

**И.В. Семченко<sup>1</sup>, С.А. Хахомов<sup>1</sup>, А.М. Гончаренко<sup>2</sup>, Г.В. Сеницын<sup>2</sup>,  
А.Л. Самофалов<sup>1</sup>, М.А. Подалов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИХ МЕТАЛПОЛИМЕРНЫХ ВЫСОКОПОГЛОЩАЮЩИХ НЕОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТГц ДИАПАЗОНА**

Экспериментальные исследования свойств метаматериалов проводились в основном в МГц и ГГц диапазонах, где резонансные элементы метаматериала должны иметь миллиметровые и сантиметровые размеры, и формирование трехмерных элементов, а также их расположение в виде трехмерных массивов не представляет значительной сложности. В настоящее время наблюдается тенденция к созданию и исследованию метаматериалов для ТГц диапазона, поскольку техника ТГц диапазона активно развивается и вместе с тем ассортимент электромагнитных свойств существующих материалов в этом диапазоне очень небогат, например, отсутствуют материалы с эффективными нелинейными, киральными и др. свойствами, широко используемые в оптическом диапазоне. Поэтому концепция метаматериалов особенно востребована в ТГц диапазоне.

Для метаматериалов терагерцового диапазона искусственные элементы-резонаторы должны иметь характерные размеры порядка единиц-десятков микрон, чтобы оставаться существенно меньшими длины волны электромагнитного излучения. Для получения согласованного отклика все резонаторы огромного массива должны быть очень точно настроены. Из широко применяемых технологий требуемые размеры и точность обеспечивает только традиционная планарная технология, которая позволяет формировать плоские элементы и их слои. Свойства такого метаматериала из плоских элементов принципиально невозможно задавать во всех трех измерениях. Кроме того, в большинстве экспериментов исследователям приходится ограничиваться одним слоем элементов (т. е. монослоем метаматериала) из-за ограничений планарной технологии, что затрудняет изучение объемных электромагнитных свойств. В то же время, практически все востребованные применения метаматериалов требуют объемных метаматериалов с трехмерными заданными электромагнитными свойствами.

Принципиальная новизна и научное значение создания метаматериалов из трехмерных оболочек, формируемых из напряженных нанопленок [1–2], заключается в переходе от двумерных элементов-резонаторов к трехмерным, прецизионности размеров резонаторов (вплоть до атомарного уровня) с характерными размерами от микрометров до нанометров, разнообразии возможных форм и материалов элементов-резонаторов (диэлектрики, металлы, полупроводники). С помощью трехмерных конструкций оболочек-резонаторов электромагнитный отклик метаматериала задается во всех трех измерениях, что является новым шагом в области метаматериалов для ТГц диапазона и позволяет создавать метаматериалы с принципиально новыми свойствами.

Данная технология в настоящее время может обеспечить массовое формирование ТГц-метаматериалов на основе гладких резонансных трехмерных спиралей, в том числе объемных метаматериалов.

Помимо гладких резонансных трехмерных спиралей, в качестве структурного элемента бианизотропной среды могут выступать, например, элементы в виде греческой буквы «омега». Структура с парными омега-элементами довольно сложна для реализации, так как из-за особенностей технологии предпочтительнее изготовление металлических элементов на рельефе без поверхностей с обратным наклоном.

С целью удовлетворения требованиям технологии можно провести аналогию используемого элемента с греческой буквой «омега» прямоугольной формы, либо с формой, близкой к букве «П». Можно изготовить и разместить чередующиеся и повернутые то вверх, то вниз элементы в виде буквы «П», и чтобы сбалансировать возникающие в них электрический и магнитный дипольные моменты, необходимо будет менять параметры элемента.

Другой вариант – наклонные омега-элементы прямоугольной формы, тогда тоже нет области отрицательного наклона. Можно изготовить, например, трехгранную полимерную пирамиду, а на каждой боковой грани разместить по металлическому омега-элементу прямоугольной формы (рисунок 1). Можно изготовить правильный тетраэдр, металлические омега-элементы ориентировать на каждой грани с поворотом на 60 градусов. Используя дополнительный слой и оптическое совмещение, можно разместить металлический омега-элемент и на основании пирамиды, однако в этом случае необходимо изготовление дорогостоящих кварцевых шаблонов для импринта и использование технологии штамповки.

Нами предложена плоская структура для создания идеального поглотителя в ТГц диапазоне. Элементом такой структуры является плоский элемент в виде греческой буквы омега прямоугольной формы (рисунок 2).

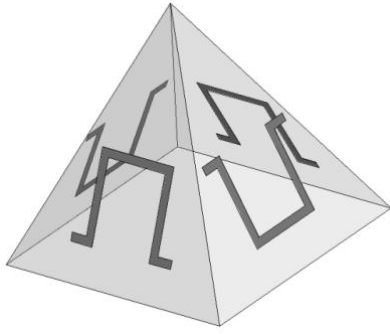


Рисунок 1 – Трехгранная полимерная пирамида

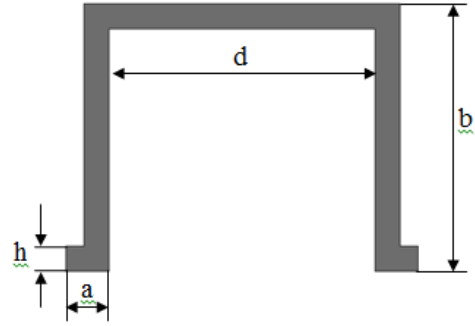


Рисунок 2 – Омега-элемент прямоугольной формы

Характеристики электромагнитного излучения, рассеянного на таком элементе, зависят от соотношения геометрических параметров  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $h$  (рисунок 2) и длины волны  $\lambda$ . Нами рассмотрен случай, когда линейные геометрические размеры омега-элемента значительно уступают по величине длине волны падающего излучения, что позволяет применить дипольное приближение теории излучения. Для этого случая найден электрический дипольный и магнитный моменты, возникающие в омега-элементе под действием падающей электромагнитной волны.

Одновременное возникновение в элементе не только электрического дипольного, но и магнитного моментов, связанных между собой и индуцированных внешним полем, является главным условием проявления свойств такой структуры. Рассмотрен случай при  $b = d$ , то есть форма элемента близка к квадрату. В этом случае площадь, ограниченная элементом, относительно велика, и возникающий магнитный момент имеет значительную величину. При этом мы считаем толщину полоски  $h$  пренебрежимо малой по сравнению с длиной сторон  $b$  и  $d$  (рисунок 2). Используя условие главного частотного резонанса и универсальное соотношение для компонент электрического дипольного и магнитного моментов, полученное нами в работе [3], можно вычислить параметры омега-элемента  $a$  и  $b$ :

$$a = \frac{\lambda}{4\pi} 0,03632, \quad b = \frac{\lambda}{2\pi} 1,03509.$$

На основании приведенных выражений найдены численные значения  $b$ ,  $d$  и плеча  $a$  омега-элемента прямоугольной формы для частоты 1 ТГц ( $\lambda=300$  мкм):  $b=d=49,49$  мкм;  $a=0,8675$  мкм.

Так как технология нанесения проводящего материала на диэлектрическую подложку дорога и трудоемка, необходимо провести тщательное моделирование поглощающих свойств структуры, состоящей из омега-элементов прямо-

угольной формы с рассчитанными параметрами. Наиболее подходящей программой для проведения такого моделирования является программа электродинамического моделирования Ansoft HFSS 13 версии [4].

В программе Ansoft HFSS создан проект поглощающей структуры, состоящей из проводящих омега-элементов прямоугольной формы с рассчитанными параметрами (рисунок 3). В проекте реализована возможность изменения следующих параметров структуры (рисунок 3):  $s$  характеризует расстояние между омега-элементами в «ячейке»;  $l$  характеризует расстояние между «ячейками» в массиве. Также реализована возможность изменения направления плеч омега-элементов (внутрь или наружу) и толщины проводящего слоя  $h$ .

Из рисунка 2 видно, что скорость диссипации энергии БСП осциллирует и убывает с ростом значения радиальной координаты, что связано с модулирующим действием функции Бесселя.

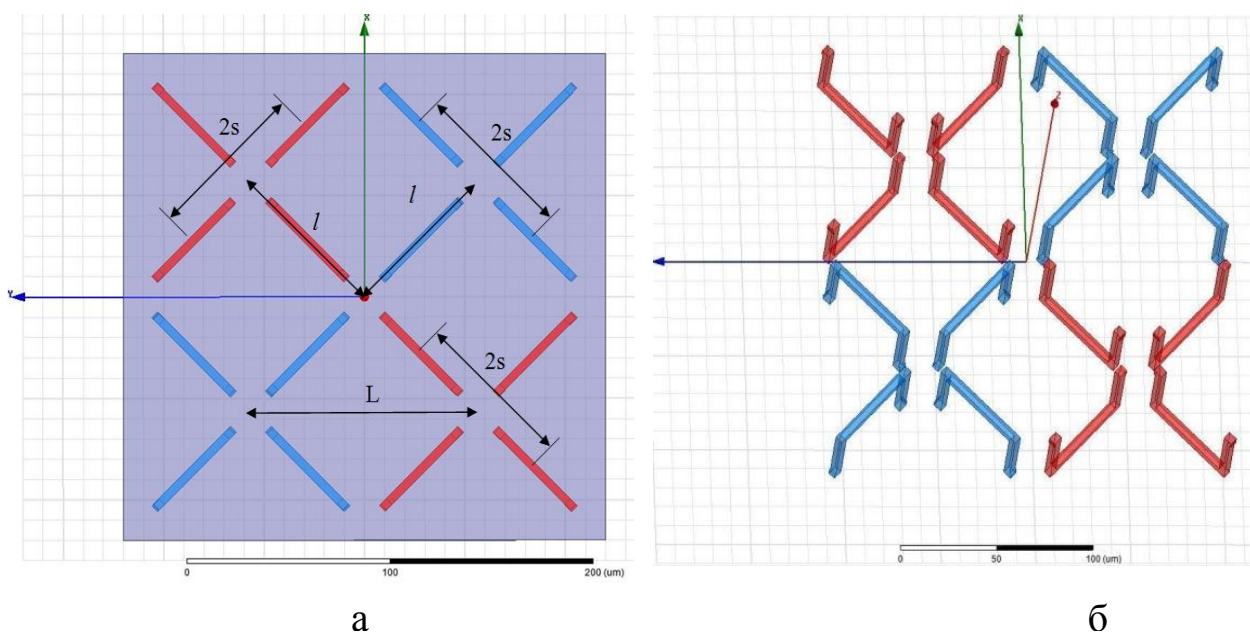


Рисунок 3 – Структурный элемент поглощающей среды в ТГц диапазоне, состоящей из парных омега-элементов прямоугольной формы (а – вид сверху, б – вид в 3D)

При решении поставленной задачи рассматривалась нормально падающая плоская волна. В нашем случае мы имеем две линейно поляризованные волны со взаимно перпендикулярными поляризациями. В терминологии, принятой в HFSS, эти две волны обозначены как моды ТМ (магнитная) и ТЕ (электрическая). С целью поиска оптимальных параметров расположения омега-элементов в ячейке и ячеек в структурном массиве проведено моделирование свойств поглощающего слабо отражающего двумерного массива при различных значениях  $s$  и  $l$ . Дополнительно исследованы поглощающие свойства мас-

сива для различных материалов омега-элементов (нихром, медь, золото) и при различной толщине проводящего слоя.

На рисунке 4 приведен график частотной зависимости коэффициента поглощения (мода TE) электромагнитной волны для различных значений  $l$ , при которых наблюдался максимум поглощения.

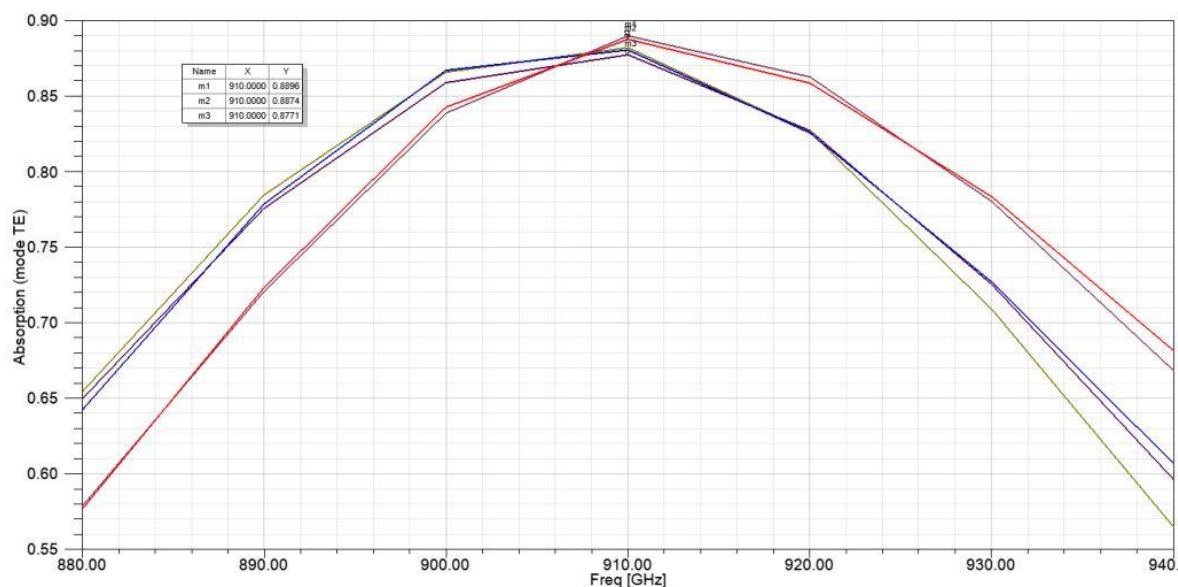


Рисунок 4 – Частотная зависимость коэффициента поглощения (мода TE) электромагнитной волны для различных значений  $l$  (от 147 до 155 мкм с шагом в 2 мкм) при  $s = 40$  мкм (максимальное значение коэффициента поглощения 0,8 896 наблюдается на частоте 0,91 ТГц при  $l = 149$  мкм)

Следует отметить, что для моды ТМ максимальное значения коэффициента поглощения (0,889) получено при таких же параметрах структуры, как и для моды TE, что согласуется с симметрией структуры.

При изменении толщины сечения проводящего слоя  $h$  (квадратное сечение) наблюдалось смещение частоты пикового поглощения (при уменьшении сечения частота пикового поглощения увеличивалась, и, наоборот), при этом изменялось и максимальное значение коэффициента поглощения. Оптимальным оказалась толщина сечения проводящего слоя, равная 4 мкм. При сравнении различных материалов проводника (нихром, медь, золото) наилучший результат был получен для нихрома.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований договор с БРФФИ №Ф15СО-047 от 20.07.2015.

## Литература

1. Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays / V.Ya. Prinz [et al.] // Physica E. – 2000. – Vol. 6. – P. 828.

2. Структура с киральными электромагнитными свойствами и способ ее изготовления (варианты): Патент Рос. Федерации № 2317942 / Е.В. Наумова, В.Я. Принц. – 2008.

3. Излучение циркулярно поляризованных СВЧ волн плоской периодической структурой из  $\Omega$ -элементов / И.В. Семченко [и др.] // Радиотехника и электроника. – Т. 52. – № 9. – 2007. – С. 1084–1088.

4. Банков, С.Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С.Е. Банков, Э.М. Гутцайт, А.А. Курушин. – М: ООО «Оркада», 2012. – 250 с.