

Широкополосная поглощающая метаповерхность на основе воды

А.Г. Максимова, М.А. Одит

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в работе исследуется диэлектрическая метаповерхность на основе воды. Показано, что данная метаповерхность может выполнять функцию широкополосного микроволнового поглотителя. Свойства метаповерхности сохраняются неизменными в широком интервале температуры воды и угла падения электромагнитной волны.

Ключевые слова: метаповерхности на основе воды, диэлектрические метаповерхности, широкополосные микроволновые поглотители

1. Введение

Метаповерхности – это электромагнитные структуры, представляющие собой двумерный упорядоченный массив из элементов субволновых размеров, которые, взаимодействуя с электромагнитным полем падающей волны, способны управлять амплитудой, фазой и поляризацией прошедшей и отраженной волн, осуществляя таким образом полный контроль над волновым фронтом [1, 2, 3, 4]. Метаповерхности являются обобщенным классом электромагнитных структур, включающим в себя проходные и отражательные решетки, частотно-селективные поверхности, высокоимпедансные поверхности и др. Обладая функциональными свойствами объемных метаматериалов, метаповерхности отличаются компактными размерами, малыми потерями, простотой изготовления, лучшей степенью интеграции в существующие технологии. Потенциальный функционал метаповерхностей включает в себя, но не ограничен такими свойствами как: электромагнитная прозрачность и маскировка [5], управление фазовым фронтом [6, 7], поглощение [8, 9].

Как правило, метаповерхности изготавливаются по планарной технологии и формируются в виде проводящих резонансных элементов, нанесенных на диэлектрическую подложку. В качестве материала метаповерхностей часто предлагают использовать полностью диэлектрические элементы, что обусловлено отсутствием в них омических потерь, которые особенно значительны на оптических частотах [10, 11]. В последние несколько лет появилось множество публикаций, в которых в качестве материала диэлектрических метаповерхностей предлагается использовать обычную воду. Не вполне очевидное на первый взгляд решение использования такого материала обладает на самом деле рядом преимуществ. Во-первых, вода является одним из самых доступных материалов на земле, при этом она экологически безопасна. Вода обладает большой диэлектрической проницаемостью, что делает возможным формировать из неё электрически малые резонансные элементы. Дисперсия диэлектрической проницаемости в ГГц-диапазоне открывает возможности создания широкополосных и нелинейных элементов на ее основе. Жидкая форма воды позволяет легко формировать любые необходимые формы элементарных ячеек, которые также просто изменять. Кроме того, диэлектрическими свойствами воды можно легко управлять как с помощью температуры, так и добавлением различных примесей.

В ряде было показано, что метаповерхности на основе воды могут использоваться для управления фазовым фронтом [12], реализации перестраиваемого полосового

фильтра [13], формирования тороидальных типов колебаний [14], фокусировки отраженной волны [15], микроволновых поглотителей [16, 17].

2. Поглощающие метаповерхности на основе воды

Высокий уровень потерь и дисперсионный характер диэлектрической проницаемости воды делают её отличным кандидатом в качестве материала для поглощающих покрытий. Кроме затухания сигнала в толще воды за счет её высоких диэлектрических потерь, используются и другие механизмы, позволяющие увеличить уровень поглощения. Один из таких механизмов - это резонансное поглощение на частотах, соответствующих определенным типам колебаний в ячейках метаповерхностей. Так в работе [18] используется подложка из воды, экранированная с одной стороны. Для согласования слоя воды со свободным пространством используется дополнительный слой диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью (см. вставку на рисунке 1а). Поглощение на уровне не менее 90% достигается в полосе 6-19 ГГц. Формирование различных типов периодических структур на основе воды позволяет достичь уровня поглощения более 80% в диапазонах частот 12-29.6 ГГц [17], 6.2- 19 ГГц [18], 7.7 – 24 ГГц [19]. В частности, возбуждение Ми-резонансов внутри капель воды, расположенных на гибкой диэлектрической поверхности, позволяет получить поглощение выше 70% в диапазоне 8-18 ГГц (рисунок 1б).

Еще одним механизмом поглощения может являться деструктивная интерференция от разных элементов метаповерхности [20]. Падающая на метаповерхность волна отражается с разной фазой от разных её элементов. Подбирая размеры элементов можно добиться того, что отражение будет происходить в противофазе и тем самым получить ещё один минимум коэффициента отражения в дополнение к резонансному поглощению [21].

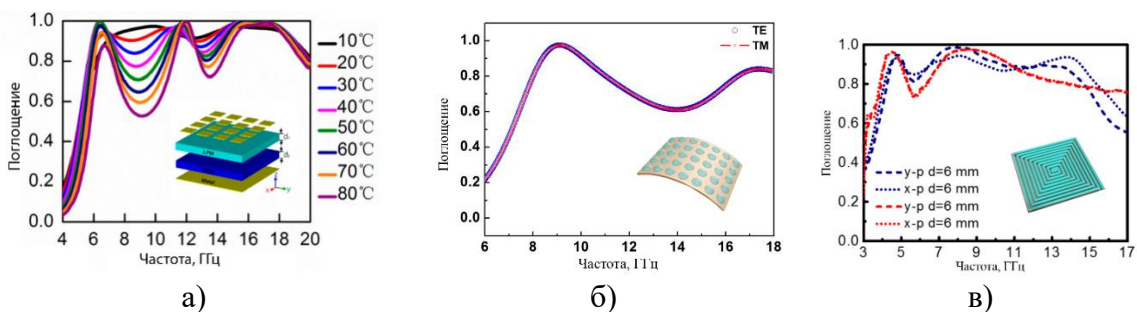


Рисунок 1. а) Спектры поглощения при различных температурах для метаповерхности, выполненной с использованием слоя диэлектрика. б) Спектр поглощения гибкого метаматериала с периодическими каплями воды в) Смоделированные и измеренные спектры поглощения метаматериала на основе трубочек с водой.

Поглощающая метаповерхность может быть также реализована в виде наполненных водой трубочек, расположенных параллельно или свернутых в спираль [22]. Уровень поглощения такой структуры превышает 90% в полосе 5-15 ГГц (рисунок 1в).

В данной работе мы исследуем метаповерхность, которая лишена металлического экрана и состоит только из резонансных элементов из воды и диэлектрической подложки, формирующей форму элементов. Таким образом, такая структура является электромагнитно прозрачной вне рабочего диапазона. Если в качестве диэлектрического материала выбрать прозрачный пластик, то данная структура будет также оптически прозрачной. Метаповерхность представляет собой слой воды толщиной $H_1 = 8$ мм, на котором периодически расположены столбики из воды,

имеющие в сечении квадрат со стороной $w_2 = 5$ мм и высоту $H_2 = 8$ мм (рисунок 2а). Период структуры $P = 8$ мм. Данная структура может быть реализована путем создания инверсной формы в твердой диэлектрической подложке с низким значением коэффициента диэлектрической проницаемости. В качестве последней может выступать, например, строительный пенопропилен. Этот материал легко поддается обработке и его относительная диэлектрическая проницаемость близка к единице (мы также пренебрегаем потерями в этом материале вследствие их малости). Если высверлить в таком материале отверстия с размерами $w_2 \times H_2$ и заполнить их водой - то получится требуемая структура (при этом над заполненными водой отверстиями располагается слой воды толщиной H_1).

Указанная на рисунке 2б структура была промоделирована с использованием пакета численного электродинамического моделирования CST MicrowaveStudio. В качестве объекта моделирования была взята одна ячейка (рисунок 2а) с наложенными на нее граничными условиями UnitCell, предполагающими бесконечно протяженную повторяющуюся структуру таких же элементов. Структура возбуждалась при помощи портов Флоке.

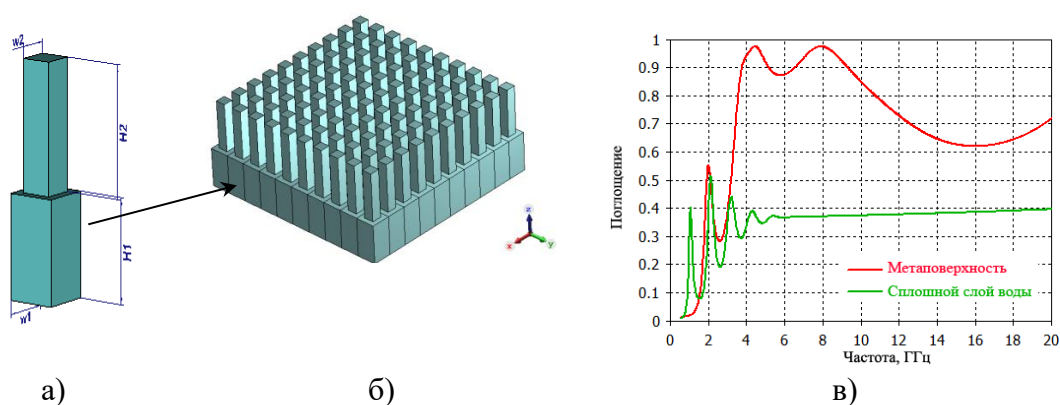


Рисунок 2. а) Отдельная ячейка поглотителя на водной основе. б) Массив поглотителя на водной основе. в) Спектры поглощения исследуемого метаматериала на основе воды и сплошного слоя воды при температуре 25 °С (высота слоя = H_1+H_2).

Результаты расчета коэффициент поглощения метаповерхности приведены на рисунке 2в.

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

Для сравнения на этом же рисунке приведен коэффициент поглощения для слоя воды толщиной H_1+H_2 . Как видно из результатов моделирования, уровень поглощения превышает 80% на частотах свыше 3.8-10.2 ГГц.

С точки зрения практического использования важно, чтобы свойства поглощающего покрытия сохранялись при изменении внешних условий. Поэтому свойства покрытия были также исследованы для разных температур воды. Диэлектрические свойства воды имеют выраженную зависимость от температуры. Эта зависимость может быть хорошо описана моделью Дебая [23]:

$$\varepsilon(\nu, t) = \varepsilon'(\nu, t) + i\varepsilon''(\nu, t) \quad (2)$$

Частотная зависимость комплексной проницаемости воды для разных температур в диапазоне 0-40 °С приведена на рисунке 3а. Соответствующий коэффициент поглощения метаповерхности для разных исходных температур показан на рисунке 3б. Как видно из проведенных графиков, изменение температуры воды не оказывает значительного влияния на коэффициент поглощения, что определяет выраженную температурную стабильность исследуемой структуры.

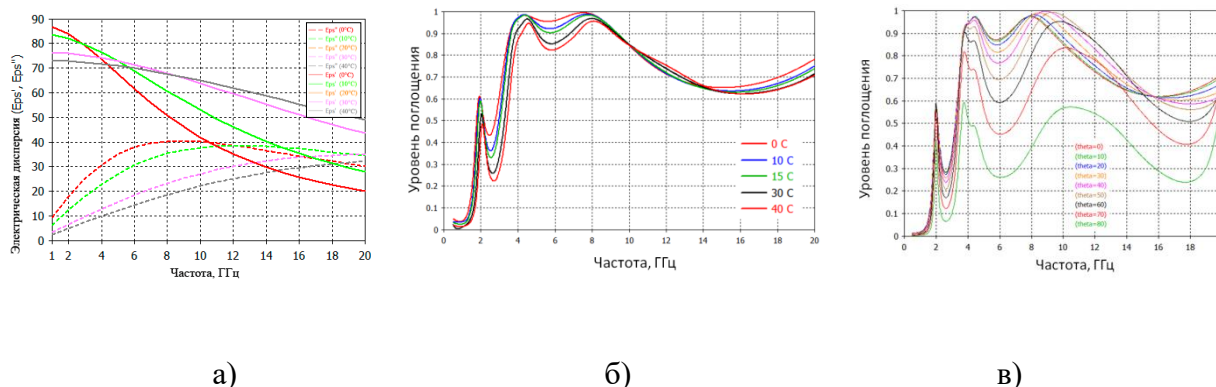


Рисунок 3. а) Частотная зависимость диэлектрической проницаемости чистой воды для температур в диапазоне 0-40 °С. б) Спектры поглощения исследуемой метаповерхности при разных температурах. в) Спектры поглощения исследуемой метаповерхности при разных углах падения волны θ от 0 до 60°С.

Помимо температуры воды, интерес представляет зависимость коэффициента поглощения от угла падения волны. Эта зависимость показана на рисунке 3в для угла падения θ , изменяющегося в диапазоне от 0° до 80°. Расчеты показывают, что изменение угла падения до 30° градусов не приводят к уменьшению уровня поглощения ниже 0.8. При дальнейшем увеличении угла падения до 60°, коэффициент поглощения не опускается ниже 0.6, что говорит о хорошей стабильности характеристик.

3. Заключение

В представленной работе были продемонстрированы результаты исследования метаповерхности на основе воды, выполняющей функции широкополосного поглотителя электромагнитной энергии. Представленную конструкцию отличают простота изготовления и низкая стоимость за счет использования в качестве основного материала обычной воды. Метаповерхность демонстрирует высокий уровень поглощения электромагнитной энергии: более 90% в диапазоне от 3,8 до 9,2 ГГц. При этом уровень согласования метаповерхности со свободным пространством в этом диапазоне не превышает -10 дБ. Отличительной особенностью, представленной метаповерхности является отсутствие в её составе проводящих элементов, металлического экрана, а также её оптическая прозрачность. Метаповерхность может быть использована в технологиях маскировки, электромагнитной совместимости, системах детектирования и сбора электромагнитной энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00486.

Список литературы

1. A. Nemati, Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices / A. Nemati, [at al.] // *Opto-Electronic Advances* — 2018. — Vol.1, — P.180009.
2. M. Chen, Huygens' metasurfaces from microwaves to optics: a review / M. Chen, [at al.] // *Nanophotonics* 2018 — 2018. — Vol.7. — P.1207-1231.
3. *Metasurfaces: Physics and Applications* / Eds. Sergey Bozhvolnyi, Patrice Generet, Fei Doing — 2018. — Vol.8. — P. 1727.
4. H. – T. Chen, A review of metasurfaces: physics and applications / H. – T. Chen, [at al.] // *IOP Science*, — 2016. — Vol.79.
5. I. Bergmair, Single and multiplayer metamaterials fabricated by nanoimprint lithography / I. Bergmair, [at al.] // *Nanotechnology* 22. — 2011. — P.325301.
6. Ye Feng Yu, High-transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths / Ye Feng Yu, [at al.] // *Laser Photonics* — 2015. — P. 412 - 418.
7. M. Khorasaninejad, Achromatic Metasurface lens at Telecommunication wavelength / M. Khorasaninejad, [at al.] // *Nanoletters*— 2015 — P.5358 - 5362.
8. C. M. Watts, Metamaterial, Electromagnetic Wave Absorbers / C.H. Watts, [at al.] // *Advanced materials*, — 2012. — Vol. 24.
9. Q.-Y. Wen, Perfect Metamaterial Absorbers in Microwave and Terahertz Bands / Q. — Y. Wen, [at al.] // *Metamaterial* — 2012.
10. A E Krasnok, All-dielectric optical nanoantennas / A E Krasnok, [at al.] // *Optics Express*, — 2012. — Vol. 20. — P.20599.
11. A E Krasnok, Spectroscopy and Biosensing with Optically Resonant Dielectric Nanostructures / A E Krasnok, [at al.] // *Advanced Optical Materials* — 2018. — Vol.6. — P. 1701094.
12. Lei Chen, Dual-manipulation on wave-front based on reconfigurable water-based metasurface integrated with PIN diodes / Lei Chen, [at al.] // *Journal of Applied Physics* — 2019, P. 023107.
13. M. Odit, Experimental demonstration of water based tunable metasurface / M. Odit [at al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2016. — P. 10.1063/1 011901.
14. I. Stenishchev, A. Basharin, Toroidal response in all-dielectric metamaterials based on water / I. Stenishchev // *Springer Nature* — 2017. — Vol. 7 — P.9468
15. M. Odit, Functional metasurfaces based on water / M. Odit, [at al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018 — P. 1092 012103.
16. Q. Song, Water-Resonator-Based Metasurface: An Ultrabroadband and Near-Unity Absorption / Q. Song, [at al.] // *Advanced Optical Materials* — 2017. — Vol.5. — P. 1601103.
17. Jianwen Xie, Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption / Jianwen Xie, [at al.] // *Optics Express*, - 2018. — Vol. 26. — P.5052 - 5059.
18. Y. Pang, Thermally tunable water-substrate broadband metamaterial absorbers / Y. Pang, [at al.] // *Applied Physics Letters* — 2017. — Vol. 110. — P.104103.
19. Jianwen Xie, Truly All-Dielectric Ultra-Broadband Metamaterial Absorber: Water-Based and Ground-Free / Jianwen Xie, [at al.] // *Advanced Optical Materials* — 2019. — Vol. 5. — P.1601103.
20. Y. Shen, Transparent absorption-diffusion-integrated water-based all-dielectric metasurface for broadband backward scattering reduction / Y. Shen, [at al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics* — 2018. — Vol. 51. — P.485301.
21. Weiren Zhu, Multiband coherent perfect absorption in a water-based metasurface / Weiren Zhu, [at al.] // *Optics Express* – 2017. — Vol. 25. — P.15737-15745.
22. Junming Zhao, Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures / Junming Zhao, [at al.] // *Optics Express* – 2018. — Vol. 26. — P. 8530.
23. W. J. Ellison, Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0–25 THz and the Temperature Range 0–100 °C / W. J. Ellison // *Journal of Physical and Chemical Reference* — 2007.