

## МЕТАМАТЕРИАЛЫ (Metamaterials)

*Так соборы кристаллов сверхжизненных  
Добросовестно луч-паучок  
Распуская на ребра, их сызнова  
Собирает в единый пучок...*

*О. Мандельштам*



Согласно современной терминологии, Баба-Яга не ворожит, а синтезирует метаматериал

Детская задачка «Что тяжелее: килограмм ваты или килограмм железных опилок?» поставит в затруднение разве что несообразительного первоклассника. Гораздо интереснее рассуждать на тему: «Какими свойствами будет обладать материал, который мы получим, если тщательно смешаем мелко измельченную вату и железные опилки?» Интуитивно понятно: чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить свойства железа и ваты, после чего можно с уверенностью утверждать, что полученный материал наверняка будет, например, реагировать на присутствие магнита и воды. Однако всегда ли свойства многофазного материала определяются исключительно свойствами образующих его компонентов? Хочется ответить на этот вопрос положительно – сложно

представить себе, скажем, смесь диэлектриков, которая проводит электрический ток. «Такое бывает только в сказках!» – постарается реабилитироваться первоклассник, вспомнив многочисленных колдунов и волшебниц из детских сказок, которые, смешивая всевозможные мухоморы, лягушачьи лапки и крылья летучих мышей, получали магические порошки, волшебные свойства которых, строго говоря, мухоморам и лягушачьим лапкам несвойственны.

Впрочем, как это ни удивительно, современная наука знает примеры того, как совмещение вполне заурядных материалов позволяет создавать объекты, свойства которых не только не присущи используемым компонентам, но и в принципе не могут быть найдены в природе и, как может показаться на первый взгляд, запрещены законами физики.

«Это чудо!» – скажет первоклассник. «Нет, это метаматериалы!» – возразит современный ученый. И оба будут по-своему правы, потому что с точки зрения классической науки метаматериалы способны творить самые настоящие чудеса. Впрочем, сам процесс создания метаматериала тоже подобен волшебству, так как компоненты метаматериала недостаточно просто смешать, как это делали сказочные волшебники – их необходимо правильно структурировать.

Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько микроструктурой. Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демон-

стрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе.

Одним из наиболее горячо обсуждаемых в последнее время типов метаматериалов являются объекты с отрицательным показателем преломления. Из курса школьной физики хорошо известно, что показатель преломления среды ( $n$ ) является величиной, показывающей во сколько раз фазовая скорость электромагнитного излучения в среде ( $V$ ) меньше скорости света в вакууме ( $c$ ):  $n = c/V$ . Показатель преломления вакуума равен 1 (что, собственно, следует из определения), тогда как для большинства оптических сред он больше. Например, обычное силикатное стекло имеет показатель преломления 1,5, а значит, свет распространяется в нем со скоростью в 1,5 раза меньше, чем в вакууме.

На теоретическую возможность существования уникальных материалов с отрицательным показателем преломления указал советский физик Виктор Веселаго почти 40 лет назад. Дело в том, что коэффициент преломления связан с двумя фундаментальными характеристиками вещества, диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ , простым соотношением:  $n^2 = \epsilon \cdot \mu$ . Несмотря на то, что данному уравнению удовлетворяют как положительные, так и отрицательные значения  $n$ , ученые долго отказывались верить в физический смысл последних – до тех пор, пока Веселаго не показал, что  $n$  может быть меньше 0 в том случае, если одновременно  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ .

Природные материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью хорошо известны – это любой металл при частотах ниже плазменной частоты (при которой металл становится прозрачным). Гораздо сложнее создать материал с  $\mu < 0$  – в природе такие материалы не существуют. Именно по этой причине работы Веселаго долгое время не привлекали должного внимания научной общественности. Прошло 30 лет, прежде чем английский ученый Джон Пендри (John Pendry) в 1999 г. показал, что отрицательная магнитная проницаемость может быть получена для проводящего кольца с зазором. Если поместить такое кольцо в переменное магнитное поле, в кольце возникнет электрический ток, а на месте зазора возникнет дуговой разряд.

Таким образом, возможны системы с отрицательным откликом как на электрическую, так и на магнитную компоненту электромагнитного излучения. Объединить обе системы в одном материале впервые удалось американским исследователям под руководством Дэвида Смита (David Smith) в 2000 г. Созданный метаматериал состоял из металлических стержней, ответственных за  $\epsilon < 0$ , и медных кольцевых резонаторов, благодаря которым удалось добиться  $\mu < 0$ . Несомненно, структуру, изображенную на рис. 1, сложно назвать материалом в традиционном смысле этого слова, поскольку она состоит из отдельных макроскопических объектов. Между тем, данная структура «оптимизирована» для микроволнового излучения, длина волны которого значительно больше отдельных структурных элементов метаматериала. Поэтому с точки зрения микроволн последний также однороден, как, например, коллоидный раствор для видимого света. Последовательно уменьшая размеры структурных элементов, можно создавать метаматериалы с отрицательным показателем преломления для терагерцевого и инфракрасного диапазонов спектра. Ученые ожидают, что, благодаря достижениям современных нанотехнологий, в самое ближайшее время будут созданы метаматериалы и для видимого диапазона спектра.

С точки зрения физики метаматериалы с отрицательным показателем преломления являются



**Рис. 1.** Фотография метаматериала с отрицательным показателем преломления для микроволнового излучения

антиподами обычных материалов. В случае отрицательного показателя преломления происходит обращение фазовой скорости электромагнитного излучения; доплеровский сдвиг происходит в противоположную сторону; черенковское излучение от движущейся заряженной частицы происходит не вперед, а назад; собирающие линзы становятся рассеивающими и наоборот... И все это – лишь небольшая часть тех удивительных явлений, которые возможны для метаматериалов с отрицательным показателем преломления.

Практическое использование таких материалов, в первую очередь, связано с возможностью создания на их основе терагерцевой оптики, что, в свою очередь, приведет к развитию метеорологии и океанографии, появлению радаров с новыми свойствами и средств всепогодной навигации, устройств дистанционной диагностики качества деталей и систем безопасности, позволяющих обнаружить под одеждой оружие, а также уникальных медицинских приборов.

#### *Литература:*

1. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Physical Review Letters. 2000. № 84. P. 4184.
2. Padilla W.J., Basov D.N., Smith D.R. Materials Today. 2006. Vol. 9, № 7–8. P. 28–35.