

**И.В. Семченко¹, С.А. Хахомов¹, А.Л. Самофалов¹, И.А. Фаняев¹,
Д.В. Слепенков¹, А.М. Гончаренко², Г.В. Сеницын²,
Н.С. Ковальчук³, А.Н. Петлицкий³, В.А. Солодуха³**

¹УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

³ОАО «ИНТЕГРАЛ» Минск, Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОМЕГА-ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ МИНИМАЛЬНОМ ОТРАЖЕНИИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН

Теория и способы реализации устройств-поглотителей электромагнитного излучения имеют давнюю историю. Существует большое количество таких устройств, особенно в СВЧ диапазоне [1-3]. Однако в большинстве таких устройств поглощающая структура располагается на отражающей металлической поверхности, так как наиболее частой целью создания таких устройств является уменьшение отражения волн от металлических поверхностей.

Электрически тонкие поглотители могут быть реализованы различными способами, но только некоторые из них были изучены не так давно. Один из способов – объединение двух тонких слоёв метаматериалов с контрастными материальными параметрами [4]. Ещё один способ – объединение тонкого проводящего листа с массивом резонансных разомкнутых колец, который создаёт необходимый магнитный отклик [5], а также многослойные поглощающие структуры с металлической подложкой [6,7]. В работе рассматривается самый простой вариант – однослойный поглотитель. Такой выбор позволяет называть толщину поглотителя предельно тонкой, так как толщина слоя не может быть меньше толщины одного слоя частиц, составляющих метаматериал. В данной работе мы рассмотрим реализацию однослойного метаматериала, который бы полностью поглощал падающие электромагнитные волны в ТГц диапазоне частот и при этом являлся слабо-отражающим.

Условия полного поглощения нормально падающей плоской волны бесконечным периодическим массивом электрических и магнитных диполей известны из антенной теории [7]. Период бесконечного массива равен p (величина p меньше длины волны излучения в окружающем пространстве), каждая ячейка массива содержит одну одноосную электрически поляризуемую частицу и одну одноосную магнитно-поляризуемую частицу. Представляет интерес коэффициент поглощения как при нормальном, так и при наклонном падении волн на поглотитель. Традиционные поглотители, состоящие по крайней мере из двух слоёв, имеют некоторую толщину. Как следствие, при отклонении угла падения волны от нормального резонансная частота массива смещается. Так происходит, потому что эффективная толщина поглощающего слоя изменяется для волн, падающих под различными углами. Однако рассматриваемый тип поглотителя представляет собой предельно тонкий слой, поэтому ожидается, что сильное изменение резонансной частоты не будет наблюдаться при изменении угла падения волны. Тем не менее, изменение угла падения будет влиять на взаимодействия волн в структуре и как следствие, на эффективность поглощения.

Используя аналитический подход, описанный в работе [2], можно определить искомые компоненты поляризуемостей электрически малого проводника произвольной формы. Этот подход основан на определении полей рассеяния при возбуждении плоской линейно поляризованной падающей волной при различных направлениях и азимутах поляризации. При использовании данного подхода и компьютерного

моделирования на основе метода конечных элементов были определены поля рассеяния и, как следствие, искомые компоненты тензоров поляризуемостей омега-резонатора.

На рисунке 1(а, б) показан вид Ω -резонатора со структурными параметрами и его поляризуемости для ТГц диапазона частот. Путем изменения структурных параметров омега-элемента удалось достичь баланса поляризуемостей. Как видно, данный Ω -резонатор является сбалансированным и проявляет резонансные свойства вблизи частоты 1 ТГц, поскольку индуцируемые электрические и магнитные дипольные моменты являются одинаково значимыми и вносят одинаковый вклад в излучение электромагнитной волны. Следует отметить, что электромагнитные и магнитоэлектрические поляризуемости являются также приблизительно равными друг другу с высокой степенью точности. Следовательно, данный Ω -резонатор со сбалансированными поляризуемостями полностью удовлетворяет условию отсутствия отражения терагерцовых волн.

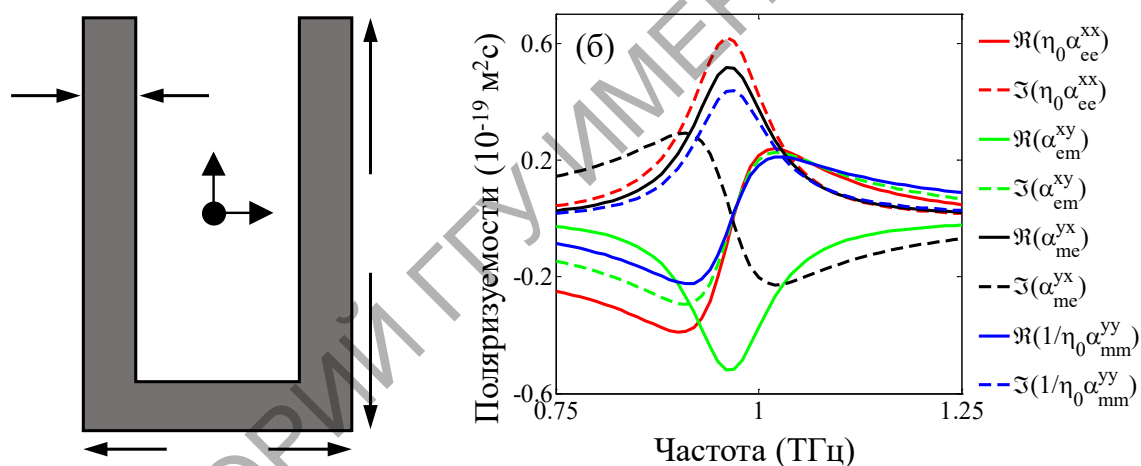


Рисунок 1 – (а) Схематическое изображение Ω -резонатора со структурными параметрами: $a = 8$ мкм, $b = 70$ мкм, $d = 1$ мкм. (б) частотная зависимость главных компонент тензоров поляризуемостей одиночного Ω -резонатора в ТГц диапазоне частот

На рисунке 2 показана элементарная ячейка метаповерхности на основе сбалансированных Ω -резонаторов. Расположение резонаторов подобрано таким образом, чтобы скомпенсировать омега-связь (электромагнитную и магнитоэлектрическую связи), как этого требует условие для полного поглощения [3]. В этой конструкции используются Ω -резонаторы из титана с удельной проводимостью $1,82 \cdot 10^6$ См/м, что обеспечивает требуемый уровень диссипативных

потерь. Межэлементное расстояние и период решетки обозначены как $2s$ и p , соответственно.

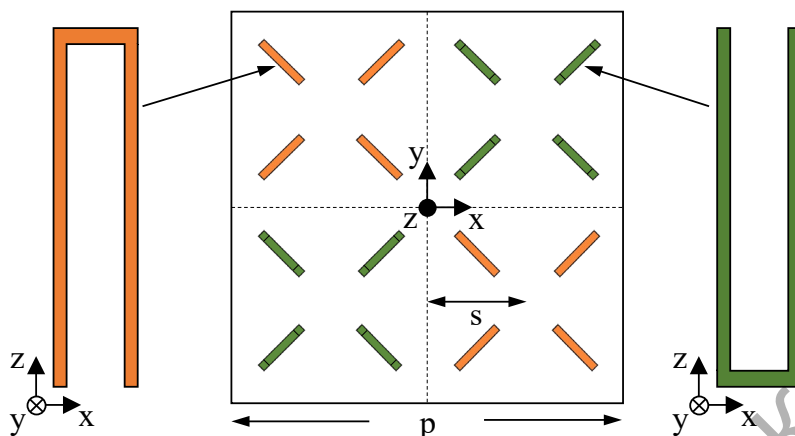


Рисунок 2 – Схематическое изображение элементарной ячейки метаматериала на основе сбалансированных Ω -резонаторов с противоположным направлением «усов»

Проведено моделирование коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A) поглотителя на основе сбалансированных Ω -резонаторов в зависимости от частоты при различном периоде решетки ($p = 4s$), при различной поляризации падающей волны (TE и TM), при различных значениях диаметра используемого проводника и углах падения.

В результате использования компьютерного моделирования были найдены оптимальные параметры метаповерхности (рисунок 3).

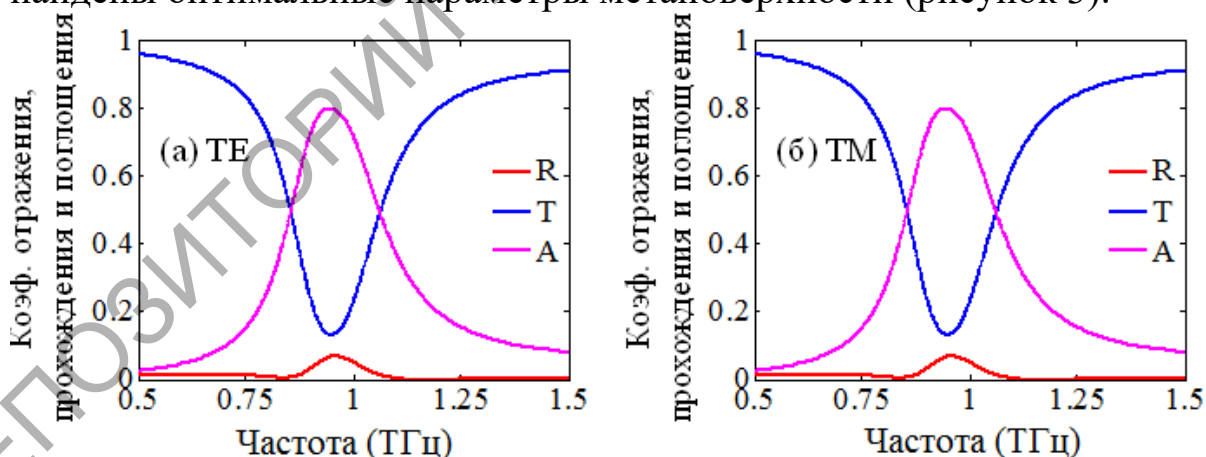


Рисунок 3 – Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения метаматериала на основе Ω -резонаторов с оптимизированными структурными параметрами для TE (а) и TM (б) волн при нормальном падении

Заключение

В результате использования аналитического подхода для определения поляризуемостей электрически малых резонаторов произвольной формы и компьютерного моделирования была смоделирована метаповерхность на основе сбалансированных Ω -резонаторов в ТГц диапазоне частот.

Установлены оптимальные значения межэлементного расстояния и периода элементарной ячейки метаповерхности. Показано, что коэффициент поглощения достигает максимального значения 82% на резонансной частоте 0,95 ТГц, при этом коэффициент отражения не превышает 7% в диапазоне частот от 0,5 до 1,5 ТГц. Показано, что волна полностью проходит через метаматериал вне резонансной полосы частот. Следовательно, предложенный метаматериал на основе сбалансированных Ω -резонаторов проявляет слабо отражающие свойства в исследуемом диапазоне частот и при этом демонстрирует селективное поглощение при резонансе.

Проведен анализ свойств поглощения при наклонном падении волн. Установлено, что предлагаемый поглотитель на основе сбалансированных Ω -резонаторов проявляет угловую стабильность вплоть до угла падения 40° , что является хорошим результатом для данного типа поглотителя.

Можно сделать вывод о том, что предлагаемый поглотитель проявляет удовлетворительные характеристики как «совершенный», то есть слабо-отражающий поглотитель электромагнитных волн в ТГц диапазоне частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований – проект № Ф18КИ-028 от 25.01.2018.

Литература

1. Electromagnetics of bianisotropic materials: Theory and Applications / A. N. Serdyukov [et al.]. – Gordon and Breach Publishing Group [etc.]: London, 2001. – 337 p.
2. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V.S. Asadchy [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 298–304.
3. Total absorption of electromagnetic waves in ultimately thin layers / Y. Ra'di, [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, №. 9. – P. 4606–4614.

4. High-efficiency dielectric Huygens surfaces / M. Decker [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2015. – Vol. 3, № 6. – P. 813–820.

5. Introducing dipole-like resonance into magnetic resonance to realize simultaneous drop in transmission and reflection at terahertz frequency / C. Hu [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 108, № 5. – P. 053103.

6. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization / H. Tao [et al.] // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 13, № 10. – P. 7181–7188.

7. Decoupling crossover in asymmetric broadside coupled split-ring resonators at terahertz frequencies / G. R. Keiser [et al.] // *Physical Review B*. – 2013. – Vol. 88, № 2. – P. 024101.