

ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ МИКРОВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ДВУХСЛОЙНУЮ МЕТАПОВЕРХНОСТЬ ИЗ ПРОВОДЯЩИХ СТЕРЖНЕЙ

Г. ОГАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: ohanyangor@gmail.com

(Поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.)

В двухслойной метаповерхности, состоящей из периодически расположенных стержней, наблюдается сильная дисперсия коэффициента прохождения в микроволновой области спектра. Наблюдаемое явление это результат резонансного взаимодействия микроволны со стержнем, где формируется стоячая волна с аксиальной симметрией, а также эффективного электрического взаимодействия между стержнями соседних слоев. Обнаруженная на эксперименте, кривая зависимости коэффициента прохождения имеет острый пик, что позволяет использовать структуру в качестве полосового фильтра. Обнаружено, что резонансная частота смещается в область низких частот при увеличении длины стержней, их диаметра, а также расстояния между слоями, что открывает возможности управления и контроля микроволны.

1. Введение

Уникальные свойства метаповерхностей обусловлены сочетанием двух важных структурных факторов. Метаповерхность создается из элементов субволновых размеров, различной формы, преимущественно металлических и часто с резонансными свойствами. Кроме того, согласованное воздействие на волну оказывает как периодическое, так и непериодическое плотное расположение элементов.

Метаповерхность, как эффективная система управления волнами, позволяет избирательно по частоте управлять распространением и поляризацией волн [1, 2]. В качестве альтернативы традиционным микроволновым и оптическим материалам в настоящее время применение метаповерхностей простирается от частотно-зависимого управления передаваемыми или отраженными волнами [3, 4], до манипулирования волновым фронтом [5–7], идеального поглощения [8], кодирования [9]. и генерация поверхностных волн [10, 11].

Другой широко распространенной операцией в современных сетях микроволновой и оптической связи и обработки сигналов является спектральная фильтрация электромагнитных волн, которую можно эффективно реализовать за счет использования частотно-селективных поверхностей, обладающих дисперсионными отражательными или пропускающими свойствами [12–13].

подавляющее большинство конструкций метаповерхностей основано на

гибридных металлодиэлектрических структурах. Металлы, обладая достаточной дисперсией в видимом и ближнем ИК-спектрах, практически не проявляют дисперсионных свойств на более низких частотах. Следовательно, для создания дисперсионного отклика основным подходом является использование резонансных металлических структур в качестве элементов элементарной ячейки.

Целью работы является определение возможностей использования двухслойной метаповерхности, состоящей из периодически расположенных проводящих стержней, в качестве полосового фильтра. Кроме того, выявление условий управления процессами прохождения и отражения, падающего на такую структуру микроволны.

2. Эксперимент

В рассматриваемом нами случае элементами метаповерхности являются тонкие проводящие стержни, резонансно связанные микроволной. Здесь, вблизи тонких проводящих стержней длиной близкой к половине длины волны, формируются стоячие волны с аксиальной симметрией, так что стержень служит в качестве открытого резонатора [14]. Выбор данного металлического стержня определяется двумя факторами. Во-первых, из-за перераспределения зарядов возникает кулоновское взаимодействие между металлическими стержнями. Так, в зависимости от расстояния между соединенными стержнями и диэлектрической проницаемости среды меняется резонансная частота, что открывает новые возможности управления как интенсивностью, так и фазой волны. Примечательно, что из-за относительно больших размеров этих металлических элементов задержка взаимодействия становится решающей. Во-вторых, образование подобных стоячих волн не является исключительным свойством микроволнового диапазона и может реализоваться также в диапазонах от терагерцового до видимого спектра электромагнитных волн.

В эксперименте в качестве образца использовалась двухслойная система из периодически расположенных стержней (см. рис.1). Конструкция изготовлена из медных стержней длиной $W = 15, 17,5, 20$ мм и диаметрами $D = 0.6, 0.9, 1.1$ мм, каждый из которых отстоит от ближайших соседей на данной пленке в направлении, перпендикулярном оси, на $l = 3$ мм, с расстояниями между слоями $d = 1, 2, 3$ мм. Стержни находятся в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$ (тефлон). Таким образом, каждый стержень одного слоя активно взаимодействует с двумя соседними стержнями другого слоя.

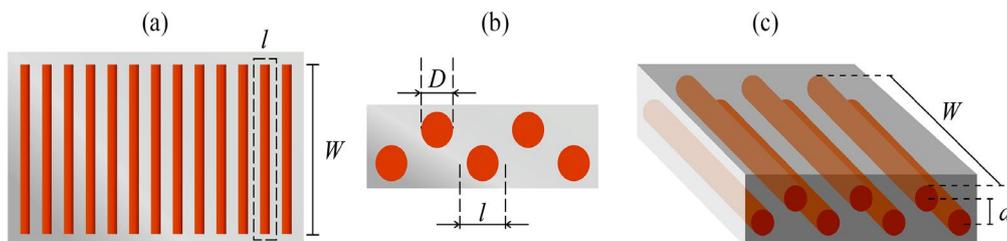


Рис.1. Продольный(а), поперечный(б) и пространственный(с) виды образца. Диаметр стержня (D), длина стержня (W), расстояние между стержнями (l), расстояние между слоями (d).

Испытуемый образец расположен внутри двухпортового микроволнового волновода (рис.2а). Спектр передачи измерялся векторным анализатором Rohde and Schwarz ZNB20 (рис. 2b).

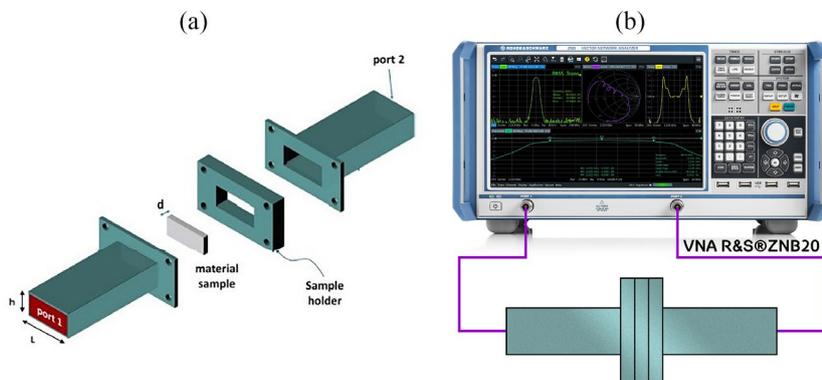


Рис.2. Линия прохождения микроволны через метаматериал, двухпортовый микроволновый волновод (а), векторный анализатор Rohde and Schwarz ZNB20 (б).

3. Результаты и обсуждения

Для управления и контроля за ходом микроволны необходимо определить возможности манипулирования спектром ее прохождения с помощью параметров структуры. В ходе эксперимента определены спектральные зависимости коэффициентов прохождения при различных значениях параметров задачи. При этом для всех приведённых кривых характерно общее поведение зависимости от частоты. Из приведённых рисунков нетрудно заметить, что с возрастанием частоты коэффициент прохождения возрастает, доходя до близкого к единице максимального значения, затем резко падает до нуля. Такое поведение характерно для классического Фано резонанса, что реализуется в системе взаимосвязанных осцилляторов [15,16]. В данном случае эффект реализуется в результате электрического взаимодействия между стержнями соседних слоев.

Кривые зависимости коэффициентов прохождения S_{12} от частоты при различных значениях длины стержня представлены на рис.3. Как и следовало ожидать, с увеличением длины стержня спектральная область резонансного

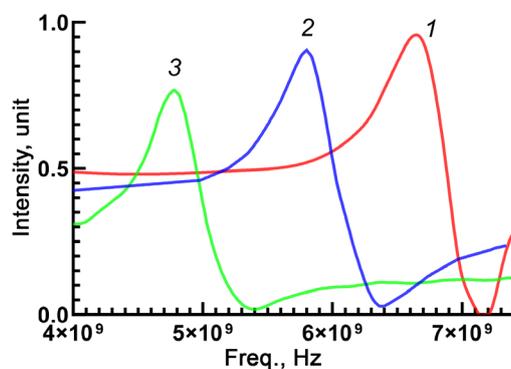


Рис.3. Спектр коэффициентов прохождения S_{12} при длинах стержней $W = 15; 17.5; 20$ мм, которые соответствуют графикам 1,2,3 соответственно. Здесь $D = 0.9$ мм, $l = 3$ мм, $d = 2$ мм.

взаимодействия с микроволной смещается в область низких частот. Дело в том, что формирование стоячей волны с аксиальной симметрией происходит на длинах стержня, близких к половине длины падающей волны. Заметим также, что с увеличением длины стержня спектральная область резонансного взаимодействия с микроволной сужается. Это можно объяснить возрастанием размера резонатора и увеличением накопленной энергии.

Резонансная частота смещается в область низких частот также при увеличении диаметра стержня (рис.4). В отличие от стандартного резонатора Фабри–Перо здесь при отражении от конца стержня сдвиг фазы отличен от π . При этом сдвиг фазы возрастает при малых диаметрах стержня, что обусловлено смещением резонансной частоты.

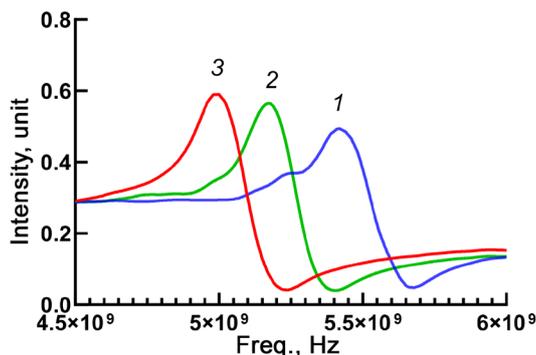


Рис.4. Спектр коэффициентов прохождения S_{12} при диаметрах стержня $D = 0.6; 0.9; 1.1$ мм, которые соответствуют графикам 1,2,3 соответственно. Здесь $W = 20$ мм, $l = 3$ мм, $d = 2$ мм.

Особый интерес представляет поведение коэффициента прохождения при сближении расстояния d между слоями (рис.5). При $s = 1$ мм крутизна дисперсии коэффициента прохождения достигает максимального значения $\Delta T/\Delta\nu \approx 10$ /ГГц, где ΔT -изменение коэффициента прохождения, $\Delta\nu$ -смещение частоты.

Возникновение исследуемого процесса обусловлено взаимодействием стержней соседних слоев. Дело в том, что формируемая в результате резонансного взаимодействия с микроволной стоячая аксиально симметричная волна

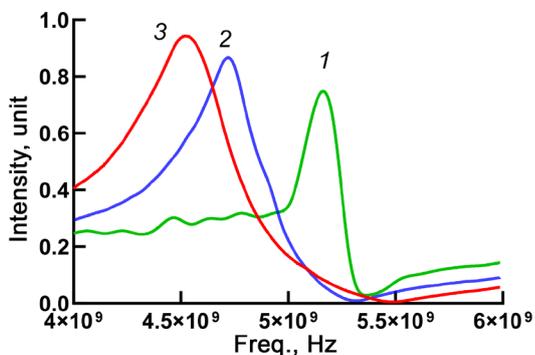


Рис.5. Спектр коэффициентов прохождения S_{12} при диаметрах стержня $d = 1; 2; 3$.мм, которые соответствуют графикам 1,2,3 соответственно. Здесь $W = 17.5$ мм, $D = 0.9$ мм, $l = 3$ мм.

имеет сильную радиальную электрическую компоненту. В определенном смысле каждый стержень выступает в качестве диполя и взаимодействие между ними реализуется электрическими полями. Тогда становится понятна причина невозможности наблюдения эффекта в однослойных структурах указанного типа, поскольку поля соседних стержней компенсируются.

4. Заключение

Таким образом, в результате резонансного взаимодействия микроволны с двухслойной метаповерхностью, состоящей из периодических расположенных стержней, наблюдается сильная дисперсия коэффициента прохождения. В узкой области частотного спектра падающей микроволны, кривая коэффициента прохождения имеет острый пик, что позволяет использовать структуру в качестве полосового фильтра. Резонансная частота смещается в область низких частот при увеличении длины стержней, их диаметра, а также расстояния между слоями, что открывает возможности управления и контроля микроволны.

Автор выражает благодарность профессору Х.В. Неркараряну за продуктивные обсуждения и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Ebel, Y. Deng, M. Hentschel, C. Meng, S. im Sande, H. Giessen, F. Ding, S.I. Bozhevolnyi. *Adv. Photonics Nexus*, **2**(01), 016005 (2023).
2. S.B. Glybovski, S.A. Tretyakov, et al., *Phys. Rep.*, **634**, 1–72, (2016).
3. H. Parsamyan, H. Haroyan, K. Nerkararyan. *Appl. Phys. A.*, **126**, 773 (2020).
4. L. Huang, C.-C. Chang, B. Zeng, J. Nogan, S.-N. Luo, A.J. Taylor, A.K. Azad, H.-T. Chen. *ACS Photonics*, **4**, 2111–2116, (2017).
5. D. Pirrone, A. Ferraro, D.C. Zografopoulos, W. Fuscaldo, P. Szafranski, G. Ducournau, R. Beccherelli. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, **21**, 8688–8697, (2022).
6. M. Karamirad, C. Ghobadi, J. Nourinia. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **69**, 1799–1804 (2021).
7. S. Teng, Q. Zhang, H. Wang, L. Liu, H. Lv. *Photonics Res.*, **7**, 246, (2019).
8. Z. Wang, J. Liu, X. Ding, W. Zhao, K. Zhang, H. Li, B. Ratni, S.N. Burokur, Q. Wu. *Phys. Rev. Appl.*, **13**, 014033 (2020).
9. H. Parsamyan, H. Haroyan, K. Nerkararyan. *Today Commun.*, **31**, 103692 (2022).
10. H. Chen, W.-B. Lu, Z.-G. Liu, M.-Y. Geng. *ACS Photonics*, **7**, 1425–1435, (2020).
11. J.D. de Pineda, G.P. Ward, A.P. Hibbins, J.R. Sambles. *Phys. Rev. B*, **100**, 081409 (2019).
12. B. Glybovski, S.A. Tretyakov, P.A. Belov, Y.S. Kivshar, C.R. Simovski. *Physics reports: review section of physics letters*, **634**, 1 (2016).
13. Zh. Bai, Q. Zhang, Y. Ju, G. Tao, X. Jiang, N. Kang, Ch. Liu, L. Zhang. *Journal of Physics D: Appl. Physics*, **90**, 75 (2016).
14. T. Abrahamyan, H. Haroyan, D. Hambaryan, H. Parsamyan, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics*, **55**, 445001 (2022).
15. S.B. Glybovski, S.A. Tretyakov, P.A. Belov, Y.S. Kivshar, C.R. Simovski. *Physics reports: review section of physics letters*, **634**, 1 (2016).
16. Zh. Bai, Q. Zhang, Y. Ju, G. Tao, X. Jiang, N. Kang, Ch. Liu, L. Zhang. *Journal of Physics D: Appl. Physics*, **49**, 15001 (2016).

ՄԻԿՐՈՍԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԱՐԱԾՈՒՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՀԱՂՈՐԴԻՉ
ՁՈՂԵՐԻՑ ՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾ ԵՐԿՇԵՐՏ ՄԵՏԱՄԱԿԵՐԵՍՆԵՐՈՎ

Գ.Ա. ՕՀԱՆՅԱՆ

Երկշերտ մետամակերևույթում, որը բաղկացած է պարբերաբար դասավորված ձողերից, սպեկտրի միկրոալիքային շրջանում տեղի է ունենում հաղորդականության գործակցի ուժեղ դիսպերսիա: Դիտարկվող երևույթը միկրոալիքային ալիքի ռեզոնանսային փոխազդեցության արդյունքն է ձողի հետ, որտեղ ձևավորվում է կանգուն ալիքը՝ առանցքի սիմետրիայով, ինչպես նաև հարակից շերտերի ձողերի միջև տեղի ունեցող էլեկտրահաղորդականության էֆեկտիվությունը: Փորձի ժամանակ հայտնաբերված փոխանցման գործակցի կորի թեքությունը ունի սուր գագաթ, որը թույլ է տալիս նշված կառուցվածքը օգտագործել, որպես գծային ֆիլտր: Պարզվել է, որ ռեզոնանսային հաճախությունը տեղափոխվում է ցածր հաճախականության շրջան, ձողերի երկարությունը, դրանց տրամագիծը և շերտերի միջև հեռավորությունը մեծացնելու դեպքում, ինչը տալիս է միկրոալիքների կառավարման և վերահսկման լայն հնարավորություն:

FEATURES OF MICROWAVE PROPAGATION THROUGH A TWO-LAYER
META SURFACE MADE OF CONDUCTIVE RODS

G. OHANYAN

In a two-layer meta surface consisting of periodically arranged rods, there is a strong dispersion of the transmission coefficient in the microwave region of the spectrum. The observed phenomenon is the result of the resonant interaction of the microwave with the rod, where a standing wave with axial symmetry is formed, as well as the effective electrical interaction between the rods of adjacent layers. The transmission coefficient curve found in the experiment has an acute peak, which allows the structure to be used as a bandpass filter. It was found that the resonant frequency shifts to the low-frequency region as the length of the rods, their diameter, and the distance between the layer's increases, which opens up the possibilities of controlling and controlling the microwave.