a/\lambda$  имеет порядок  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ .

Качественно другая картина может наблюдаться в отношении метаматериалов и метаповерхностей, у которых магнитоэлектрическим параметром  $\kappa$  можно управлять, увеличивая отношение  $a/\lambda$  при их конструировании. Этот параметр может существенно возрасти, особенно в частотной области проявления резонансных свойств мета-атомов, например в условиях резонанса электрического тока вдоль проводящего элемента метаматериала. При этом резонанс может быть достигнут, если линейные размеры элемента метаматериала малы по сравнению с длиной волны излучения, а длина проводника, из которого он изготовлен, приблизительно равна половине длины волны. В этом случае магнитоэлектрические свойства метаматериала такие же значимые, как и его диэлектрические и магнитные, которые, в свою очередь, также усиливаются вследствие резонансного возрастания колебаний электрического тока в мета-атоме. В результате свойства метаматериала, который в определенном смысле подобен природным кристаллам и имитирует их строение, могут кардинально отличаться от таковых у естественных кристаллов. При специальной форме частиц метаматериала, которую принято называть сбалансированной, или оптимальной, возможно выполнение соотношения

$$\epsilon_r = \mu_r = 1 \pm \kappa. \quad (2)$$

Эта формула показывает, что метаматериал имеет одинаково значимые диэлектрические, магнитные и киральные свойства, что невозможно для природных кристаллов. Знак «плюс» выбирается, если магнитоэлектрический параметр  $\kappa$  положительный, а знак «минус» – если он отрицательный. Чтобы соотношение (2) выполнялось, необходима, как было указано, сбалансированная форма частиц метаматериала, для которых должно быть справедливым выражение для электрического дипольного момента  $\vec{p}$  и магнитного момента  $\vec{m}$

$$|\vec{p}| = \frac{|\vec{m}|}{c}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Один из возможных мета-атомов – омега-элемент, то есть проводящая частица в виде греческой буквы «омега». Под действием электромагнитной волны в каждой такой частице

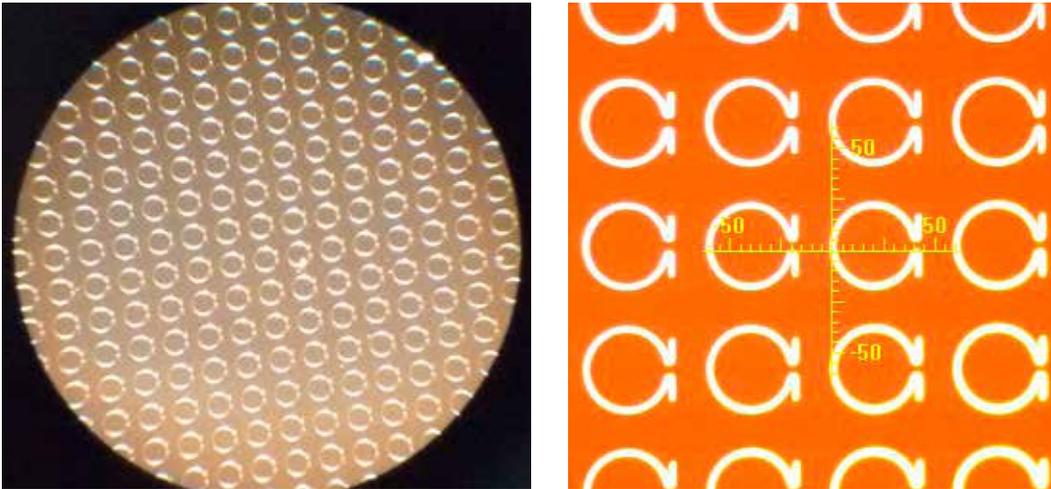


Рис. 1. Метаповерхность, образованная омега-элементами на кремниевой подложке. Метаматериал изготовлен на предприятии «ИНТЕГРАЛ»

может создаваться электрический дипольный момент, направленный вдоль плеч омега-элемента, поскольку электрические заряды сосредоточены в основном на его концах. Одновременно в каждом мета-атоме может возникать магнитный момент, ориентированный перпендикулярно плоскости омега-элемента, так как в его петле электрический ток преимущественно и существует. Кроме того, омега-частица демонстрирует магнитоэлектрические свойства, поскольку в ней возможны так называемые перекрестные эффекты: электрическое поле может создавать магнитный момент, а магнитное поле, в свою очередь, – электрический дипольный момент. В то же время омега-элемент не является киральной частицей, поскольку это плоская фигура, а термин «киральный» применяют только к трехмерным объектам. На основе омега-элементов с заранее рассчитанными параметрами реально создать метаматериал с одинаково значимыми диэлектрическими, магнитными и магнитоэлектрическими свойствами. Его можно применять для преобразования поляризации электромагнитной волны и получения отраженной циркулярно-поляризованной волны при падении линейно-поляризованной в терагерцовом диапазоне частот [6].

В качестве элементов метаматериалов могут быть использованы также омега-частицы прямоугольной формы, в этом случае можно упростить некоторые этапы изготовления образцов и расширить технологические возможности [7–8].

Перспективные элементы метаматериалов – проводящие спирали цилиндрической формы. Как и в омега-атоме, в спирали одновременно могут возникать электрический дипольный и магнитный моменты под действием электромагнитной волны, а также перекрестные, или магнитоэлектрические эффекты. Однако спираль – киральная частица, поскольку является 3D-объектом и отличается от своего зеркального изображения. Если предварительно рассчитать ее оптимальные характеристики, то на их основе можно создать метаматериалы с одинаково сильно выраженными диэлектрическими, магнитными и киральными свойствами, которые не наблюдаются у естественных кристаллов [9–10]. Поскольку расстояние между спиралями значительно меньше длины волны, то по отношению к электромагнитному полю образец следует рассматривать как массив, а не как дифракционную решетку, что характерно для метаматериалов. В качестве подложки для спиралей

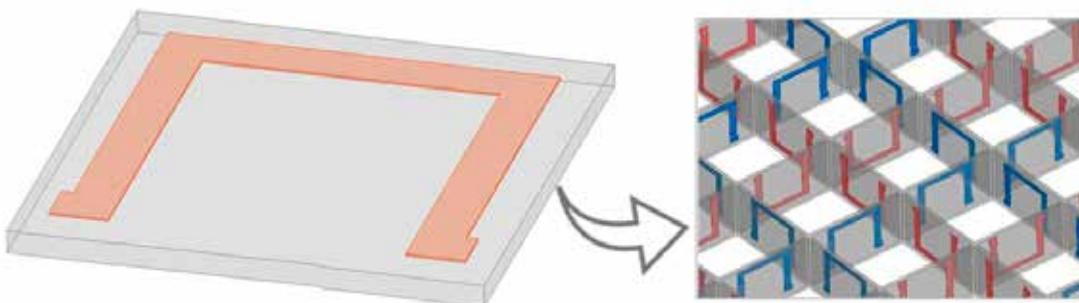
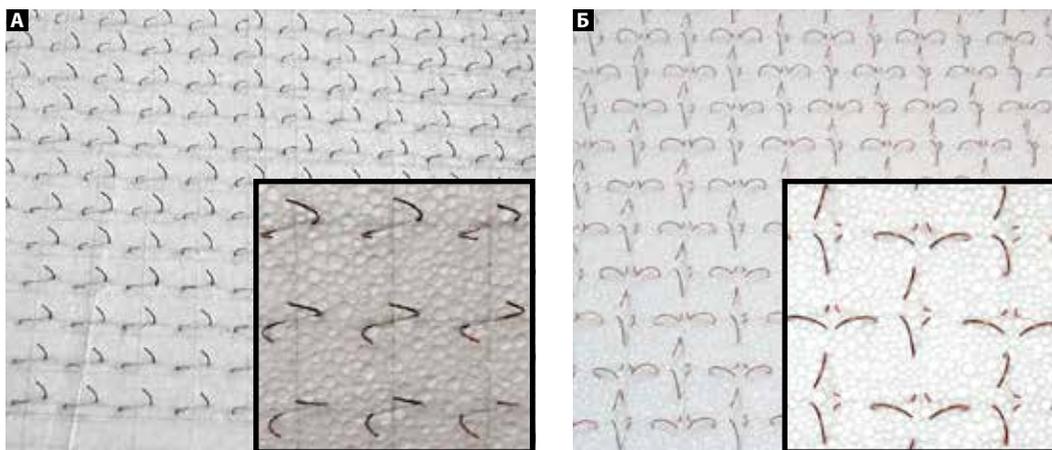


Рис. 2. Схема конструирования трехмерного образца метаматериала из плоских омега-резонаторов прямоугольной формы на подложке

Рис. 3. Экспериментальные образцы метаматериалов для СВЧ-диапазона, состоящие из спиральных элементов. А – фото образца метаматериала для преобразования поляризации СВЧ-волны при ее отражении, Б – метаматериал, поглощающий СВЧ-волны, но не отражающий их



можно использовать пенопласт, который прозрачен для СВЧ-волн и не нарушает баланс диэлектрических и магнитных свойств метаматериала.

В Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины изготовлено более 50 образцов метаматериалов и метаповерхностей для СВЧ-диапазона, содержащих от 144 до 600 одновитковых и двухвитковых спиральных элементов. Особый интерес вызывают метаматериалы, поглощающие СВЧ-волны в резонансной области частот и при этом имеющие очень малый коэффициент их отражения в очень широком частотном диапазоне [11]. Их киральные свойства скомпенсированы, поскольку в структуре имеется равное число право- и левозакрученных спиралей. Слабые отражающие качества таких метаматериалов обусловлены равенством их относительной диэлектрической и относительной магнитной проницаемостей. В результате волновой импеданс образца  $\eta$  равен импедансу свободного пространства  $\eta_0$ :

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \eta_0, \quad (4)$$

что приводит к нулевому коэффициенту отражения [12]. Чтобы подчеркнуть особые характеристики метаматериалов, отметим, что природные кристаллы обладают либо диэлектрическими, либо магнитными свойствами (например, магнитоупорядоченные кристаллы). Поэтому в оптике, согласно формулам Френеля, коэффициент отражения света определяется показателем преломления вещества, точнее, его отклонением от единичного значения, соответствующего вакууму.

Метаматериалы для СВЧ-волн часто изготавливают вручную, поскольку длина их элемен-

тов в выпрямленном состоянии приблизительно равна половине длины волны (несколько сантиметров). Эти метаматериалы – хорошая модель для более миниатюрных образцов, предназначенных для терагерцового и оптического диапазонов и требующих сложных и дорогостоящих технологий изготовления. Метод электродинамического подобия позволяет масштабировать параметры мета-атомов, полученные для СВЧ-волн, и приблизительно определять оптимальную геометрию элементов метаматериала для гораздо более высоких частот. Точные размеры мета-атомов для терагерцового и оптического диапазонов можно найти путем численного моделирования.

Экспериментально реализовать метаматериалы на основе оптимальных спиралей для терагерцового диапазона, предварительно смоделированные и изготовленные в ГГУ им. Ф. Скорины для СВЧ-волн, оказалось возможным с использованием метода точного 3D-наноструктурирования, развитого российскими учеными под руководством члена-корреспондента РАН В.Я. Принца [13–15]. В Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН им. А.В. Ржанова изготовили образцы, которые впоследствии были исследованы в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера [16] и Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси [17–18].

Полученный метаматериал проявляет одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства, которые обусловлены оптимальной формой имеющихся в его основе спиралей. В то же время киральные характеристики искусственной структуры скомпенсированы, поскольку используются парные оптимальные спирали с правым

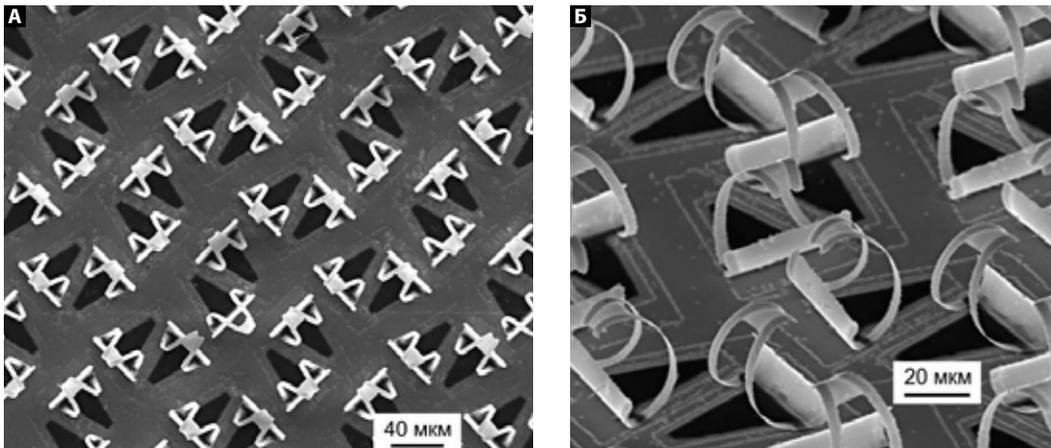


Рис. 4. СЭМ-изображение метаматериала, образованного одновитковыми сбалансированными спиралями на основе пленки из  $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$   
 А – вид сверху  
 Б – вид под углом

и левым направлением закручивания. В результате созданный метаматериал обладает в терагерцовом диапазоне волновым импедансом, близким к импедансу свободного пространства. Таким образом создан метаматериал, поглощающий терагерцовые волны вблизи резонансной частоты и одновременно имеющий низкий коэффициент отражения. В дальнейшем он может найти интересные области приложения, в том числе при производстве каскадных устройств, в которых требуется совместимость элементов, их независимое функционирование на различных частотах и отсутствие взаимных помех.

Электродинамика метаматериалов – динамично развивающаяся область современной физики, что подтверждает высокое число публикаций в этой сфере. Среди недавних стоит отметить работу, посвященную проблеме определения энергии электромагнитного поля в поглощающем метаматериале [19], обзорную статью, в которой рассматривается физика метаповерхностей и их применение [20], а также публикацию по оптическим метаматериалам [21–23].

■ **Summary.** Examples of metamaterials and metasurfaces created on the basis of metal helices and omega elements of a classical or rectangular shape are given. The analogy and differences between metamaterials and crystals are discussed. Unlike natural crystals, metamaterials can simultaneously have equally significant dielectric and magnetic properties.

■ **Keywords:** metamaterial, metasurface, helix, omega element, absorber, microwaves, terahertz waves.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бокуть Б.В. К феноменологической теории естественной оптической активности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1971. Т. 61. №5. С. 1808–1813.
2. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. – Минск, 1976.
3. Kong J.A. Electromagnetic Wave Theory. – New York, 1986.
4. Monzon J.C. Radiation and scattering in homogeneous general bi-isotropic region // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. 38(2). P. 227–235.
5. Sihvola A.H., Lindell I.V. Bi-isotropic constitutive relations // Microwave and Optical Technology Letters. 1991. 4(8). P. 195–297.
6. Semchenko I. [et al.]. Omega-structured substrate-supported metamaterial for the transformation of wave polarization in THz frequency range // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. 660. P. 72–80.
7. Semchenko I. [et al.]. Design and creation of metal-polymer absorbing metamaterials using the vacuum-plasma technologies // Lecture Notes in Networks and Systems Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. 53. P. 105–112.
8. Semchenko I. [et al.]. The development of double-sided nonreflecting absorber of the terahertz waves on the basis of metamaterials // METANANO 2019, IOP Conf. Series: Conf. Series 1461 (2020) 012148.
9. Семченко И.В., Хахомов С.А. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах. – Минск, 2019.
10. Semchenko I., Khakhomov S. Metamaterials // Photonics / Editor: Alexei Tolstik. – Riga, 2019. p. 504–525.
11. Asadchy V.S. [et al.]. Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption // Phys. Rev. X. 2015. 5(3). P. 031005-1–031005-10.
12. Serdyukov A.N. [et al.]. Electromagnetics of bianisotropic materials: Theory and Applications. – London, 2001.
13. Prinz V.Ya. [et al.] Free-standing and overgrown InGaAs // Physica E. 2000. 6(1). P. 828–831.
14. Наумова Е.В., Принц В.Я. Структура с киральными электромагнитными свойствами и способ ее изготовления (варианты): пат. 2317942 РФ: МПК В82В 3/00 (2006); дата публ.: 27.02.2008.
15. Наумова Е.В. [и др.]. Киральные метаматериалы терагерцового диапазона на основе спиралей из металл-полупроводниковых нанопленок // Автотриетрия. 2009. Т. 45, №4. С. 12–22.
16. Семченко И.В. [и др.]. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью // Кристаллография. 2011. Т. 56. №3. С. 404–411.

Полный список использованных источников

SEE <http://innosfera.by/2020/08/metamaterials>

Статья поступила в редакцию: 16.07.2020 г.