

## ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 537.876

DOI: 10.17223/00213411/66/1/87

## О РЕФРАКЦИИ В МЕТАМАТЕРИАЛ С ПОТЕРЯМИ И ФОРМУЛАХ КЕТТЕЛЕРА\*

В.В. Фисанов<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова  
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Формулы Кеттелера, применяемые для описания волнового распространения в проводящей среде, обобщаются на метаматериалы как эффективные изотропные электромагнитные среды с электрическими и магнитными потерями. Указан критерий разграничения прямых и обратных неоднородных волн, приведены решения уравнений Кеттелера, в том числе для волн, преломленных в метаматериал из вакуума. Отмечен случай прохождения волной границы сред без отклонения от направления падения.

**Ключевые слова:** изотропные среды с потерями, метаматериалы, прямые и обратные неоднородные волны, вектор рефракции, идентификатор типа волны, формулы Кеттелера.

Плодотворная концепция электромагнитных метаматериалов [1] стимулировала зарождение трансформационной оптики и других актуальных направлений электродинамики. С «дважды отрицательными» прозрачными средами, известными также как «среды Веселаго», связаны явления отрицательного преломления, плоской линзы, методы электромагнитной маскировки и оптических иллюзий [2, 3]. В приближении изотропной эффективной среды электромагнитные метаматериалы обычно характеризуются вещественными скалярами диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостей, значения которых теоретически не имеют ограничений по знаку и по абсолютной величине. Однако реальные образцы метаматериалов неизбежно обладают потерями, вследствие чего проницаемости принимают комплексные значения, а распространение волн значительно усложняется, сопровождаясь ослаблением амплитуды (неоднородные волны). Изучение волновых процессов в поглощающих средах стимулируется также предсказанием эффектов волновой фокусировки [4]. В работе [5] было отмечено, что предложенный Веселаго критерий отрицательного преломления применительно к неоднородным волнам следует пересмотреть.

Во второй половине XIX в. немецкий физик Эдуард Кеттелер постулировал, что распространяющаяся в поглощающей среде плоская волна характеризуется не только направлением распространения, но и направлением ослабления, которые являются соответственно нормальными к плоскости равных фаз и плоскости равных амплитуд [6, 7]. Он предложил систему двух соотношений, назвав их главными уравнениями теории поглощающих сред, согласно которым «в каждой поглощающей среде на любой длине волны заданный угол между нормальными экстинкции и распространения связан с определенным значением показателя ослабления и показателя преломления, и, следовательно, скорость распространения и сила ослабления также зависят от этого угла» [7, с. 126]. Эти соотношения в дальнейшем стали называться уравнениями Кеттелера [8, с. 197].

Цель настоящей работы – уточнить использование формул Кеттелера применительно к метаматериалам, приняв во внимание возможность распространения не только прямых нормальных волн (как, например, в оптике металлов [9]), но и обратных волн, с которыми связано явление отрицательного преломления.

Для описания бегущей плоской монохроматической электромагнитной волны с круговой частотой  $\omega$  воспользуемся показательной функцией  $\exp\left[i\frac{\omega}{c}(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r} - ct)\right]$ , где  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор,  $t$  –

\* Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и частично по проекту Государственного задания Минобрнауки России (проект № 0270-2021-0002).

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>