

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОФИЗИКИ

**Труды Международной
молодежной научной школы**

Томск, 25–26 сентября 2017 г.



**ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2017**

Модель структуры метаматериала для микроволн

А.В. Горст, А.С. Мироньчев, В.П. Якубов

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Метаматериалы – перспективное направление развития в различных сферах [1, 2]. Также такие материалы способствуют проявлению новых свойств [3].

В предшествующих публикациях [4, 5] авторами была показана возможность создания метаматериалов из замкнутых кольцевых проводников, ориентированных определенным образом, помещенных в пенополистирол. Создание таких структур – процесс длительный и трудоемкий. Макет из кольцевых проводников достаточно тяжел, его вес составляет 500 г. Точность изготовления такой структуры неидеальна из-за ручного изготовления. Было предложено разработать такие элементы, при изготовлении которых, человеческий фактор оказывал бы наименьшее влияние, тем самым обеспечивая минимальное расхождение параметров макета и модели.

Создание новых элементов основывалось на простоте изготовления и усилении эффекта обратного фазового набега в сравнении с моделью из кольцевых проводников. В основу структуры были выбраны треугольные элементы с отверстием в центре (рис. 1). Зазор между такими элементами вдоль оси OY можно рассматривать как магнитный диполь Герца, или как щелевую антенну и оказывать существенное влияние на магнитную составляющую поля. Сам же элемент по всей своей длине вдоль оси OY можно рассматривать как набор электрических диполей разной длины. Соответственно это будет оказывать влияние на электрическую составляющую поля. Отверстия в треугольных элементах выступают в роле колец, которые являются комбинированными излучателями и взаимодействуют как с электрической, так и с магнитной компонентами поля, обеспечивая при этом наличие отрицательных намагничиваемости и поляризуемости. Для обеспечения повторяемости элементов и простоты их изготовления решено выполнить их на основе печатных плат. Такой же метод изготовления структур используют и другие исследователи [6].

Моделирование такой структуры производилось с помощью программного обеспечения CST Microwave Studio. Программа CST Microwave Studio использует метод конечных интегралов (FIT) – достаточно

общий подход, который сначала описывает уравнения Максвелла на пространственной сетке, с учетом закона сохранения энергии, а затем по ним формирует систему специфических дифференциальных уравнений, таких как волновое уравнение или уравнение Пуассона. Метод может быть реализован как во временной, так и в частотной области. Для нашего случая мы используем временную область.

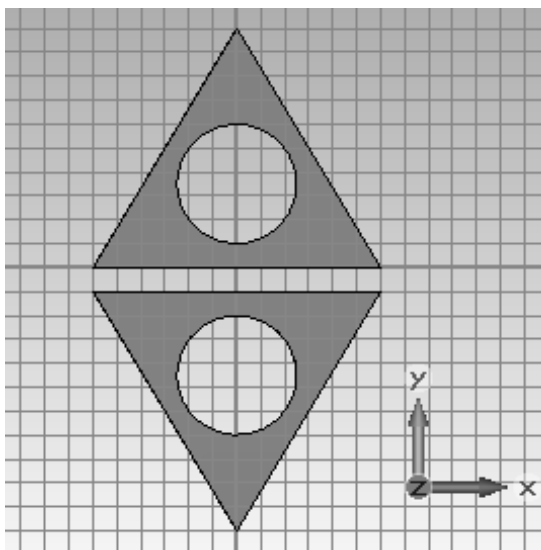


Рис. 1. Модель треугольного элемента

Модель структуры состояла из 1344 элементов (рис. 2). Геометрические параметры элементов следующие: равносторонний треугольник с длиной стороны – 12 мм, радиус отверстия – 2,5 мм, расстояние между треугольниками – 1 мм, толщина элемента – 0,1 мм. Расстояние между элементами вдоль оси OX – 3 мм, вдоль оси OY – 1 мм, вдоль оси OZ – 3 мм. Элементы располагались зеркально на слое диэлектрика ($\epsilon = 3,5$) толщиной 1 мм. Материал элементов – идеальный проводник, область вокруг решетки – вакуум, граничные условия – открытое пространство, моделировалось падение плоской волны вдоль оси OX , вектор напряженности электрического поля направлен вдоль оси OY , вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси OZ , в виде импульсного сигнала широкого диапазона частот 1–10 ГГц.

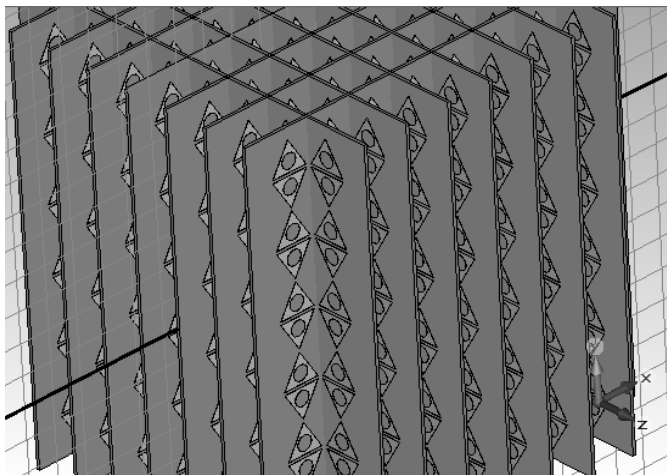


Рис. 2. Модель решетки из треугольных элементов

Вдоль черной линии (рис. 2), проходящей через центр структуры, снимались необходимые данные, такие как амплитуда и фаза поля. Далее для обработки данные импортировались в математический продукт Mathcad 14, где осуществлялись необходимые расчеты. На рис. 3 представлен график амплитудного распределения поля на частоте 4 ГГц.

На графике (рис. 3), до слоя наблюдаются осцилляции, связанные с интерференцией падающей и отраженной волны. Границы структуры отмечены пунктирными вертикальными линиями. Она имеет толщину в 117 мм. В слое осцилляции возникают за счет многократных переотражений волн от границ слоёв, каждый скачок амплитуды внутри структуры соответствует слою, стоящему на пути волны. За слоем наблюдается достаточно большое значение амплитуды, которая уменьшается с увеличением расстояния от структуры. Это связано с тем, что представленная зависимость снята вдоль линии, проходящей через центр структуры, поэтому можно говорить о присутствии волн от краев структуры. В целом это проявление сложных процессов взаимодействия плоской волны с неоднородной структурой. За слоем наблюдается квазифокусировка. На расстоянии 200 мм от центра модели наблюдается свободная волна, схожая с падающей.

На рис. 4 представлен график фазового распределения электрического поля на частоте 4 ГГц от расстояния области расчета вдоль линии. До слоя можно заметить осцилляционный характер, который свя-

зан с интерференцией падающей и отраженной волн, как и в случае с амплитудным распределением поля. Внутри слоя наблюдается отрицательный фазовый набег, который свидетельствует об уменьшении показателя преломления. За слоем проходит свободная волна.

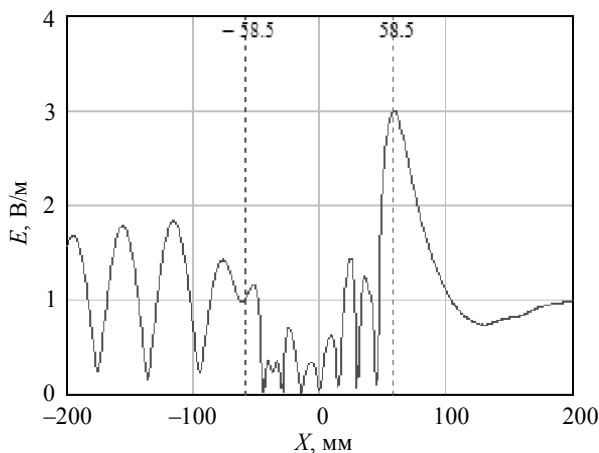


Рис. 3. Амплитудное распределение напряженности электрического поля вдоль прямой на частоте 4 ГГц

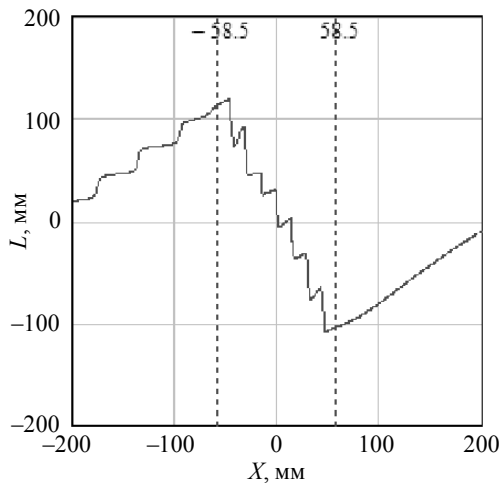


Рис. 4. Фазовое распределение электрического поля вдоль прямой на частоте 4 ГГц

Для расчета вещественной части эквивалентного показателя преломления используем формулу

$$n = \frac{\Delta L}{d}, \quad (1)$$

где $\Delta L = l_2 - l_1$ – набег волны в слое, d – толщина структуры из треугольных элементов. Для расчета n значения l_1 и l_2 берем на границах структуры. Вещественная часть эквивалентного показателя преломления для нашей структуры на частоте 4 ГГц $n = -2,8$.

Отрицательное значение получилось не только на 4 ГГц. На рис. 5 представлен график вещественной части эквивалентного показателя преломления для полосы частот 3–7 ГГц.

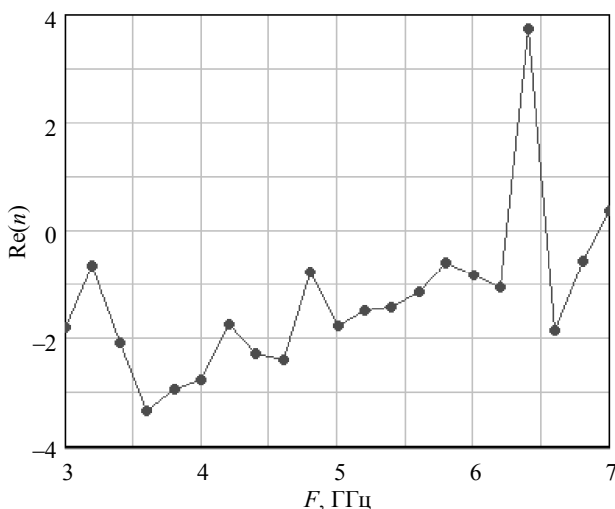


Рис. 5. Зависимость вещественной части эквивалентного показателя преломления от частоты

Точками на графике отмечены расчетные значения эквивалентного показателя преломления. Расчет проводился с шагом в 0,2 ГГц. Минимальное значение эквивалентного показателя преломления составляет $-3,4$ на частоте 3,6 ГГц. Как видно, график имеет изрезанный нарастающий характер, но легко заметить, что значения отрицательны для полосы частот 3–6,2 ГГц. На частоте 6,4 ГГц происходит резкое увели-

чение вещественной части эквивалентного показателя преломления до $n = 3,7$. Далее мы видим точно такое же резкое уменьшение. Предположительно это связано с резонансом, на котором элементы взаимодействуют таким образом, что слой становится диэлектриком.

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что структура из треугольных элементов с вырезом в центре схожа со структурой из кольцевых проводников по значениям реальной части эквивалентного показателя преломления, но работает в большем диапазоне частот и проста в изготовлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсар В.* // Электроника. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 44–60.
2. *Cai W., Chettiar U.K., Kildishev A.V., and Shalaev V.M.* // Nat Photon. – 2007. – V. 1. – No. 1. – P. 224–227.
3. *Alù and N. Engheta* // Phys. Rev. – 2008. – V. 78. – No. 14. – P. 1–34.
4. *Клоков А.В., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Горст А.В., Мироньчев А.С.* // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции: в 2 ч. – 2014. — Ч. 1. – С.146–149.
5. *Якубов В.П., Андреев А.Г., Пономарева И.О., Мироньчев А.С.* // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 17–20.
6. *Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., and Stewart W.J.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999. – V. 47 – No. 11. – P. 2075.

Горст Александр Владимирович, магистрант; gorst93@gmail.com;

Мироньчев Александр Сергеевич, инженер; mironchev42@mail.ru;

Якубов Владимир Петрович, д.ф.-м.н., профессор; yvlp@mail.tsu.ru.