

## Электродинамика открывает мир метаматериалов

Метаматериалом (от греческого "μετα", что означает «за пределами», и латинского "mater-ia", – «материал») можно назвать любой материал, который имеет свойство, несуществующее у естественных материалов. Метаматериалы состоят из искусственных структур, размер которых меньше используемой длины волны. Свойства метаматериалов определяются созданными структурами. Их применение включает оптоэлектронику, искусственный интеллект, обработку информации и многое другое.

### 1. Материалы с отрицательным показателем преломления

Хотя метаматериалы являются продуктом 21-го века, идея материалов с отрицательным коэффициентом преломления родилась у известного российского физика, профессора Виктора Георгиевича Веселаго (1929 - 2028) еще во второй половине 20-го века. Веселаго в рамках теории Максвелла разработал электродинамику для материалов с  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$  ( $\epsilon$  и  $\mu$  диэлектрическая и магнитная проницаемость) [1, 2].

В материалах с отрицательным показателем преломления ( $n < 0$ ) вектор Пойнтинга  $S$  (распространение мощности волны) и волновой вектор  $k$  (направление фазовой скорости) являются антипараллельными (рис. 1). Переход электромагнитных волн в материал с  $n < 0$  (преломление) приводит к отрицательному углу  $\beta$  (от нормали к поверхности раздела) без отражения от интерфейса (рис. 1). Такие материалы Веселаго назвал «левосторонними средами» (англ. *Left Hand Materials*) и этот термин вошел в научную литературу.

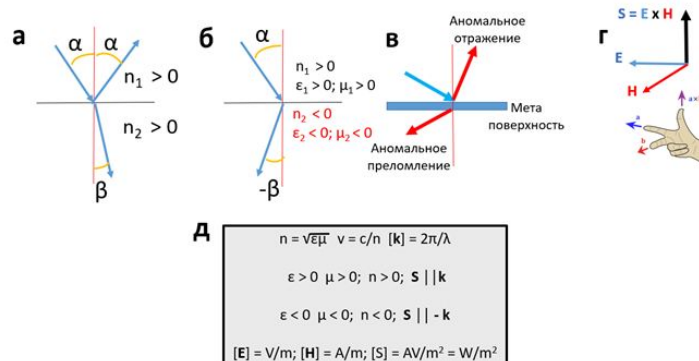


Рисунок 1 – а - отражение и преломление в материалах с положительным показателем преломления; б - преломление электромагнитных волн в материале с отрицательным показателем преломления  $n$ ; в - аномальное отражение и преломление в метаматериалах; г - в материалах с положительным  $\epsilon$  и  $\mu$ , векторы  $E$ ,  $H$  и  $S$  ориентированы в соответствии с правилом правой руки; д - параметры материалов с положительным и отрицательным  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $n$

Профессору Веселаго пришлось ждать 33 года до того, как профессор Дэвид Смит синтезировал первый композитный материал с  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$  в области ГГц [3]. Смит исследовал в нем дисперсию  $\epsilon$  и  $\mu$  в гигагерцовой области, а также эффект Доплера и таким образом подтвердил прогноз Веселаго [1].

Профессор Пендри в престижном журнале *Phys. Rev. Lett.* [4] опубликовал статью под названием «Отрицательный показатель преломления создает идеальную линзу», в которой он рассмотрел возможность разрешения линз выше дифракционного лимита. Результаты он

Таблица 1 – Открытие метаматериалов

Год	Теория / Открытие	Автор / Ссылка
1967	<p>Электродинамика материалов с отрицательным показателем преломления и ожидаемые свойства (теория).</p> <p>1) Материал может иметь отрицательную диэлектрическую (<math>\epsilon</math>) и магнитную (<math>\mu</math>) проницаемость.</p> <p>2) Параллельная пластинка из такого материала будет работать как собирающая линза с высоким разрешением (линза Веселаго).</p> <p>3) Такой материал имеет аномальные преломление и рассеяние электромагнитных волн.</p>	В.Г. Веселаго [1, 2]
2000	Профессор Дэвид Смит ( <i>David Smith</i> , 1964, <i>Duke University, North Carolina</i> ) синтезировал первый материал с отрицательной диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостью в микроволновой области спектра и этим подтвердил прогноз Веселаго.	David Smith [3]
2000	Профессор Джон Пендри ( <i>John Brian Pendry</i> , 1943, <i>Imperial College London</i> ) при помощи материала с негативным показателем преломления получил «суперлинзу» с разрешением выше дифракционного лимита.	J.B. Pendry [4]
2006	Проф. Джон Пендри наблюдал аномальное рассеяние в метаматериалах и сделал объект невидимым в ограниченном диапазоне радиоволн ( $\delta\lambda$ ). Вместе с Дэвидом Смитом он опубликовал статью и позднее смог сделать объекты невидимыми в видимой области спектра.	J.B. Pendry, D. Smith [5]
2007	Профессор Владимир Михайлович Шалаев ( <i>Vladimir Shalaev</i> , 1957) создал первый магнитный материал с отрицательным показателем преломления в видимой области спектра. Его обширные исследования в Университете Пердью в области нанотехнологии открыли путь к применению метаматериалов в оптоэлектронике и искусственном интеллекте.	V.M. Shalaev [6,7]

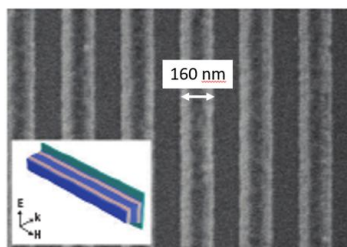


Рисунок 2 – Мета-поверхность с парными серебряными полосками и отрицательной магнитной проницаемостью для длины волны  $\lambda \approx 725$  нм; вставке показана ориентация E, H и k [6]

сформулировал так: «Все это было предсказано профессором Веселаго некоторое время назад [1]» [4].

Российско-американский физик Владимир Шалаев (*Vladimir Shalaev*, 1957; учеба и защита диссертации в Университете Красноярск, Россия; дальнейшая работа в Нанотехнологическом центре Университета Пердью, США) своими обширными исследованиями открыл путь перехода от трехмерных метаматериалов к двумерным метаповерхностям. Двумерные структуры метаповерхностей (МП) намного легче создать и дешевле производить, что стимулировало применение МП в оптоэлектронике и для обработки информации (см. [6] и ссылки в этой работе). В своей работе Шалаев отметил, что «метаматериалы с  $n < 0$  были открыты российскими физиками: Л. И. Мандельштамом, В. И. Сивухиным, В. Г. Веселаго. Веселаго представил современное описание материалов отрицательной диэлектрической магнитной проницаемостью» [6, 7].

Структура метаматериалов и метаповерхностей должна быть меньше, чем используемая длина волны. Из-за этого первые приложения были возможны только в микроволновом диапазоне. Только прогресс нанотехнологий открыл путь к метаповерхностям в видимой спектральной области (см. [8] и ссылки).

## 2. Плазмон на металлических поверхностях

Плазмоны являются коллективными возбуждениями свободных электронов в электронном газе в твердых телах. Термин введен в физику профессором Дэвидом Пайнсом (*David Pines*, 1924 – 2018, *University of California*) в 1952 году и с тех пор они всесторонне исследованы. В 1957 году профессор Руфус Ричи (*Rufus Ritchie*, 1924 - 2017, *University of Tennessee, US*) описал поверхностные плазмоны, которые несколько лет спустя смогли наблюдать в тонких металлических пленках [9]. Поверхностные плазмоны являются продольными колебаниями свободных электронов, которые происходят параллельно поверхности. Это электромагнитные волны, которые распространяются в твердом теле вдоль поверхности. Их можно наблюдать только локально, например, при полном внутреннем отражении электромагнитных волн.

Когда поверхностные плазмоны на границе металл-диэлектрик встречают дефекты, энергия плазмона может излучаться. Такие плазмоны называются плазмонами поверхности разрыва (англ. *Gap Surface Plasmon, GSP*). *GSP*-это когерентные колебания электронов, которые возникают на границе «металл-диэлектрик», понятие «разрыв» (англ. *gap*) относится к диэлектрическому слою между металлическими слоями системы «металл-диэлектрик-металл» (рис.3). Плазмоны поверхности разрыва широко используются в системах обработки информации. Ведущий эксперт в этой области профессор Фей Динг (*Fei Ding, University of Southern Denmark*) отмечает: «В последние годы *GSP*- широко используют для создания метаповерхностей, состоящих из двумерных металл-диэлектрик-металл структур, где тонкий диэлектрический слой создает *GSP*-, излучение которых используется для модуляции света (амплитуда, фаза, поляризация) в системах обработки информации» [10].

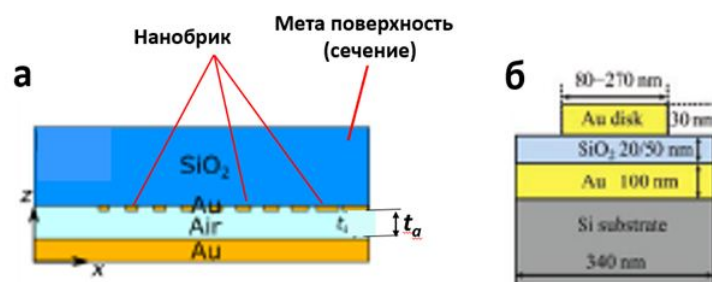


Рисунок 3 – а - мета-поверхность состоит из небольших наноструктур (нанобриков), образующих три слоя на подложке SiO<sub>2</sub> (толщина 20 нм; поверхность 50?50 нм, 100?100 нм и 250?250 нм), между SiO<sub>2</sub> и толстым слоем золота (Au) находится тонкий воздушный слой ( $t_a$ ) [11]; б - структура одного нанобрика: нанодиск из золота (Au) диаметром 80-210 нм; слой SiO<sub>2</sub> толщиной 20 и 50 нм; толстый слой Au толщиной 100 нм; все смонтировано на толстом субстрате Si; рассчитано для  $\lambda = 725$  нм [10]

### 3. Динамическая метаповерхность

Большинство приложений метаповерхностей (МП) используют статические структуры, которые реализуют только ограниченные оптические процессы. Применения в оптоэлектронике, при обработке информации, динамической голографии и во многих других областях требуют создания динамических систем, позволяющих наблюдать и контролировать процессы во времени.

Китайский физик *Chao Meng* из Центра нано оптики Университета Южной Дании (*Centre Nano Optics, University of Southern Denmark*) в сотрудничестве с Университетом электроники и технологий Китая и Центром нанотехнологий Норвегии (*Nanotechnology Centre, Norway*) разработал динамическую систему для МП, которая позволяет модулировать фазу и амплитуду отраженного света [11]. Система состоит из метаповерхности на пьезокерамике, что позволяет изменять щель между металл-изолятор-металл элементами (рис.4) [11] путем изменения толщины воздушного слоя ( $t_a$ , рис.4 а и б). В разработанной системе время изменения толщины слоя около 0.4 миллисекунд. В дальнейшем этот процесс можно ускорить до микросекунд. Система работает в отраженном свете в области длин волн инфракрасного диапазона  $\lambda = (800 \pm 160)$  нм и обеспечивает модуляцию амплитуды и фазы отраженного света (рис.4 в). Физики Датского университета экспериментально подбирали оптимальные параметры элементов МП: размер отдельного нанобрика (англ. *nananobrick*, рис.4 а), толщину воздушного слоя ( $t_a$ ), структуру МП (рис.4 б). Оптимальными параметрами нанобрика были выбраны:  $\Lambda = 250$  нм и  $t_m = 50$  нм (рис.4). Изменение толщины воздушного слоя  $t_a$  осуществлялось пьезокерамикой (рис.4, в). Для формирования отраженного светового луча были разработаны отдельная система и модуляция отражающего зеркала (рис.5) [11].

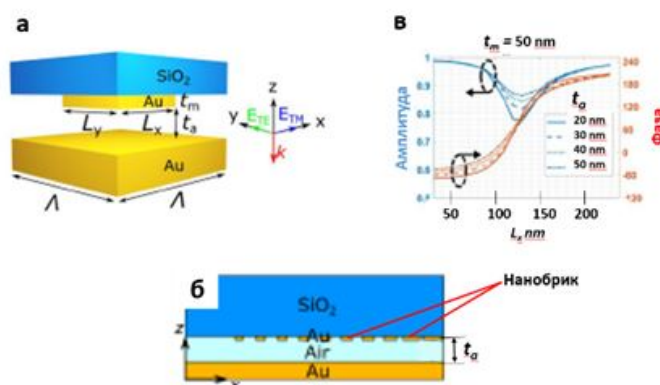


Рисунок 4 – Динамическая мета-поверхность: а – нанобрик состоит из толстого субстрата Au размером  $\Lambda \times \Lambda$ , над которым тонкий воздушный слой толщиной  $t_a$  и тонкий слой Au толщиной  $t_m$  размером  $L_x \times L_y$  на аморфном SiO<sub>2</sub>. Вся структура метаповерхности монтируется на пластине SiO<sub>2</sub>. Исследовались варианты с размерами:  $\Lambda = 250$  нм;  $t_a$  от 20 нм до 350 нм;  $L_x = L_y$  от 50 до 250 нм;  $t_m = 50$  нм. В качестве оптимальных выбраны  $\Lambda = 250$  нм,  $t_m = 50$  нм и структура МП с  $L_x = L_y$  с размерами 50 × 50 нм, 100 × 100 нм и 250 × 250 нм (рис. б). б – выбранная оптимальная структура метаповерхности. в - Зависимость амплитуды и фазы отраженного света от толщины воздушного слоя ( $t_a$ ) и  $L_x$  [11]

### 4. Мир метаматериалов

Профессор Веселаго увидел подтверждение своей теории через более чем тридцать лет после опубликования: отрицательные  $\epsilon$ ,  $\mu$  и  $n$ ; отличия в законах Снеллиуса, доплеровского эффекта и эффекта Черенкова; линзы с высоким разрешением [1,2]. Его публикации цитируются до сегодняшнего дня. В 2018 году в Хельсинки состоялся Международный Всемирный конгресс «Метаматериал 2018», специальное заседание которого было посвящено

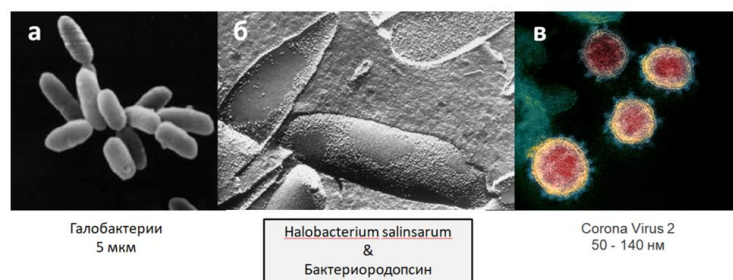


Рисунок 5 – Динамическая система позволяет управлять профилем отраженного света [11]

50-й годовщине публикаций профессора Веселагона английском языке [1, 2]. Профессор Веселаго был приглашен на Конгресс в качестве почетного гостя.

Важным шагом был переход от трехмерных метаматериалов к 2D поверхностным материалам, в частности развитие мета-поверхностей с поверхностными плазмонами (*Gap Surface Plasmons*) [10], которые упростили синтез и открыли путь к универсальным приложениям [8]. В дополнение к обработке информации, перспективным направлением является разработка оптических приборов, например, создание плоских линз с высоким разрешением [12].

### Список литературы

- 1 Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ , Успехи физических наук, 92, 517 – 526 (1967).
- 2 Веселаро В.Г. Properties of materials having simultaneously negative values of the dielectric and magnetic susceptibilities, Sov. Phys. Solid State, 8(12), 2854–2856 (1967).
- 3 Smith D.R., Willie J. Padilla, Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., and Schulz B.S. Composite Medium with simultaneously Negative Permeability and Permittivity, Phys. Rev. Lett., 84, 4184–4187 (2000).
- 4 Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Phys. Rev. Lett., 85, 3966–3969 (2000).
- 5 Palmer J. 'Invisibility cloak' pioneer John Pendry scoops Newton Medal (30 June 2013). [Электронный ресурс] - URL: <https://www.bbc.com/news/science-environment-23081852> (дата обращения: 14.09.2021)
- 6 Shalaev V.M. Optical Negative-Index Metamaterials, Nature photonics, 1, 41–48 (2007).
- 7 Cai W., Shalaev V.M. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications. New York, Springer-Verlag, 2010.
- 8 Yu N. and Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces, Nature Materials, 13, Februar 2014.
- 9 Ritchie R.H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films, Physical Review, (5)106, 874–881 (1957). doi:10.1103/PhysRev.106.874
- 10 Fei Ding, Yuanqing Yang, Rucha A. Deshpande and Sergey I. Bozhevolnyi, A review of gap-surface plasmon metasurfaces: fundamentals and applications, Reports on Progress in Physics, 2(81), 2018.
- 11 Chao Meng, Paul C. V. Thranе, Fei Ding, Jo Gjessing, Martin Thomaschewski, Cuo Wu, Christopher Dirdal, Sergey I. Bozhevolnyi, Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces, Sci. Adv., 7, eabg5639, (11) 2021.
- 12 Shinpei Ogawa and Masafumi Kimata, Metal-Insulator-Metal-Based Plasmonic Metamaterial Absorbers at Visible and Infrared Wavelengths, Materials, 11(458), (18)2018. doi:10.3390/ma11030458

#### Сведения об авторах:

*Шварц К.* - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

*Даулетбекова А.К.* - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Нур-Султан, Казахстан.

*Сорокин М.* - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

*Schwartz K.* - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

*Dauletbekova A.* - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukhan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Sorokin M.* - Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow.