

Создание установки на основе «омега»-элементов для определения параметров тонкопленочных структур в СВЧ диапазоне

Н.В. Короневский, Е.А. Рябов, И.В. Хайрушев, И.С. Великанов, А.А. Андреев, В.В. Галушка, Б.В. Сергеева

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: Изготовлена 2-мерная структура с элементом «омега»-образной формы. На ее основе создана установка для определения параметров тонкопленочных структур в СВЧ диапазоне. Проведены экспериментальное исследование и теоретический расчет коэффициентов отражения и пропускания полученных структур в 3-см диапазоне.

Ключевые слова: метаматериалы, СВЧ излучение, коэффициенты отражения и пропускания

Исследование метаматериалов представляет как фундаментальный интерес, так и открывает широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, линзы с субволновым разрешением, малогабаритные антенны, «невидимые» объекты в определенном диапазоне частот и т.д. [1-3], а также используются в учебном процессе в ВУЗах [4-9]. Благодаря искусственному созданию данные структуры приобретают уникальные оптические, радиофизические, электрофизические и иные свойства, отсутствующие в природных материалах.

В переводе с греческого слово «мета» означает «за пределами». Метаматериалы – это новый класс искусственных материалов, обладающих необычными электромагнитными свойствами, которых нет в природных материалах. В традиционном понимании к метаматериалам относятся материалы с искусственной периодической структурой, размеры которой меньше длины волны излучения. Электромагнитные свойства метаматериала определяются периодичностью, формой и размером структуры [10, 11].

В природе 2-мерные структуры не существуют, но если длина волны излучения намного больше длины структуры только по одному направлению, то такую структуру можно рассматривать как 2-мерную. Для создания 2-мерных структур в СВЧ диапазоне $8 \div 12$ ГГц достаточно использовать слой толщиной примерно 10-40 мкм, чтобы считать его 2-мерной структурой.

В работе [12] теоретически и экспериментально исследована структура датчика на основе резонатора формы «омега» в 3-см диапазоне. Данная структура может быть использована для определения электрофизических параметров тонкопленочных образцов. В научной группе авторов разработана технология получения нового композитного материала на основе волокон поликапролактона, выступающих в качестве матрицы [13-17], в качестве наполнителя используются микрочастицы карбоната кальция [18-24] со встроенными в их структуру наночастицами магнетита [16, 26-29]. В данной работе сделана попытка получить подобную структуру двумя разными методами и исследовать ее свойства.

В программе Altium Designer создана модель формы «омега» с параметрами: толщина линии $w = 0,8$ мм, радиус $r = 1,6$ мм, зазор между линиями $g = 0,6$ мм, длина горизонтального плеча $H_{line} = 12$ мм, размер подложки $22,86 \times 10,16$ мм² (рис. 1, а).

Модель с помощью шелкографии перенесена на текстолит с медным слоем толщиной 18 мкм и протравлена водным раствором хлорного железа (рис. 1, б).

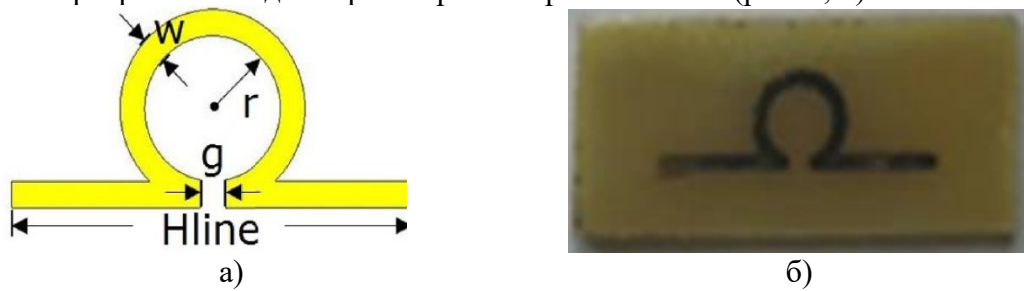


Рисунок 1. Модель структуры [12] (а) и 2-мерная структура модели (б).

При помощи программы OpenSCAD создана модель формы «омега» и на фрезерно-гравировальном станке CNC 3018 Pro (модифицированный) изготовлена 2-мерная структура модели (рис. 2).

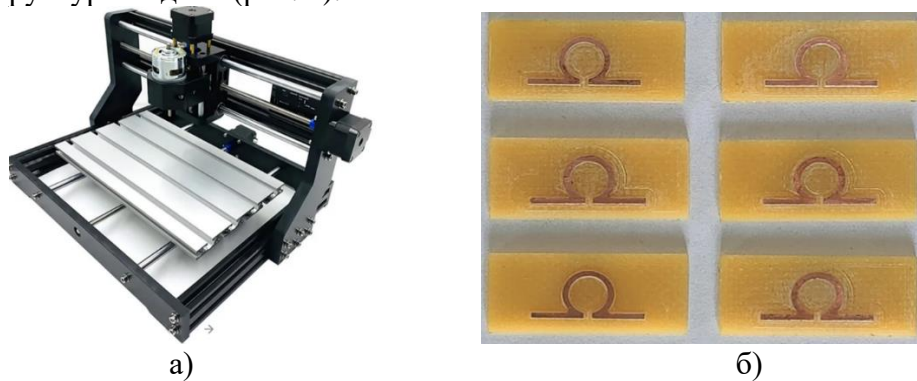


Рисунок 2. Фрезерно-гравировальный станок (а) и 2-мерная структура модели (б).

Результаты измерения коэффициентов отражения и пропускания 2-мерных структур на текстолите, помещенных в прямоугольный волновод на установке на основе панорамного измерителя P2-61 [30-32], представлены на рисунках 3 и 4.

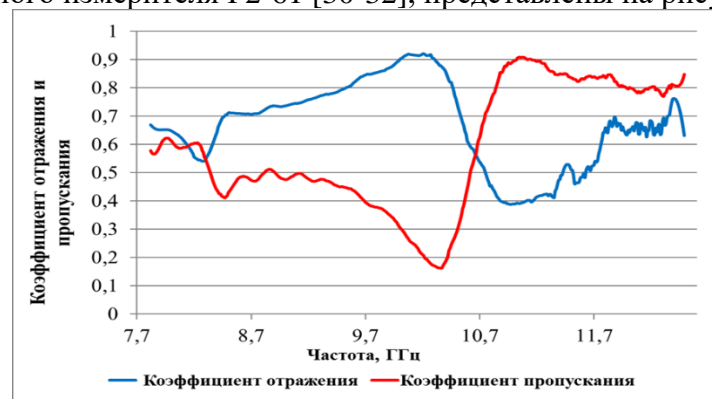


Рисунок 3. Графики частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания структуры, изготовленной химическим методом.

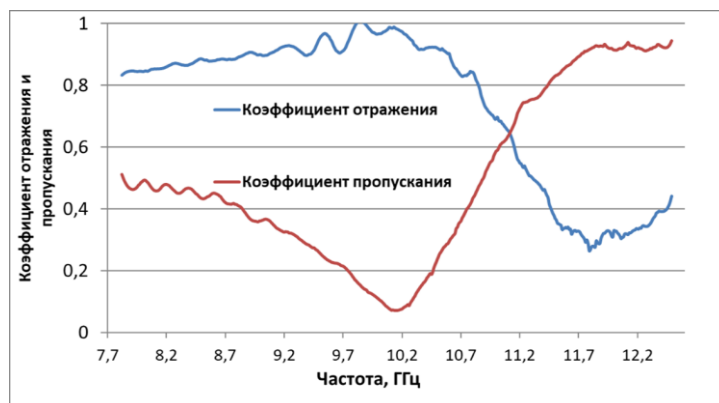


Рисунок 4. Графики частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания структуры, изготовленной механическим методом.

На графиках частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания для 2-мерных структур, изготовленных химическим (рис. 3) и механическими (рис. 4) способами наблюдаются переходы в диапазоне от 10 до 11 ГГц. Общий характер частотных зависимостей схож и аналогичен результату работы [11] (рис. 5).

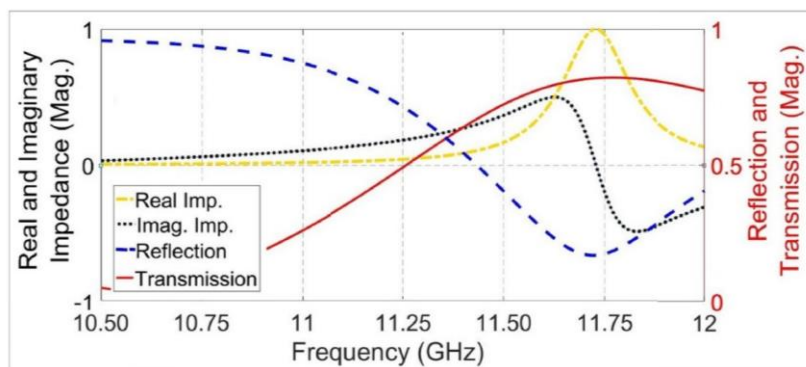


Рисунок 5. Нормализованный реальный импеданс, мнимый импеданс, величина отражения и величина передачи структуры [12].

Разработаны инструкция и программа для расчета параметров электродинамической структуры в OpenEMS. В программе построены изображения (рис. 6), идентичные 2-мерной структуре модели, изготовленной на фрезерно-гравировальном станке CNC 3018 Pro, и рассчитаны коэффициенты отражения и пропускания в 3-см диапазоне. Результаты расчетов представлены на рисунках 7-8.

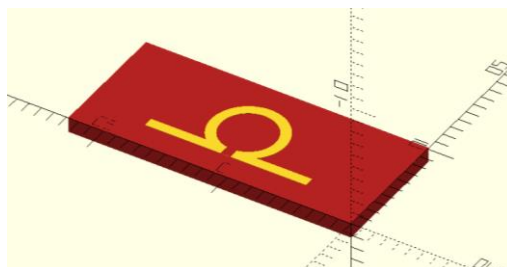


Рисунок 6. Модель структуры в программе OpenSCAD.

На рисунках 7 и 8 представлены зависимости коэффициентов отражения и пропускания от частоты. Графики коэффициента отражения (зеленый цвет) и коэффициента пропускания (сиреневый) соответствуют подложке толщиной 1,2 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,5$ (рис. 7). Подложке толщиной 1,2 мм с

диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,0$ соответствуют графики коэффициента отражения (зеленый цвет) и коэффициента пропускания (сиреневый) (рис. 8). Видно, что при уменьшении диэлектрической проницаемости минимумы коэффициентов отражения и пропускания сдвигаются в сторону более высоких частот (на 0,5 ГГц для коэффициента отражения, на 0,4 ГГц для коэффициента пропускания).

При добавлении к структуре «омега» дополнительного слоя диэлектрика толщиной 0,8 мм с диэлектрической проницаемостью, равной диэлектрической проницаемости подложки, происходит смещение минимумов коэффициентов отражения и пропускания в низкочастотную область (подложке толщиной 2 мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,0$ (рис. 8), $\varepsilon = 4,5$ (рис. 7), соответствуют графики коэффициента отражения (синий цвет) и коэффициента пропускания (красный)). Причем, минимум коэффициента отражения смещается сильнее (на 1,1 ГГц для коэффициента отражения, на 0,6 ГГц для коэффициента пропускания). Также появляются дополнительные минимумы коэффициентов отражения и пропускания на частотах выше 12 ГГц.

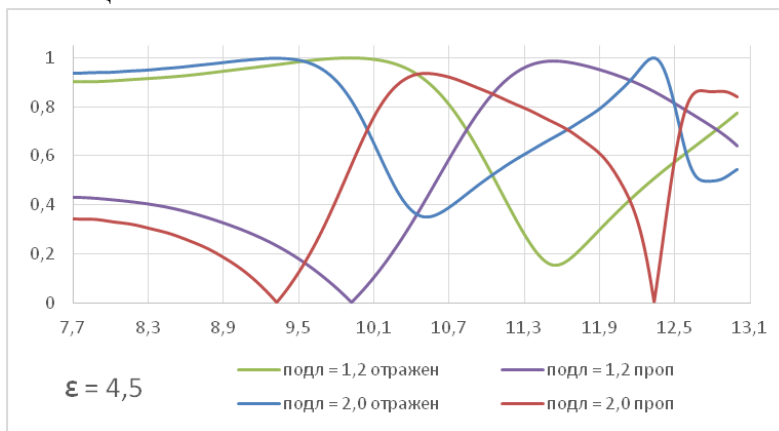


Рисунок 7. Частотные зависимости коэффициентов отражения и пропускания ($\varepsilon = 4,5$).

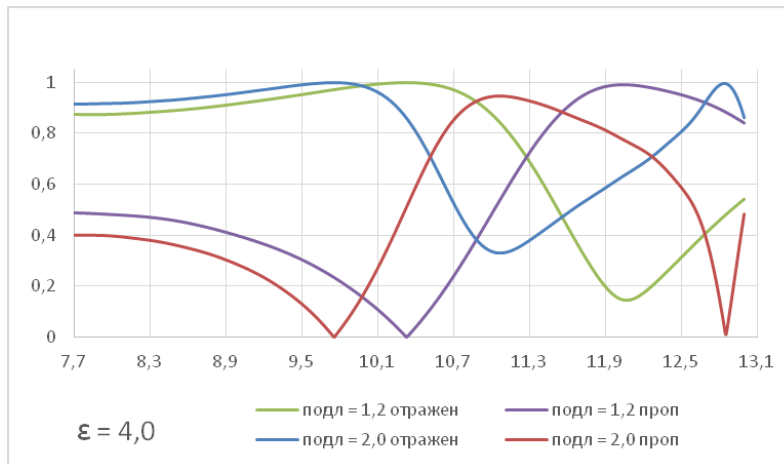


Рисунок 8. Частотные зависимости коэффициентов отражения и пропускания ($\varepsilon = 4,0$).

Были изучены технологии создания электродинамических структур (химический, механический, лазерная гравировка) и созданы образцы структур «омега» химическим и механическим методами. Проведены экспериментальное исследование и теоретический расчет коэффициентов отражения и пропускания полученных структур в 3-см диапазоне. Показано, что при уменьшении диэлектрической проницаемости подложки минимумы коэффициентов отражения и пропускания сдвигаются в сторону более высоких частот. При добавлении к структуре дополнительного слоя диэлектрика

происходит смещение минимумов коэффициентов отражения и пропускания в низкочастотную область, причем, минимум коэффициента отражения смещается сильнее.

Исследование выполнено при **финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00603 А)**.

Список литературы

1. Лагарьков А. Н., Кисель В. Н. *Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология.* – 2018. – № 1. – С. 10-20.
2. Гуляев Ю. В. и др. *Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестник РАН.* – 2008. – Т. 78. – № 5. – С. 438-457.
3. Kumar N. S. et al. *A Review on Metamaterials for Device Applications // Crystals.* – 2021. – Vol. 11(5). – P. 518.
4. Михайлов А. И. и др. *Лабораторный практикум по физике полупроводниковых приборов: Учеб. пособие. В 2-х частях. Ч. 1.* – Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002. – 72 с.
5. Михайлов А. И. и др. *Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие.* – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2007. – 164 с.
6. Михайлов А. И. и др. *Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники: Планы семинарских занятий.* – Саратов: Ред. журн. «Промышленность Поволжья», 2008. – 116 с.
7. Михайлов А. И. и др. *Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники. Планы семинарских занятий.* – Germany: LAP LAMBERT, 2017. – 228 с.
8. Михайлов А. И., Сергеев С. А. *Физические основы твердотельной электроники: Учебное пособие.* 2-е изд. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2020. – 192 с.
9. Портнов С. А. *Физика и химия границ раздела фаз: Учебное пособие.* – Саратов: Саратовский источник, 2015. – 132 с.
10. Vendik I. B. et al. *3D isotropic metamaterial based on a regular array of resonant dielectric spherical inclusions // Metamaterials.* – 2009. – Vol. 3. – P. 140-147.
11. Вендик И. Б., Вендик О. Г. *Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // ЖТФ.* – 2013. – Т. 83. – № 1. – С. 3-28.
12. Altintas O. et al. *Design of a metamaterial inspired omega shaped resonator based sensor for industrial implementations // Physica E: Low-dimensional Syst. and Nanostr.* – 2020. – Vol. 116. – P. 113734.
13. Короневский Н. В. *Синтез и исследование свойств микрочастиц CaCO₃, выращенных на неорганических волокнах и модифицированных наночастицами Fe₃O₄ // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2017.* – Саратов: Саратовский источник, 2017. – С. 120-123.
14. Сергеев С. А. *Исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами CaCO₃ на сверхвысоких частотах // Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2017. – Т. 1. – С. 155-159.
15. Сергеев С. А. *Синтез и исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами CaCO₃ // НННФ: тезисы докладов.* – Саратов: Техно-Декор, 2017. – С. 249-251.
16. Короневский Н. В. *Формирование и исследование свойств микрочастиц карбоната кальция с наночастицами магнетита на неорганических нановолокнах // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии: VII Всеросс. конф.* – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 38-42.
17. Сергеев С. А. и др. *Технология получения микрочастиц карбоната кальция, модифицированных наночастицами магнетита, на неорганических волокнах // Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы.* – Саратов: Техно-Декор, 2018. – С. 76.
18. Volodkin D. V. et al. *Pure Protein Microspheres by Calcium Carbonate Templating // Angew. Chem., Int. Ed.* 2010, 49, 9258–9261.
19. Volodkin, D. *CaCO₃ Templated Micro-Beads and -Capsules for Bioapplications // Adv. Colloid Interface Sci.* – 2014. – Vol. 207. P. 306-324.
20. Fakhrullin R. F. et al. *Magnetically responsive calcium carbonate microcrystals // ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2009. – Vol. 1. – № 9. – P. 1847-1851.
21. Sukhorukov G. B. et al. *Porous calcium carbonate microparticles as templates for encapsulation of bioactive compounds // Journal of Materials Chemistry.* – 2004. – Vol. 14. – № 14. – P. 2073-2081.
22. Sergeeva A. *Composite Magnetite and Protein Containing CaCO₃ Crystals. External Manipulation and Vaterite→Calcite Recrystallization-Mediated Release Performance // ACS Applied Materials & Interfaces.* 2015. – Vol. 7. – Is. 38. – P. 21315-25.
23. Сергеева А. С. и др. *Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов.* – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. – С. 142-144.

24. Сергеев Р. С. и др. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития. – Саратов: Наука, 2014. – С. 244-249.
25. Сергеев Р. С. и др. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы. – Москва: Прондо. 2014. – С. 275-283.
26. Fajaroh F. et al. Synthesis of Magnetite Nanoparticles by Surfactant-Free Electrochemical Method in an Aqueous System // Adv. Adv. Powder Technol. – 2012. – Vol. 23. – P. 328-333.
27. Сергеев С. А. и др. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сборник статей. – Саратов: Наука, 2013. – С. 214-228.
28. Gorin D. A. Effect of microwave radiation on polymer microcapsules containing inorganic nanoparticles // Technical Physics Letters. – 2006. – Vol. 32. – № 1. – P. 70-72.
29. Sergeev S. A. et al. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Saratov, 2007. – P. 653606.
30. Сергеев С. А. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 439-444.
31. Рябов Е. А. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – Саратов: Саратовский источник, 2019. – С. 188-191.
32. Рябов Е. А. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // НННФ. – Саратов: Техно-Декор, 2019. – С. 214-216.