

УДК 621.396

СОЗДАНИЕ ПЛАНАРНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Ω -ЭЛЕМЕНТОВ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М.А. Подалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

CREATING OF PLANAR METAMATERIALS BASED ON Ω -ELEMENTS WITH OPTIMAL PARAMETERS BY USING THE VACUUM-PLASMA TECHNOLOGIES

M.A. Podalov, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov

F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

Созданы и исследованы Ω -структуры с оптимальными параметрами, полученные с помощью магнетронного напыления. Металлическое покрытие в виде Ω -элементов наносилось на слой полиамида или фторопласта. Образцы исследованы в безэховой камере как преобразователи поляризации СВЧ излучения. Структуры на фторопластовой подложке преобразовывали падающую линейно поляризованную волну в отражённую эллиптически поляризованную с коэффициентом эллиптичности $K = 0.53-0.57$ на частоте 3.7 ГГц, а при полиамидной подложке – в волну с коэффициентом эллиптичности $K = 0.36-0.47$ на той же частоте.

Ключевые слова: магнетронное распыление, эллиптичность, полимерная подложка, метаматериал, Ω -элемент.

Creation and investigation of Ω -structures with optimal parameters obtained by magnetron sputtering are described. A metallic coating in the form of Ω -elements was deposited on a layer of polyamide or polytetrafluoroethylene. The samples were investigated in the anechoic chamber as polarization transformers of microwave radiation. Structures on the polytetrafluoroethylene substrate converted incident linearly polarized wave into the reflected elliptically polarized with the ellipticity coefficient $K = 0.53-0.57$ at a frequency of 3.7 GHz, while on the polyamide substrate – into a wave with the axial ratio $K = 0.36-0.47$ at the same frequency.

Keywords: magnetron sputtering, ellipticity, polymer substrate, metamaterial, Ω -element.

Введение

К метаматериалам относят такие искусственные структуры, которые обладают свойствами, не встречающимися у природных материалов [1]–[6]. Объектом исследования является Ω -элемент как составляющая метаматериалов. Искусственные Ω -структуры не являются киральными, но обладают магнитоэлектрическими свойствами [7]–[11]. Основными предметами исследования являются коэффициент эллиптичности волны, отражённой от образца, интенсивность отражённой и прошедшей волн. Оптимальные параметры Ω -элемента были рассчитаны ранее с помощью моделей квазистационарного и гармонического тока [9]. Оптимальность параметров означает, что в каждом Ω -элементе под действием падающей электромагнитной волны индуцируются одинаково значимые электрический дипольный момент и магнитный момент. Эти моменты в идеальном случае дают одинаковый вклад в отражённую волну, которая приобретает циркулярную поляризацию, в отличие от падающей линейно поляризованной волны. В прежних работах подобные структуры создавались путём изготовления Ω -элементов вручную из проволоки с помощью шаблона с предварительно рассчитанными параметрами и помещения этих Ω -частиц на подложку

из пенопласта. В то же время создание метаматериалов предполагает достаточно плотное расположение элементов в пространстве, на расстояниях, существенно меньших длины волны электромагнитного поля. Кроме того, каждый элемент, или «атом» метаматериала, должен обладать резонансными свойствами. Этого можно добиться, если приблизить длину Ω -элемента в вытянутом состоянии к половине длины волны электромагнитного поля. Поэтому создание метаматериалов не только для СВЧ, но и для терагерцового и инфракрасного диапазонов предполагает миниатюризацию их элементов. В этой связи перспективным представляется использование вакуумно-плазменных технологий. В данной статье такие технологии, в частности, магнетронное распыление, применены для создания Ω -структур на полимерной подложке из полиамида или фторопласта, обладающих свойствами метаматериалов. Метаматериалы на основе оптимальных спиральных элементов ранее исследованы в [12]–[22].

1 Магнетронное распыление

В работе использовалось магнетронное распыление, при котором основным источником нагрева подложки является энергия, выделяемая при

торможении и конденсации осаждаемых атомов вещества мишени, в результате чего температура подложки не превышает 100–200°C. Это дает возможность напылять пленки на подложки из материалов с малой термостойкостью. Магнетронные распылительные системы широко используются в технологиях нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами. Действие магнетронной распылительной системы основано на распылении поверхности катода-мишени ускоренными ионами, образующимися в плазме тлеющего разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, и формировании потоков атомов материала мишени в направлении поверхности, на которую осаждается покрытие [23].

Для магнетронного напыления объектов Ω -подобной формы на подложки из полимеров была изготовлена маска. Для создания маски в пластине нержавеющей стали 08X18H10 вырезались отверстия Ω -образной формы (рисунки 1.1 и 1.2).



Рисунок 1.1 – Процесс вырезания лазером YAG маски из пластины нержавеющей стали 08X18H10

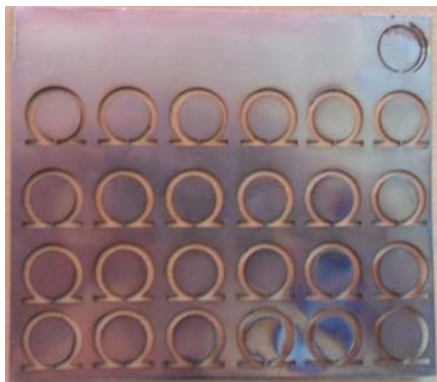


Рисунок 1.2 – Изготовленная маска с Ω -структурой

Для лазерной резки применялся твердотельный лазер YAG со следующими характеристиками: длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм, мощностью $P_{\text{ср}} = 50$ Вт, максимальной энергией лазерного

импульса 790 мДж, расходимостью 0,8 мРад, частотой 50 Гц и длительностью импульса 1 мсек.

На подложку из фторопласта или полиамида распылялась медь через маску, содержащую 24 выреза Ω -подобной формы. После использования магнетронного распыления получены две плоские двумерные анизотропные решетки (рисунок 1.3).

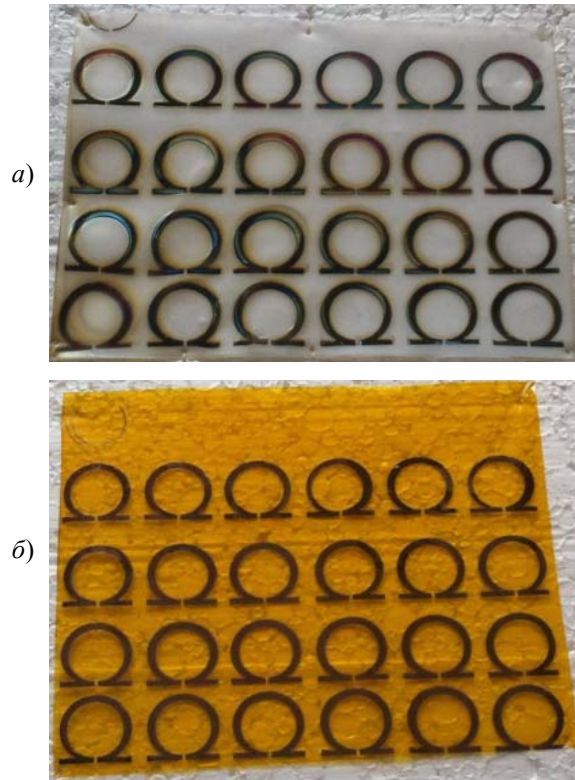


Рисунок 1.3 – Изготовленные образцы с Ω -структурой:

- а) на подложке из фторопласта;
- б) на подложке из полиамида

2 Экспериментальное исследование

Исследована эллиптичность волн при отражении от полученных образцов, схема эксперимента нами ранее подробно описывалась в работе [24].

Структуры исследовались в безэховой камере в частотном интервале 2.5 ÷ 3.8 ГГц. Вектор напряженности электрического поля \vec{E} падающей волны направлен вдоль плеч Ω -элемента, либо перпендикулярно плечам. Волновой вектор \vec{k} падающей волны направлен под углом 45 градусов к плоскости решетки (рисунок 2.1).

Изготовлены два образца, содержащие Ω -элементы (рисунок 2.2) со следующими параметрами: $r = 6.6 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 0.05$ м, $d = 15.5 \cdot 10^{-4}$ м, $l_0 = 3.75 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 3 \cdot 10^{-4}$ м, где r – радиус витка, L – длина полосы напыления, d – ширина полосы напыления, l_0 – длина плеча, l – расстояние между плечами в образце.

Проведены исследования коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отраженной от образца, в зависимости от частоты

падающего излучения. Коэффициент эллиптичности K отраженной волны вычисляли непосредственно из поляризационной диаграммы как отношение минимального и максимального значений уровня сигнала, которые определяли по индикаторам приемника. В результате проведенных экспериментов в безэховой камере была получена зависимость коэффициента эллиптичности K отраженной волны от частоты волны.

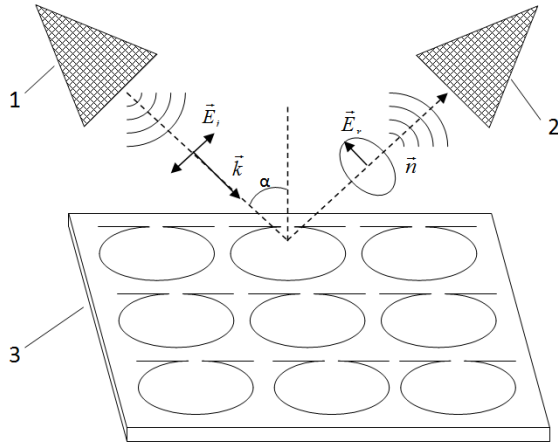


Рисунок 2.1 – Ориентация Ω -элементов в образце искусственной среды относительно падающей волны (1, 2 – излучающая и приемная антенны, 3 – образец двумерной решетки, угол падения $\alpha=45^\circ$)

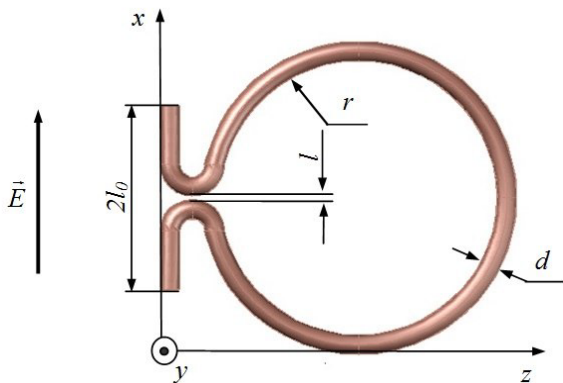


Рисунок 2.2 – Ω -элемент в поле падающей волны

В процессе эксперимента плечи Ω -элементов лежали в плоскости падения. Были исследованы два случая. В первом случае колебания вектора напряженности электрического поля перпендикулярны плечам Ω -элементов (рисунок 2.3).

Во втором случае вектор напряженности электрического поля падающей волны ориентирован параллельно плечам Ω -элемента (рисунок 2.4).

Как видно из графиков, коэффициент эллиптичности на частоте 3.7 ГГц достигает значений $K = 0.57$ и $K = 0.53$ (рисунки 2.3 и 2.4) при различной ориентации вектора напряженности электрического поля для фторопласта. В случае подложки из полиамида коэффициент эллиптичности достигает максимума также на частоте 3.7 ГГц и принимает значения $K = 0.36$ и $K = 0.47$ (рисунки 2.3 и 2.4).

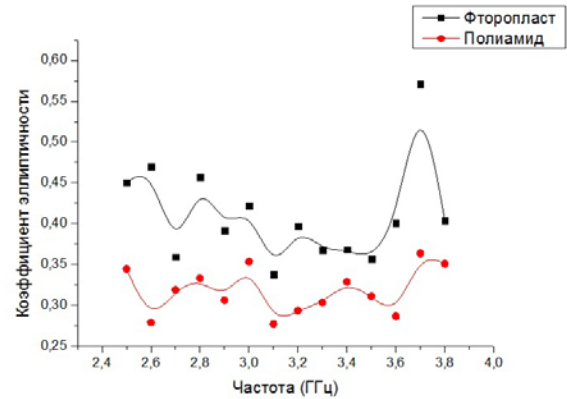


Рисунок 2.3 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отражённой от двумерной решетки, образованной 24 Ω -элементами

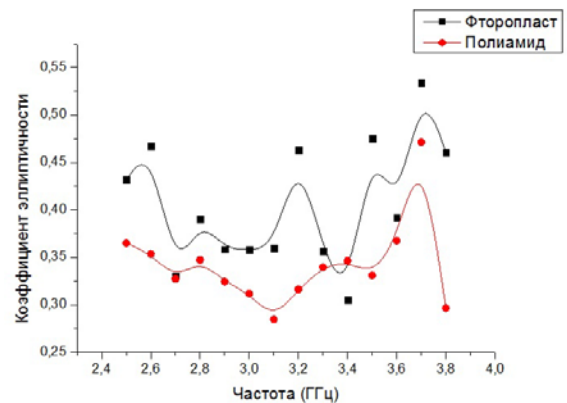


Рисунок 2.4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отражённой от двумерной решетки, образованной 24 Ω -элементами

Использование вакуумно-плазменных технологий магнетронного распыления металлов на полимерные подложки из полиамида и фторопласта позволило создать метаматериалы для преобразования поляризации СВЧ волн. Данный вид метаматериалов образован тонкой пленкой металла (меди), распыленного на полимерную подложку, плёнка имеет вид 24-х Ω -элементов оптимальной формы. Исследования, проведённые в безэховой камере для электромагнитных волн СВЧ диапазона, показали способность двумерных решеток на основе полиамида и фторопласта преобразовывать падающую линейно поляризованную волну в отражённую волну с наибольшим коэффициентом эллиптичности $K = 0.53-0.57$ на частоте 3.7 ГГц при фторопластовой подложке и в волну с наибольшим коэффициентом эллиптичности $K = 0.36-0.47$ на этой же частоте при полиамидной подложке. Отличия в коэффициентах эллиптичности отражённой волны обусловлены различной диэлектрической проницаемостью подложек, поскольку у фторопласта $\epsilon = 2.1$, а у полиамида $\epsilon = 4$.

Заключение

Данный метод нанесения метаматериалов на полимерные подложки обладает рядом преимуществ перед другими методами получения метаматериалов: отличается относительно высокой точностью в изготовления образцов; возможно промышленное производство, т. к. планарное расположение элементов позволяет наносить элементы на большие поверхности, не меняя существенно производственный цикл, нанесение пленок требует значительно меньшего количества распыляемого материала, чем при других методах изготовления.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Международной китайско-белорусской научной лаборатории по вакуумно-плазменным технологиям и научно-исследовательской лаборатории «Физикохимия и технологии микро- и наноразмерных систем» Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины Пилипцову Д.Г., Федосенко Н.Н., Савченко О.В., а также Надточаеву С.В. за помощь в изготовлении образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / A. Priou [et al.] // Kluwer Academic Publishers, 1997. – Vol. 28. – P. 32–37.
2. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials: Theory and applications* / A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A. Sihvola // Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – P. 308–321.
3. *Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью* / И.В. Семченко [и др.] // Кристаллография. 2011. – Т. 56, № 3. – С. 398–405.
4. *Semchenko, I.V.* Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov // *The European Physical Journal. Applied Physics*. – 2009. – Т. 46, № 3. – P. 32607.
5. *Reply to comment on reflection and transmission by a uniaxial bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves* / S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1999. – Т. 32, № 20. – С. 2705–2706.
6. *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // *Electromagnetics*. – 2001. – Т. 21, № 5. – С. 401–414.
7. *Излучение циркулярно поляризованных волн сверхвысокочастотного диапазона плоской периодической структурой из Ω -элементов* / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов, С.А. Третьяков // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1084–1088.
8. *Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements* /

I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, M.A. Podalov, S.A. Tretyakov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1002–1005.

9. *Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью* / С. Цянь, М.А. Подалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*. 2014. – № 6 (87). – С. 215–219.

10. *Устройство для преобразования поляризации электромагнитной волны*: пат. 3783 Респ. Беларусь, МПК (2006) Н 01 Q 15/00/ И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № u 20070065; заявл. 31.01.07; опубл. 30.08.07 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2007. – № 4. – С. 240.

11. *Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators* / A. Balmakou [et al.] // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, № 9 / May 1. – P. 2084–2087.

12. *Подалов, М.А.* Оптимальная форма омега-включений для метаматериалов / М.А. Подалов, И.В. Семченко // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*. – Гомель. – 2009. – № 4 (55), Ч. 2. – С. 172–176.

13. *Устройство для преобразования поляризации*: пат. 9850 Респ. Беларусь: МПК7 Н 01 Q 15/00, Н 01 Q 21/24 / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № a 20050738; заявл. 18.07.2005; опубл. 30.04.2007 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2007. – № 5. – С. 146.

14. *Устройство для преобразования поляризации электромагнитной волны*: пат. 2316857 Рос. Федерация: МПК7 Н 01 Q 15/24, Н 01 Q 21/06 / И.В. Семченко, С. А. Хахомов, А.Л. Самофалов; заявитель и патенто-обладатель УО «Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины». – № 2006112520/09; заявл. 14.04.2006; опубл. 10.02.2008 // *Патенты России. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» (с полным описанием изобретений к патентам) [Электронный ресурс]: полнотекстовая база данных (602 Мб)*. – М: ФИПС, 2008. – № 4. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

15. *Преобразователи поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой* / А.Л. Самофалов, И.А. Фаняев, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2013. – № 3 (16). – С. 34–38.

16. *Фаняев, И.А.* Дифракция волн на цилиндре, окруженном оптимальными спиральями / И.А. Фаняев, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*. – 2013. – № 6 (81). – С. 208–215.

17. Численное моделирование поворота плоскости поляризации при отражении СВЧ волны от двумерной решетки на основе металлических спиралей / И.А. Фаняев, А.Л. Самофалов, И.А. Семченко, С.А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 87–93.
18. Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной киральностью / И.В. Семченко [и др.] // Кристаллография. – 2014. – Т. 59, № 4. – С. 544–551.
19. Semchenko, I.V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 850–855.
20. Семченко, И.В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 52, № 5. – С. 30–36.
21. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур / С. Цянь, В.А. Банный, А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4 (21). – С. 40–45.
22. Optimal arrangement of smooth helices in uniaxial 2D-arrays / V.S. Asadchy [et al.] // Proc. of 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2013, 16th–21st September, Bordeaux, France. – P. 244–246.
23. Данилин, Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин. – М. : Радио и связь, 1982. – 73 с.
24. Семченко, И.В. Получение циркулярно-поляризованной отраженной СВЧ волны с помощью плоской периодической структуры на основе омега-элементов / И.В. Семченко, М.А. Подалов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39), Ч. 2. – С. 40–43.

Поступила в редакцию 17.09.14.