

**И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов,  
М. А. Подалов, А. П. Балмаков**  
*г. Гомель, ГГУ имени Ф. Скорины*

## **МЕТАМАТЕРИАЛЫ И МЕТАПОВЕРХНОСТИ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ ОТРАСЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ БИАНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР**

Метаматериалы представляют собой периодические системы структурированных в пространстве микро- и нанорезонаторов, с помощью которых можно получить свойства и характеристики, не присущие природным объектам. Фундаментальные исследования метаматериалов планомерно переходят из чисто теоретической области научного знания в практическую плоскость, что, в конечном итоге, позволяет создавать новые типы поляризаторов, линз с субволновым разрешением, поглотителей, сенсоров, антенн и покрытий для маскировки объектов в определенном диапазоне частот.

Метаматериалы, образованные массивом микро-резонаторов специальной геометрической формы, могут проявлять селективные частотные и поляризационные свойства и, следовательно, могут послужить основой преобразователей поляризации, фильтров и поглотителей нового типа для СВЧ и ТГц диапазонов частот.

В Гомельском государственном университете авторами в рамках функционирования лаборатории «Физика волновых процессов», созданной приказом ректора № 779 от 20 сентября 1999 года, научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор И. В. Семченко, развивается это перспективное направление работы. Ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области электродинамики сред с искусственными бианизотропными и киральными свойствами.

Авторами разработана аналитическая модель, позволяющая рассчитать электрический дипольный момент и магнитный момент, возникающие в спирали или омега-элементе под действием падающей электромагнитной волны. Получено соотношение между проекциями моментов на ось спирали, которое является универсальным, поскольку не зависит от распределения тока в спирали. Аналогичное соотношение выведено для моментов, индуцируемых падающей волной в омега-элементе классической формы. Получено подобное соотношение также для прямоугольного омега-элемента и планарной спирали. Соотношение проверено нами на примере трех частных случаев распределения тока в спирали: однородный ток, линейное убывание тока от центра к концам спирали, гармоническая зависимость тока от координаты. Универсальность соотношения следует понимать и в более широком смысле. В метаматериале, при плотном расположении его элементов, ток в каждом элементе может изменяться не только в результате прямого воздействия падающей электромагнитной волны, но и под влиянием других элементов, образующих метаматериал. Однако при любых изменениях тока компоненты электрического дипольного момента и магнитного момента изменяются согласованно, и соотношение остается справедливым. Поэтому геометрические параметры спирали или омега-элемента остаются оптимальными даже при значительном возрастании концентрации элементов в метаматериале.

Найдены оптимальные параметры спирали, при которых наблюдается наиболее эффективное преобразование поляризации электромагнитных волн, в частности, поворот плоскости поляризации на максимальный угол. Изготовлены образцы метаматериалов на диэлектрической подложке с упорядоченно расположенными спиральными или омега-элементами, имеющими оптимальные параметры (рисунок 1). При этом показана возможность варьирования металлов для создания элементов метаматериалов.

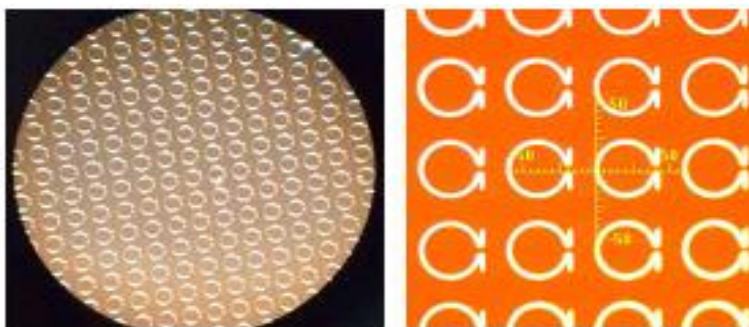


Рисунок 1 – Метаповерхность, образованная омега-элементами на кремниевой подложке

На основе парных спиральных элементов с оптимальными параметрами разработаны и созданы слабоотражающие поглощающие метаматериалы с компенсированной киральностью, при этом метаматериалы обладают волновым импедансом, близким к импедансу свободного пространства (рисунок 2).

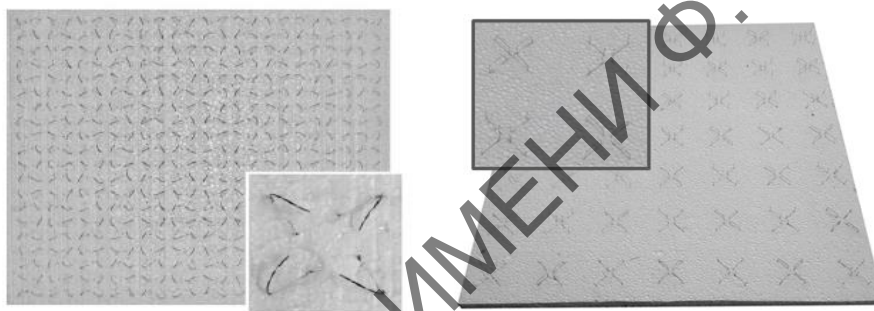


Рисунок 2 – Поглощающий метаматериал на основе парных спиральных элементов с оптимальными параметрами

Доказана поляризационная селективность взаимодействия ДНК-подобных спиралей с СВЧ излучением и показано, что в соответствии с принципом электродинамического подобия она может иметь место для молекулы ДНК в глубоком УФ диапазоне. Этот результат имеет большое значение при решении задач, связанных с сохранением генетических различий между правовинтовыми и левовинтовыми формами объектов живой природы.

Обосновано, что обладающая оптимальной геометрической формой молекула ДНК в глубоком УФ диапазоне не чувствительна к воздействию правоциркулярно поляризованной электромагнитной волны. Соответственно волна, излучаемая в условиях резонанса правовинтовой молекулой ДНК перпендикулярно оси спирали, левовинтовыми поляризована.

Лаборатория «Физика волновых процессов», имеет богатый опыт сотрудничества в данной области с Институтом физики полупроводников СО РАН (профессор Принц В. Я.), обладающим патентованной технологией и уникальным оборудованием для изготовления метаматериалов на основе напряженных пленок; опыт совместных экспериментальных исследований в СВЧ диапазоне с университетом Аалто, Финляндия (профессор Третьяков С. А.) и национальным исследовательским университетом ИТМО, С-Петербург, Россия (профессор Белов П. А.). Проводились также совместные научные исследования с сотрудниками Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, ОАО «ИНТЕГРАЛ», результаты которых представлены на международных конференциях Inter-Academia в г. Яссы (Румыния), в г. Каунас (Литва) и в г. Будапешт (Венгрия), на VI Конгрессе физиков Беларуси и опубликованы в коллективных монографиях в издательстве Springer в 2018 г., в 2019 г. и в 2020 г.

В лаборатории созданы все условия, необходимые для успешного проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований, имеется в наличии: вычислительная техника – современные компьютеры и рабочие станции, оборудование и приборы для проведения экспериментальных исследований в СВЧ диапазоне, в том числе современная безэховая камера на основе поглотителя пирамидального типа ТОРА, аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик антенн ЮСТ FarField, предназначенный для измерения характеристик направленности антенн поворотным методом в дальней зоне, векторный анализатор PicoVNA 106 (АКИП 6602) (диапазон частот от 0,3 до 6 ГГц), спектрометр Vator TDS-1008-wol ГГц диапазона, рупорные антенны.

Результатом работы лаборатории являются успешные защиты диссертаций как в Республике Беларусь, так и за рубежом. В 2017 г. С. А. Хахомовым успешно защищена докторская диссертация по специальности «оптика» в Институте физики НАН Беларуси, посвященная свойствам метаматериалов. В 2013 и 2017 гг. под руководством И. В. Семченко с белорусской стороны и руководством профессоров М. Нагатсу и В. Мизейкиса с японской стороны в университете Сидзуока, Япония были защищены диссертации на соискание степени PhD (Philosophy Doctor) А. Балмаковым и И. Фаняевым. В 2017 г. под руководством И. В. Семченко с белорусской стороны и руководством профессора С. Третьякова с финской стороны в университете Аалто, Финляндия была защищена диссертация на соискание степени PhD (Philosophy Doctor) В. Асадчим. В 2018 году в университете Сидзуока состоялась защита диссертации С. Д. Барсукова (руководитель С. А. Хахомов).

И. В. Семченко и С. А. Хахомов ранее проводили научные исследования в Аалто университете г. Хельсинки, Финляндия, в Техническом университете г. Брауншвейга, Германия, в Ягеллонском университете г. Кракова, Институте низких температур, г. Вроцлава, Польша, приглашались для чтения лекций в университет Сидзуока, Япония, Нанкинский университет науки и технологии, Цзянаньский университет, Пекинский технологический институт, Китай. Кроме того сотрудниками лаборатории, постоянно выполняются проекты, финансируемые БРФФИ и Министерством образования, а также Государственные программы научных исследований.

Оценкой уровня работы лаборатории являются публикации сотрудников в отечественных и международных изданиях, в том числе с высоким импакт-фактором [1–23]. В 2019 году в ведущем белорусском научном издательстве была издана монография [24].

#### Список использованных источников

1 Semchenko, I. V. The influence of induced chiral properties on the transformation of polarization of acoustic waves in piezoelectric semiconductors / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / Ed. by A. Priou [et al.]. – Kluwer Academic Publishers. – 1997. – P. 219–226.

2 Semchenko, I. V. Propagation of electromagnetic waves in artificial anisotropic uniform and twisted omega-structures / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. By Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Arsalane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 197–210.

3 Semchenko, I. V. The competition of Bragg reflection and Fresnel's reflection of electromagnetic waves in the artificial helicoidal bianisotropic media with local chirality / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. by Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Arsalane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 307–318.

4 Semchenko, I. V. Effective electron model of the wire helix excitation at microwaves: first step to optimization of pitch angle of helix / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, E. A. Fedosenko // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. by Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Arsalane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 245–258.

5 The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov, M. A. Podalov, Q. Songsong // *Recent*

Global Research and Education: Technological Challenges / Ed. by Ryszard Jablonski and Roman Szewczyk, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 519, Springer. – 2017. – P. 3–9.

6 Semchenko, I. V. Polarization plane rotation of electromagnetic waves by the artificial periodic structure with one-turn helical elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // *Electromagnetics*. – 2006. – Vol. 26. – № 3–4. – P. 219–233.

7 Семченко, И. В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52. – № 8. – С. 917–922.

8 Semchenko, I. V. Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2009. – Vol. 46. – № 3. – P. 32607-1–32607-4.

9 Семченко, И. В. Исследование искусственных ДНК-подобных структур в СВЧ-диапазоне: наблюдение поляризационной селективности отражения волн / И. В. Семченко, А. П. Балмаков, С. А. Хахомов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2009. – № 4. – С. 66–72.

10 Семченко, И. В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2009. – Т. 52. – № 5. – С. 30–36.

11 Semchenko, I. V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2010. – Vol. 49. – № 3. – P. 33002-p1 – 33002-p5.

12 Семченко, И. В. Поляризационная селективность взаимодействия молекулы ДНК с рентгеновским излучением / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков // *Биофизика*. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 227–232.

13 Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, В. В. Кубарев // *Кристаллография*. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 404–411.

14 Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной киральностью / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, В. С. Асадчий, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, А. Г. Милехин, А. М. Гончаренко, Г. В. Сеницын // *Кристаллография*. – 2014. – Т. 59. – № 4. – С. 544–550.

15 The potential energy of non-resonant optimal bianisotropic particles in an electromagnetic field does not depend on time / I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Balmakou, S. Tretyakov. – *The European Physical Journal, EPJ Applied Metamaterials*. – 2014. – 1. – P. 1–4.

16 Sihvola, A. H. View on the history of electromagnetics of metamaterials: Evolution of the congress series of complex media / A. H. Sihvola, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2014. – Vol. 12. – № 4. – P. 279–283.

17 Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators / A. Balmakou, M. Podalov, S. Khakhomov, D. Stavenga, I. Semchenko. – *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40. – № 9. – P. 2084 – 2087.

18 Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption / V. S. Asadchy, I. A. Faniayeu, Y. Ra'di, S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov – *Phys. Rev. X*. – 2015. – Vol. 5. – № 3. – P. 031005-1–031005-10.

19 Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, V. S. Asadchy, S. V. Golod, E. V. Naumova, V. Ya. Prinz, A. M. Goncharenko, G. V. Sinitsyn, A. V. Lyakhnovich, V. L. Malevich – *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 121. – P. 015108-1–015108-8.

20 Stored and absorbed energy of fields in lossy chiral single-component metamaterials / I. V. Semchenko, A. P. Balmakou, S. A. Khakhomov, and S. A. Tretyakov // *Phys. Rev. B*. – 2018. – Vol. 97. – P. 014432-1–014432-8.

21 Coordinated multi-band angle insensitive selection absorber based on grapheme metamaterials / J. Bao, J. Wang, Z. Hu, A. Balmakou, S. Khakhomov, Y. Tang, C. Zhang // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, № 22. – P. 31435–31445.

22 Independent Tunable Multi-Band Absorbers Based on Molybdenum / Jicheng Wang, Xiaoyu Wang, Zheng-Da Hu, Yang Tang, Aliaksei Balmakou, Sergei Khakhomov, Dongdong Liud // *Disulfide Metaurfaces. Physical Chemistry*. – 2019. – Iss. 21(43). – P. 24132–24138.

23 Метаматериалы и метаповерхности / И. Семченко, С. Хахомов, А. Самофалов, А. Балмаков // *Наука и инновации*. – 2020. – № 8. – С. 23–27.

24 Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.