

## **Метаматериалы: концепция Б.Мунка**

*Обсуждаются фундаментальные свойства метаматериалов: отрицательный коэффициент преломления, отрицательная фазовая скорость, формирование «левосторонних» сред и др. Рассматриваются альтернативные варианты разработки искусственных структур, проявляющих необычные электромагнитные свойства.*

**Ключевые слова:** Метаматериалы, отрицательный коэффициент преломления, отрицательная фазовая скорость, обратная волна, «левосторонние» среды

### **Введение**

Метаматериалы привлекают интерес многих исследователей и инженеров-разработчиков, поскольку характеризуются необычными электромагнитными свойствами, обычно не встречающимися в природе в виде естественных материалов [1]. Метаматериал — композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Такие макроскопические элементы можно рассматривать как совокупность искусственных «атомов» чрезвычайно больших размеров. Искусственная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала. При этом имеется возможность выбора различных свободных параметров: размер элементарных ячеек, размеры всей структур, форма, постоянный/переменный период решетки элементов, образующих структуру и т.д. Одно из возможных свойств метаматериалов — отрицательный коэффициент преломления, который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемостей материала. Именно это свойство метаматериалов часто становятся объектом научных дискуссий и несогласий. Представляет интерес позиция американского физика Бена Мунка (*Professor of Electrical Engineering, Emeritus, The Ohio State University, Life Fellow IEEE*), изложенная в его книге «Metamaterials: Critique and Alternatives» (Издательство John Wiley & Sons, Inc., 2009). В предисловии к книге автор пишет « Я хотел бы, чтобы читатели поняли, что я безоговорочно поддерживаю развитие метаматериалов в целом. Только в случаях, когда навязываются нереальные представления, такие, как например, отрицательный коэффициент преломления, я категорически возражаю». Далее автор рассуждает, могут ли основные свойства метаматериалов основываться на существовании искусственных структур с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями или возможен альтернативный подход, основанный на предположении положительности этих параметров искусственных сред. Поскольку проблема является в большой мере философской, вряд ли можно дать однозначное толкование проблемы. Тем не менее, подход автора является интересным и в ряде случаев полезным. Далее обсудим наиболее интересные утверждения автора.

## Вопрос, сформулированный Б. Мунком: Почему периодические структуры не могут обеспечить отрицательный коэффициент преломления?

К основным свойствам, которыми обладают метаматериалы, характеризующиеся отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостями, принято относить следующие:

1. Существует отрицательный показатель преломления.
2. Фаза сигнала, движущегося от источника, опережает его.
3. Исчезающие (evanescent) волны усиливаются по мере удаления от источника.

4. В то время как компоненты поля E- и H- в обычных материалах образуют правую тройку векторов совместно с вектором направления фазовой скорости, в метаматериалах с отрицательными  $\mu$  и  $\epsilon$  эти параметры образуют левую тройку векторов.

Автор обсуждает проблему возникновения обратной волны в искусственных средах, образованных периодическими структурами, которые можно рассматривать как однородные [2]. Последнее свойство реализуется в структурах, содержащих элементы, расстояние между которыми не превосходит  $0,4 \lambda$ . При рассмотрении упрощенной задачи распространения плоской волны в такой среде, которую можно рассматривать как дифракционную решетку, возможно возникновение нежелательного дифракционного максимума, в направлении которого движется «обратная волна», т.е. волна, у которой фазовая скорость направлена к источнику электромагнитной волны. Этот дифракционный максимум формируется при условии, что расстояние между элементами больше  $0,5 \lambda$ , что противоречит условию однородности искусственной среды. Это позволяет автору [2] сделать вывод, что в искусственной среде, которая определена как однородный метаматериал, невозможно распространение обратной волны. В то же время, хорошо известны микроволновые устройства, такие, как, например лампа обратной волны, которые используются в качестве СВЧ генераторов и в которых электромагнитная волна распространяется в направлении, обратном распространению электронного пучка. Мунк утверждает, что это как раз случай использования специфического дифракционного максимума.

В метаматериалах, которые к настоящему моменту считаются классическими, для формирования обратной волны используются искусственные среды с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Электродинамика сред с отрицательными  $\mu$  и  $\epsilon$  была рассмотрена теоретически В.Г. Веселаго [3], которого в современном научном мире считают основоположником науки о метаматериалах, хотя эти идеи высказывались различными учеными гораздо ранее. Основное свойство метаматериалов, для которых  $\mu < 0$  и  $\epsilon < 0$ , - наличие отрицательного показателя преломления:

$$n = -\sqrt{\mu\epsilon} .$$

Экспериментальное подтверждение существования отрицательного  $n$  было получено в [4] для трехмерной структуры, сформированной решеткой из расщепленных колец (splitting resonator, SRR) и системой параллельных проволочек. Следует отметить, что все 4 пункта, перечисленные выше, имеют место в действительности и не противоречат существованию отрицательных  $\mu$  и  $\epsilon$  в природных материалах. Хорошо известно, что в магнитных материалах вблизи ферромагнитного резонанса магнитная проницаемость

становится отрицательной в ограниченной частотной области. То же самое наблюдается в диэлектрических материалах с отрицательной диэлектрической проницаемостью вблизи резонанса колебаний кристаллической решетки. Отличие метаматериалов от этих естественных материалов заключается в том, что мы искусственно формируем среду, компоненты которой проявляют резонансные свойства, и в ограниченной частотной области наблюдаются отрицательные значения  $\mu$  и  $\varepsilon$ . Примером могут служить чисто диэлектрические материалы, образованные резонансными диэлектрическими частицами, в которых возбуждаются магнитный и/или электрический резонанс типа Ми и формируется система магнитных и/или электрических диполей [5,6]. Моделирование доказывает существование в таких структурах обратной волны, которая, в отличие от концепции Мунка, не связана с наличием дифракционного максимума.

В докладе будут представлены и другие положения концепции Мунка, которые, пожалуй, не представляются дискуссионными. Скорее это физические явления разной природы, объединенные некоторыми общими проявлениями.

В заключение я привожу оригинальный текст заключения, приведенного в книге.

I should like to emphasize that I am actually quite tolerant of what I consider a major misconception. I can even tolerate the fact that a great deal of money has been spent on this subject even if it could have been better spent otherwise. However, my deepest concern is that young, talented students are being led into this area without being told that this subject is controversial (дискуссионный). In fact, as shown in this book, negative indexes of refraction may not exist. And that implies no time advance and no amplification of evanescent waves.

Несмотря на полное отрицание Б. Мунком существования отрицательной рефракции, усиления исчезающих волн и отрицательной фазовой скорости, следует согласиться с интерпретацией ряда экспериментальных фактов в иной трактовке.

#### Библиографический список

1. Вендик, И.Б. *Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор)* / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик / ЖТФ, т.83, вып. 1, с. 3-29, 2013.
2. Ben A. Munk, *Metamaterials: Critique and Alternatives*, John Wiley & Sons, Inc., 2009
3. Веселаго В.Г. // УФН. 1967. Т. 92, Вып.3. С. 517- 526.
4. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. No. 18, P. 4184–4187.
5. Вендик И.Б., Вендик О.Г., Гашинова М.С. // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т. 32, Вып. 10. С. 30 – 37.
6. Vendik I.B., Vendik O.G., and Odit M.A. in *Theory and Phenomena of Metamaterials, Metamaterial Handbook*, / Ed. F. Cappolino. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2009. P. 21-1 – 21-32.