

Спектральные характеристики частотно-селективной поверхности с асимметричными крестообразными апертурами

Методом конечных элементов моделируются передаточные характеристики частотно-селективной поверхности с крестообразными апертурными элементами и центральной частотой 90 ГГц. Обнаружен эффект возникновения резонансов Фано для случая нарушения симметрии апертур. Установлены факторы появления и развития данного эффекта на примере сетчатого полосового фильтра W-диапазона.

Ключевые слова: частотно-селективная поверхность, миллиметровый диапазон, передаточные характеристики, математическое моделирование.

Важнейшей тенденцией развития современных радиолокационных, коммуникационных и измерительных систем микроволнового диапазона является появление и широкое применение двумерных частотно-селективных поверхностей (ЧСП), получивших в зарубежной литературе название *frequency-selective surfaces* (FSS). Они обладают весьма совершенными электродинамическими характеристиками, а по своим массогабаритным показателям превосходят традиционные функциональные СВЧ-устройства, что является важнейшим преимуществом для бортовых систем авиационной и космической техники.

Чаще всего ЧСП изготавливают по планарным технологиям в виде периодических резистивных элементов самой разнообразной топологии на тонкой диэлектрической подложке [1]. Такие структуры могут использоваться в качестве базовых элементов аттенуаторов, поляризаторов, диплексоров, фильтров, поглотителей и других устройств СВЧ-техники. Однако присутствие в их конструкции диэлектрика снижает надежность и приводит к росту потерь.

Привлекательной альтернативой планарным ЧСП являются полностью металлические сетчатые структуры в виде экранов с периодическими отверстиями, которые чаще всего используются в терагерцевом диапазоне [2]. Наиболее исследованными из них являются ЧСП с крестообразными апертурами. При этом металлические ЧСП в отличие от планарных, как правило, хорошо адаптированы только для фильтрации электромагнитных (ЭМ) сигналов. В настоящее время достигнуты серьезные успехи по созданию сетчатых полосовых фильтров с крестообразными апертурами и установлено влияние размеров этих апертур на амплитудно-частотные характеристики устройств фильтрации [3, 4].

Процессы взаимодействия микроволнового излучения с сетчатыми структурами являются достаточно сложными и для их математического моделирования, как правило, применяются различные численные методы и пакеты программ. Одним из малоизученных до сих пор физических эффектов, возникающих при рассеянии ЭМ волн на таких

структурах, является искажение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ЧСП, получившее название резонанса Фано. Ряд наблюдений данных резонансов при облучении терагерцевым излучением планарных метаповерхностей был сделан в [5, 6]. В частности, авторами [5] было отмечено, что одним из факторов появления таких резонансов может быть нарушение симметрии резистивных периодических элементов, формирующих конфигурацию ЧСП.

Целью данной работы было выяснение вопроса о влиянии асимметрии крестообразных апертур металлической сеточной структуры W-диапазона (75...110 ГГц) на возможность возникновения Фано резонансов. Для исследования процессов распространения ЭМ волн в ЧСП была построена трехмерная численная модель на методе конечных элементов (МКЭ) аналогичная модели, описанной в [7]. Эта модель позволяет анализировать ЭМ поля и параметры матрицы рассеяния всей системы используя только локальный участок ЧСП (рис.1) с периодическими граничными условиями по периметру единичной ячейки в плоскости xOy и соответствующими условиями на входе и выходе четырехполюсника, включающего эту ячейку. Предварительное тестирование данной модели по экспериментальным данным для крестообразных полосовых фильтров [1-3] показало высокую точность численного анализа.

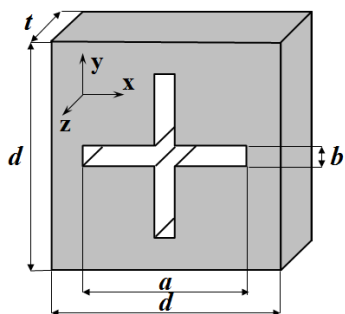


Рис. 1

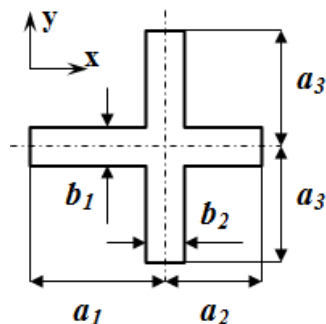


Рис. 2

Применительно к общепринятой конфигурации креста (рис.1) возможны разные варианты нарушения его симметрии. Введем новые обозначения для асимметричной крестообразной апертуры (рис.2), позволяющие рассмотреть два основных случая:

- $a_1 - a_2 = s$; $a_1 + a_2 = 2a_3 = a$; $b_1 = b_2 = b$;
- $a_1 = a_2 = a_3 = 0.5a$; $b_1 \neq b_2$.

В данной работе был проведен анализ только первого из этих вариантов для ситуации, когда одна из щелей сдвинута от оси симметрии, при прочих фиксированных размерах апертурного элемента: $a = 1630$ мкм, $b = t = 50$ мкм, $d = 1880$ мкм, обеспечивающих необходимую АЧХ полосового фильтра с центральной частотой 90 ГГц [8]. Численное моделирование такой структуры выявило появление резонансов Фано даже при минимальных сдвигах, определяемых параметром s . В качестве примера на рис.3 приведена АЧХ ЧСП с асимметрией апертуры для $s = 10$ мкм. Из этих данных видно, что на частоте примерно 96 ГГц происходит искажение кривой $T(f)$, характерное именно для Фано резонансов [6]. На рис.4 приведены участки АЧХ в диапазоне 92...100 ГГц для трех значений сдвига s , демонстрирующие развитие этого процесса.

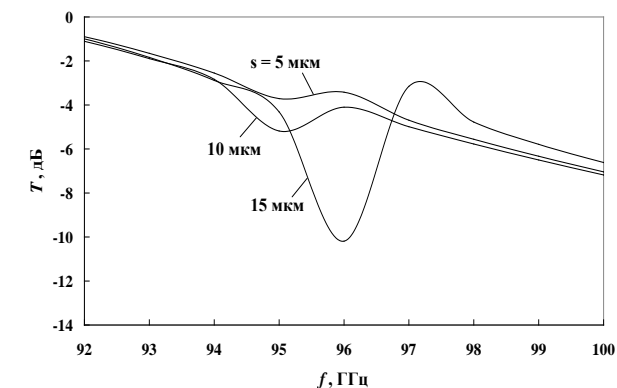
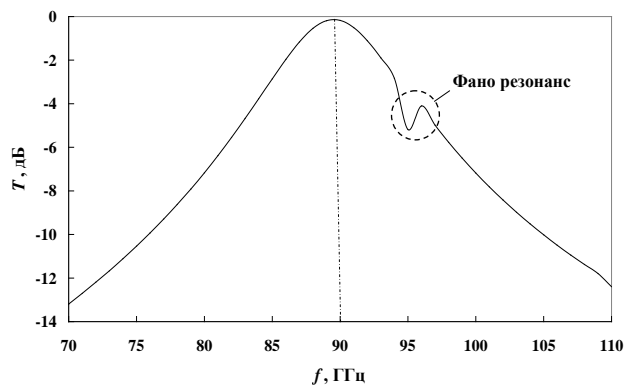


Рис. 3

Рис. 4

Таким образом, нарушение симметрии крестообразных апертурных элементов металлической ЧСП, обусловленное смещением ортогональных щелей относительно центральной оси является причиной появления резонансов Фано в длинноволновой части АЧХ. Обнаружение таких искажений АЧХ с помощью измерительной аппаратуры дает возможность контролировать возможные дефекты изготовления подобных ЧСП связанных с нарушением симметрии периодических апертурных элементов.

Библиографический список

1. Излучение и рассеяние электромагнитных волн / Под ред. В.А. Обуховца. - М.: Радиотехника, 2008 - 208 с.
2. Porterfield D.W. Resonant metal-mesh bandpass filters for far infrared / D.W. Porterfield, J.L. Hesler, R. Densing et al // Applied Optics. - 1994. - Vol. 33. - N 25. - P. 6046-6052.
3. Wang Y. Micromachined thick mesh filters for millimeter wave and terahertz applications / B. Yang, Y. Tian, R.S. Donnan et al // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. - 2014. - Vol. 4. - N 2. - P. 247-253.
4. Melo A.M. Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies / A.M. Melo, M.A. Kornberg, P. Kaufmann et al // Applied Optics. - 2008. - Vol. 47. - N 10. - P.6064-6069.
5. Singh R. The Fano resonance in symmetry broken terahertz metamaterials / R. Singh, I. Al-Naib, W. Cao et al // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. - 2013. - Vol.3. - N 6. - P.820-826.
6. Kanjanasit K. Fano resonance in a metamaterial consisting of two identical arrays of square metallic patch elements separated by a dielectric spacer / K. Kanjanasit, C.H. Wang // Applied Physics Letters. - 2013. - Vol.102. - 251108.
7. Алавердян С.А. Оптимизация двумерных периодических структур с крестообразными апертурными элементами / С.А. Алавердян, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов // Радиотехника и электроника. - 2016. - Т. 61. - № 9. - С. 940-945.
8. Комаров В.В. Однослойные сверхузкополосные сеточные фильтры / В.В. Комаров, А.С. Петушков // Радиотехника. - 2017. - № 7. - С. 103-106.