

# РАССЕЯНИЕ ГАУССОВОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА НА СЛОЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

Одаренко Е. Н.<sup>1</sup>, Свич В. А.<sup>2</sup>, Шматько А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиозлектроники  
пр. Ленина, 14, Харьков, 61166, Украина  
тел.: (057) 7021057, e-mail: oen@kture.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина  
пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина  
тел.: (057) 7075133, e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

**Аннотация** — Исследуются закономерности рассеяния гауссового волнового пучка на плоском слое из метаматериала с отрицательным и мнимым показателем преломления. Теоретический анализ проводится на основе разложения поля пучка в угловой спектр плоских волн. Рассмотрены режимы распространения поля в слое для различных значений параметров системы.

## I. Введение

Гауссовы волновые пучки являются общепринятой моделью для представления пространственного распределения поля излучения рупорных антенн и лазерных источников. Развитые методы анализа закономерностей взаимодействия волновых пучков с различными материальными средами позволяют создавать эффективные модели для исследования и разработки устройств управления характеристиками локализованных в пространстве электромагнитных полей [1]. Новые возможности в этом плане предоставляет применение одной из разновидностей искусственных сред, получившей обобщающее название метаматериалы [2]. Основной особенностью метаматериалов являются необычные закономерности их взаимодействия с электромагнитными волнами, обусловленные изменением знака материальных параметров. В настоящее время наиболее интенсивно проводятся исследования «левых» или «лево-сторонних» сред с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости [2, 3]. Вместе с тем, представляет интерес также изучение взаимодействия электромагнитных полей с метаматериалами,

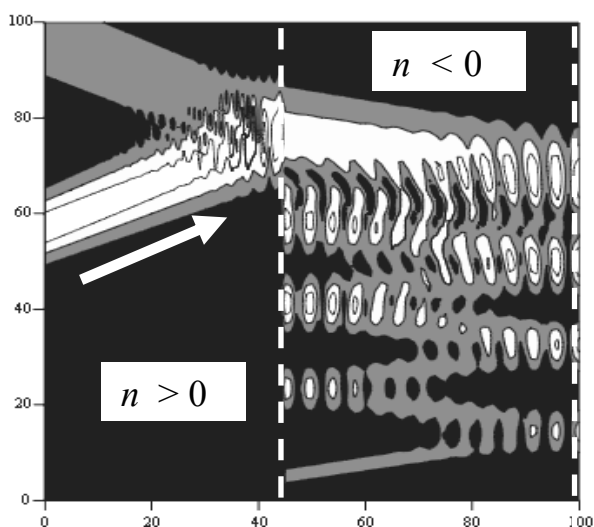
имеющими только один отрицательный материальный параметр. Такие среды можно охарактеризовать как ферритоподобные (отрицательная эффективная магнитная проницаемость) и плазмоподобные (отрицательная эффективная диэлектрическая проницаемость). В оптическом диапазоне отрицательную диэлектрическую проницаемость также могут иметь некоторые металлы.

В данной работе теоретически исследуются закономерности рассеяния гауссового волнового пучка на плоском слое метаматериала. Рассматривается несколько вариантов искусственной среды: «лево-сторонняя», плазмоподобная и ферритоподобная. Основное внимание уделено моделированию пространственного распределения поля пучка в пределах слоя.

## II. Основная часть

Анализ взаимодействия волнового пучка с плоским слоем проводится на основе разложения электромагнитного поля в угловой спектр плоских волн. Спектральным параметром в этом случае является поперечное волновое число. В рамках данного подхода для расчета поля волнового пучка достаточно знать решение задачи о рассеянии плоской монохроматической волны на однородном слое из метаматериала.

В случае наклонного падения волнового пучка на слой материала с отрицательным показателем преломления реализуется ряд эффектов, присущих плоским волнам: отрицательное преломление, фор-



Res

Рис. 1. Распределение поля волнового пучка при падении на слой метаматериала.

Fig. 1. Wave beam field spatial distribution

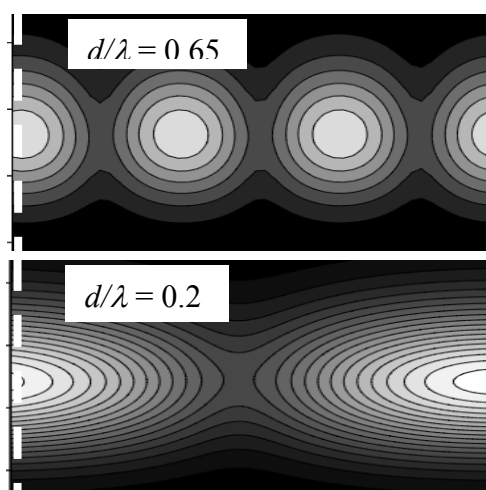


Рис. 2. Распределение поля волнового пучка в слое метаматериала.

Fig. 2. Wave beam field spatial distribution inside the metamaterial slab

мирование обратной волны в метаматериале. Наряду с этими явлениями происходит изменение знака радиуса кривизны фазового фронта волнового пучка, что свидетельствует о его фокусировке в пределах слоя. Кроме того, в результате многократных отражений от границы слоя в его пределах происходит направленная передача энергии на обратных волнах. Это иллюстрируется на рис.1, где представлено пространственное амплитудное распределение электрического поля гауссова пучка, падающего на слой, толщина которого  $d$  составляет несколько десятков длин волн. Стрелкой обозначено направление исходного волнового пучка. Штриховые линии обозначают границы слоя. В данном случае плоский слой метаматериала представляет собой сверхразмерный волновод, распространение волн в котором происходит по законам геометрической оптики.

При многократных отражениях в пределах метаматериала знак радиуса кривизны волнового фронта пучка остается неизменным. Следовательно, по мере распространения в волноводе поперечные размеры гауссова пучка будут уменьшаться. В результате фокусировка пучка плоским слоем метаматериала может оказаться более существенной, чем в стандартном случае прохождения пучка поперек слоя той же толщины.

Уменьшение параметра  $d$  сопровождается существенным изменением распределения интенсивности пучка в слое. Фактически происходит преобразование волновода в резонатор с соответствующей модовой структурой поля, обусловленной интерференцией двух обратных волн, которые движутся в противоположных направлениях. В зависимости от параметров системы реализуются объемные и поверхностные резонансы. На рис. 2 представлены соответствующие распределения поля в пределах слоя для различных значений его нормированной толщины.

В плазмоподобной или ферритоподобной средах продольное волновое число становится чисто мнимым и могут распространяться только неоднородные волны с экспоненциально изменяющейся амплитудой. Поэтому в данном случае при падении волнового пучка на слой реализуются только поверхностные резонансы, обусловленные наличием волн, амплитуда которых нарастает по направлению к границам слоя. Обычно такие резонансы ассоциируют с поверхностными плазмонными волнами, которые в данном случае могут распространяться вдоль поверхности слоя.

### III. Заключение

Установлены основные закономерности рассеяния гауссова волнового пучка на плоском слое из метаматериала. В случае слоя с отрицательным показателем преломления возможны волноводные режимы распространения электромагнитного поля, а также объемные и поверхностные резонансы, локализованные в области пространства внутри слоя, занятой полем пучка. Если отрицательный знак имеет только один из материальных параметров слоя, то реализуются только поверхностные резонансы.

### IV. Список литературы

- [1] Одаренко Е. Н., Свич В. А., Шматко А. А. Преобразование поляризации гауссова волнового пучка на слое из метаматериала // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). Материалы конф. В 2-х т. (Севастополь, 14-18 сент. 2009 г.). Севастополь: Вебер, 2009. Т. 2. С. 567—568.

- [2] Solymar L., Shamoniina E. Waves in Metamaterials. Oxford University Press, 2009. 404 p.  
 [3] Marques R., Martin F., Sorolla M. Metamaterials with negative parameters: theory, design and microwave applications. Wiley, 2008. 414 p.

## SCATTERING OF THE GAUSSIAN BEAM BY A METAMATERIAL SLAB

Odarenko E. N., Svich V. A., Shmat'ko A. A.  
 Kharkov National University of Radioelectronics  
 14, Lenin Ave., Kharkov, 61166, Ukraine  
 Ph.: (057) 7021057, e-mail: oen@kture.kharkov.ua  
 Kharkov National University  
 4, Svobody Sq., Kharkov, 61077, Ukraine  
 Ph.: (057) 7075133,  
 e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

**Abstract** — Scattering regularities of the Gaussian beam on the metamaterial slab with negative and imaginary refractive index are investigated. Theoretical analysis is carried out on the base of method of plane-wave spectral decomposition and synthesis. Regimes of the electromagnetic field propagation in the slab are considered for different system parameter values.

### I. Introduction

Gaussian beams represent conventional prototypes for modeling the spatial distribution of the microwave horn and laser sources radiation. Known analysis methods of the wave beam interaction with media allow creating effective models for investigation and development devices for control of the collimated field characteristics. Metamaterials make available new possibilities in this context. Basic particularity of the metamaterials is the unusual regularities of the interaction with electromagnetic waves that caused by changing of the permittivity and permeability sign. Recently, the intensive investigations of the left-handed or double-negative metamaterials with negative refractive index are performed. On the other hand, it is interesting that the investigation of the interaction of the electromagnetic fields with metamaterials for which only one material parameter is negative. Such media are designated a mu-negative (permeability less than zero) and epsilon-negative (permittivity less than zero) media.

In this report theoretical investigation of the Gaussian beam scattering regularities on the metamaterial slab is performed. Some variants of the artificial materials are considered: left-handed (double-negative), epsilon-negative and mu-negative (single-negative) media. Simulation of the Gaussian beam spatial distribution inside the slab is the basic task.

### II. Main Part

Analysis of the Gaussian beam interaction with metamaterial slab is performed on the base of plane-wave spectral decomposition and synthesis method. Transverse wave number is the spectral parameter.

Fig. 1 shows the electric field spatial distribution inside the left-handed slab in the case of obliquely incident of the Gaussian beam. Slab thickness is greater than wave length in vacuum. Dashed lines indicate the slab edges. It is clear that the flow of wave beam power along slab forms as a result of multiple reflections from interface between left-handed and right-handed media.

In the epsilon-negative and mu-negative media longitudinal wave number is imaginary. Thus only inhomogeneous waves can propagate inside the slab and interface resonances are realized.

### III. Conclusion

The main regularities of the Gaussian beam scattering by a metamaterial slab are obtained. For left-handed metamaterial the waveguide regimes of the beam field propagation are possible and also cavity and interface resonances are realized inside the slab. For single-negative metamaterial only interface resonances are possible.