

**П.А. Белов, А.П. Слобожанюк, Д.С. Филонов**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
РАДИОФИЗИКИ И ТОМОГРАФИИ**

**Санкт-Петербург  
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**П.А. Белов, А.П. Слобожанюк, Д.С. Филонов**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ**  
**РАДИОФИЗИКИ И ТОМОГРАФИИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика  
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2020

Белов П.А., Слобожанюк А.П., Филонов Д.С., Экспериментальные методы радиофизики и томографии – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 59 с.

Рецензент(ы):

Сочава Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент (квалификационная категория "доцент практики") физико-технического факультета, Университета ИТМО.

Пособие содержит методические указания к трем лабораторным работам по разделу «Ближнепольные характеристики излучающих антенн и рассеивающих объектов», двум – по разделу «Дальнепольные характеристики активных и рассеивающих объектов» и двум – по разделу «Резонансные структуры в магнитно-резонансном томографе» курса «Технологии и экспериментальные методы в радиофизике и томографии».

Пособие составлено с учётом проведения лабораторных работ на специализированных стендах лабораторий электрических цепей и безэховой камеры физико-технического факультета СПбНИУ ИТМО.

Пособие предназначено для студентов технических направлений подготовки (специальностей) неэлектротехнического профиля.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Белов П.А., Слобожанюк А.П., Филонов Д.С., 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

1 БЛИЖНЕПОЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗОМКНУТЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ РАЗНОГО ТИПА .....	4
2 МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ РАЗОМКНУТОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА .....	16
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ОБЪЕКТА ПОСРЕДСТВОМ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО СЕНСОРА .....	24
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ .....	31
5 ВИЗУАЛИЗАЦИИ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ .....	38
6 ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ .....	44
7 РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ .....	51

# 1 БЛИЖНЕПОЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗОМКНУТЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ РАЗНОГО ТИПА

Цель работы – исследовать разомкнутые кольцевые резонаторы посредством ближнепольного измерения.

Термин "метаматериал" впервые встречается в работах Дэвида Смита [1,2] применительно к искусственным периодическим структурам с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями (левосторонние среды). В отличие от обычных материалов, свойства которых определяются атомами и молекулами, из которых они состоят, свойствами метаматериалов можно управлять за счёт специальной формы и компоновки искусственно создаваемых "мета-атомов". Создание метаматериалов позволило существенно расширить представления об электромагнетизме, например, была показана возможность отрицательного преломления, инверсии эффекта Доплера и излучения Черенкова. Метаматериалы находят применение для разнообразных приложений: от субволнового разрешения [3] и трансформационной оптики [4] до перестраиваемых и активных материалов [5], фотоники [6] и плазмоники [7].

В обычных материалах размеры атомов на несколько порядков меньше, чем длина падающей электромагнитной волны. Таким образом, волна "чувствует" реакцию не отдельного атома, а совместный отклик множества частиц. Это справедливо и в случае метаматериалов, но с одной оговоркой: электромагнитный отклик такого материала можно полностью контролировать (в определенном частотном диапазоне), а электромагнитные свойства можно описывать с помощью эффективных параметров:  $\epsilon_{eff}(\omega)$  - эффективной диэлектрической проницаемости и  $\mu_{eff}(\omega)$  - эффективной магнитной проницаемости.

Следует отметить, что левосторонние среды обсуждались в работах Л.И. Мандельштама [8] и Д.В. Сивухина [9]. В 1967 году советский физик В.Г. Веселаго впервые рассмотрел электродинамику сред с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями [10]. Он показал, что в этом случае показатель преломления материала получается отрицательный, в результате чего при падении луча из "обычной" среды на слой такого материала преломленный луч отклоняется от нормали в ту же сторону по отношению к падающему лучу. Сейчас это явление называется отрицательным преломлением.

В природе можно найти материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью – это металл в определенном частотном диапазоне (при

частотах ниже плазменной частоты). Гораздо сложнее создать материалы с отрицательной магнитной проницаемостью, в природе их не существует. По этой причине работа [10] долгое время не привлекала внимания. Материал с отрицательной магнитной проницаемостью может быть получен искусственно, при использовании резонансных металлических частиц, много меньших по сравнению с длиной волны, с очень большой магнитной поляризуемостью. Недавно была предложена такая частица, как разомкнутый кольцевой резонатор (англ. Split-Ring Resonator (SRR)) [11]. Из-за того, что частица резонансная, величина эффективной магнитной проницаемости значительно увеличивается, что приводит к большой положительной  $\mu_{eff}(\omega)$  вблизи низкочастотной стороны резонанса (частица является парамагнетиком), а также отрицательной  $\mu_{eff}(\omega)$  вблизи высокочастотной стороны резонанса (частица является диамагнетиком). Данная лабораторная работа будет посвящена исследованию электромагнитных свойств разомкнутых кольцевых резонаторов.

Ближнепольные характеристики кольцевых резонаторов.

Резонатор, предложенный в [11], состоит из двух разомкнутых металлических колец, которые размещаются на диэлектрической подложке.

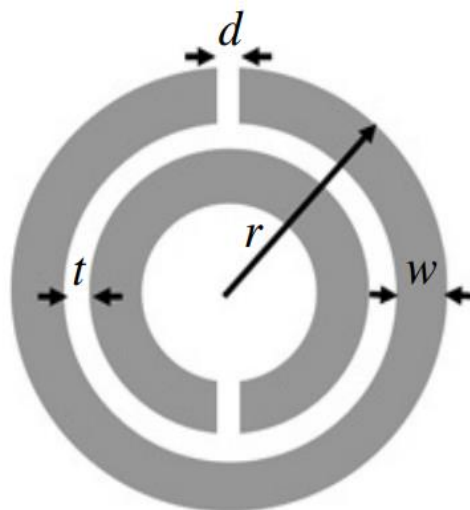


Рисунок 1. Разомкнутый кольцевой резонатор (SRR).

При возбуждении резонатора внешним переменным магнитным полем (поле пронизывают кольца) в кольцах возникает электрический ток, который, в зависимости от резонансных свойств элемента, создает собственное магнитное поле, усиливающее или ослабляющее внешнее поле. При наличии зазоров в кольцах элемент можно сделать резонансным для длин волн, превышающих

диаметр колец. Таким образом можно конструировать резонансные элементы меньше, чем длина волны, что критически важно при разработке метаматериалов. Внутренне разомкнутое кольцо необходимо для создания большой емкости в небольших зазорах между кольцами, это позволяет значительно снизить резонансную частоту и сконцентрировать электрическое поле (обычно выполняется условие связанности расстояния между кольцами (параметр  $t$ ) и зазора (параметр  $d$ ), равно  $t \leq d$ ). Рассматриваемый кольцевой резонатор может быть описан как LC колебательный контур [12, 13], где  $L$  - собственная индуктивность резонатора (металлический провод), а  $C$  - емкость, распределенная в зазоре между кольцами (см. Рис.2).

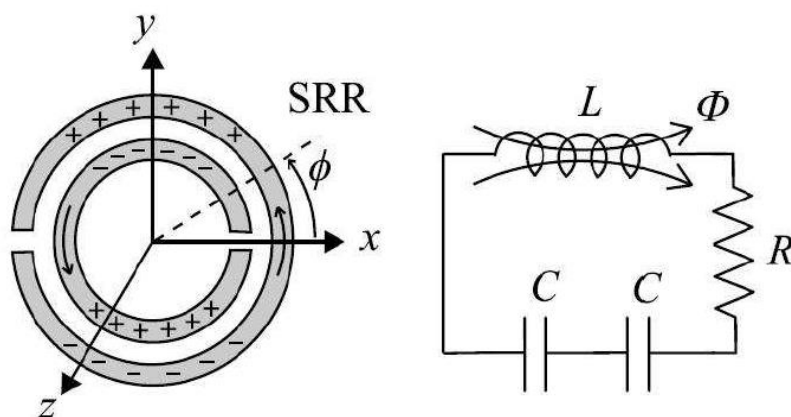


Рисунок 2. Схематичное распределение зарядов и электрическая схема разомкнутого кольцевого резонатора.

Вблизи резонанса разомкнутый кольцевой резонатор реагирует на внешнее магнитное поле не только как магнитный диполь (с магнитной поляризуемостью  $\alpha_{zz}^{mm}$ ), но и как электрический диполь [13]. Когда частица возбуждается, заряды в верхней половине резонатора должны быть отображением зарядов в нижней половине (см. Рис. 2). Таким образом, частица имеет ненулевой дипольный электрический момент вдоль оси  $y$  (т.е. образуются два параллельных электрических диполя), как следствие, у частицы на резонансе присутствуют кросс-поляризационные эффекты. Из принципа симметрии Онсагера следует, что резонатор также может быть возбужден внешним электрическим полем с определенной поляризацией. В обоих случаях (при возбуждении как магнитным полем, перпендикулярным кольцу, так и электрическим полем, направленным вдоль оси  $y$ ) одновременно порождаются сильный магнитный момент вдоль координаты  $z$  и сильный электрический момент вдоль координаты  $y$ , то есть частица является бианизотропной. Тут следует отметить, что разомкнутый кольцевой резонатор проявляет

нерезонансную электрическую поляризуемость в плоскости кольца, пропорциональную электрической поляризуемости металлического кольца с эквивалентными размерами.

В теоретических исследованиях и экспериментальных работах чаще всего используют разомкнутые кольцевые резонаторы, изготовленные на печатных платах методом гравировки или литографии. Основной отличительной особенностью является наличие диэлектрической подложки, на которой находятся проводящие элементы. Добавление подложки в значительной степени может менять результирующий отклик кольцевого резонатора, и, прежде всего, это проявляется в сдвиге резонансной частоты в низкочастотную область за счет контраста между показателем преломления воздуха и материала подложки. Кроме частотного сдвига, наблюдается уменьшение добротности собственного резонанса разомкнутого кольцевого резонатора за счет увеличения диэлектрических потерь в области локализации поля (ближнее поле затекает в материал подложки).

Экспериментально резонансная частота частицы может определяться несколькими бесконтактными методиками, например, в прямоугольном волноводе путем измерения коэффициента прохождения. В работе [13] показано хорошее соответствие между значениями резонансной частоты, вычисленной с использованием LC-модели, и полученной из измерений в волноводе. Возможность возбуждения резонатора электрическим полем также была подтверждена [14]. Измерялся коэффициент прохождения в волноводе, в который помещалась частица с различными ориентациями плоскости кольца относительно электрического и магнитного полей. При размещении частицы в положении 1 (см. Рис. 3) возбуждается как магнитный, так и электрический момент (вдоль оси  $y$ ), в результате чего получается самый глубокий пик резонанса. В положениях 2 и 3 возбуждается либо магнитный, либо электрический момент соответственно. Только при ориентации частицы в положении 4 нет ни магнитного поля, перпендикулярного кольцу, ни электрического поля вдоль оси  $y$  (в этом случае резонатор не возбуждается (Рис.3)).



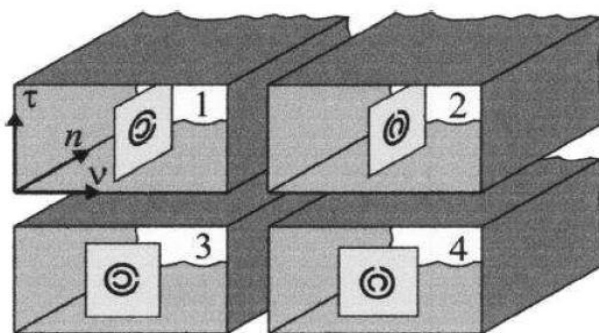
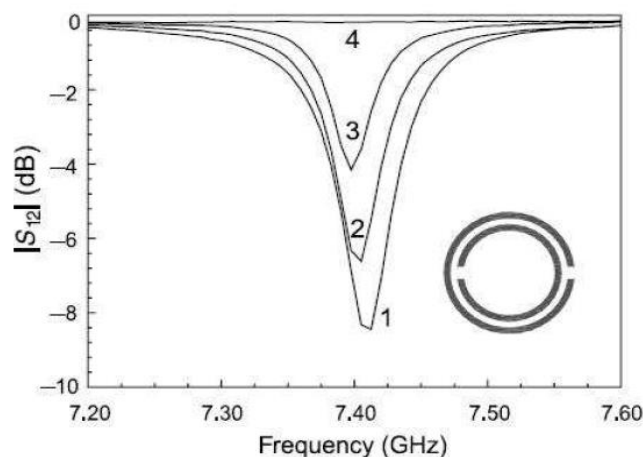


Рисунок 3. Спектральный отклик резонатора при различных ориентациях внутри волновода.

Разомкнутый кольцевой резонатор, предложенный в [11], является подходящей частицей для конструирования магнитных метаматериалов. Однако некоторые свойства резонатора (например, бианизотропия) могут стать причиной нежелательных эффектов в конечном образце метаматериала. В работе [12] было предложено оригинальное преобразование дизайна кольцевого резонатора, который позволяет избежать бианизотропии. Предложенная частица изображена на Рис. 4. Основное изменение заключено в конструировании элемента, с обеих сторон диэлектрической подложки которого расположены кольца. Это изменение не оказывает существенного эффекта на поведение резонатора, следовательно, топология такая же, как в случае бианизотропной частицы. Вблизи резонанса заряды в верхней половине частицы являются отображением зарядов в нижней половине, однако, как показано на Рис. 4, такое распределение зарядов не приводит к образованию электрического диполя. Поэтому эта частица не является бианизотропной. Схожий вывод можно получить из соображений симметрии - резонатор, изображенный на Рис. 4, имеет инверсию симметрии относительно центра обоих колец. Таким образом, кросс-поляризационные тензоры должны обнуляться. Следует отметить, что в

дальнейшем были предложены спиралеобразные кольцевые резонаторы [15], частицы с двойным разрезом [16] и полностью изотропные кольцевые резонаторы [17]. Более детально со всеми видами частиц такого типа можно ознакомиться в работе [18].

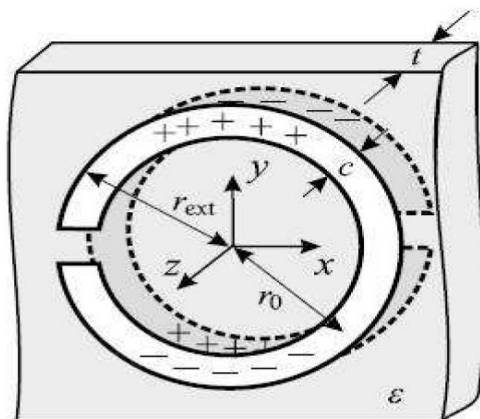


Рисунок 4. Двухсторонний разомкнутый кольцевой резонатор.

Альтернативной бесконтактной методикой измерения ближнепольных характеристик разомкнутых кольцевых резонаторов является измерение параметра отражения (прохождения) малой кольцевой антенны, поднесенной к измеряемому образцу. Данная методика будет использована в текущей лабораторной работе. На Рис. 5 показана схема кольцевой антенны, обладающей низким значением волнового сопротивления в широком диапазоне частот (0 – 1...10 ГГц – верхняя граница определяется спектральном положении собственного резонанса, который зависит от геометрических размеров и дополнительных элементов нагрузки). При этом анализ электромагнитных откликов производится по положению и добротности резонанса.

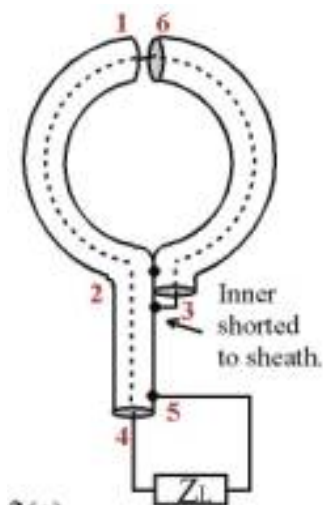


Рисунок 5. Конфигурация измерительной кольцевой антенны.

Подготовительный этап:

*Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio коэффициента отражения петлевой антенны, расположенной вблизи с кольцевым резонатором, в соответствии с заданиями.

Задание 1.

При моделировании достаточно использовать упрощенную модель кольцевой антенны – разомкнутое металлическое кольцо с активным источником.

Параметры кольцевой антенны:

- Диаметр кольца – 8 мм.
- Диаметр провода – 0.5 мм.
- Материал провода – медь.
- Ширина зазора – 10 град.
- В качестве источника использовать точечный источник (Discrete Port) с фиксированным волновым сопротивлением 50 Ом.

Рассчитать  $S_{11}$  для порта в диапазоне 0.1 – 20 ГГц.

Определить положение первого резонанса измерительной кольцевой антенны.

Задание 2.

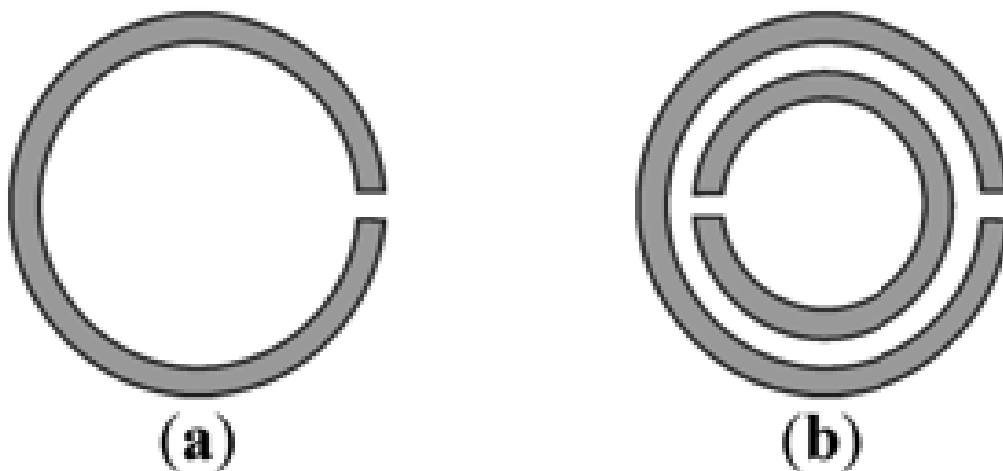


Рисунок 6. Разомкнутый кольцевой резонатор из (а) одного и (б) двух проводников.

Добавить в проект разомкнутый кольцевой резонатор с конфигурацией Рис. 6 (а) со следующими параметрами:

- Диаметр кольца определяется вариантом.
  - Диаметр провода 1 мм.
  - Зазор 0.5 мм.
  - Разомкнутый кольцевой резонатор и кольцевая антенна должны быть расположены параллельно и находиться в параллельных плоскостях, расстояние между которыми 3мм.
1. Рассчитать положение первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора по параметру  $S_{11}$ .
  2. Рассчитать добротность первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора.
  3. Принять зазор у разомкнутого кольцевого резонатора параметром  $d$  и определить сдвиг первого резонанса при изменении величины  $d$  в пределах [0.1 ... 2] мм. Определить тип сдвига (линейный / нелинейный).
  4. Поместить в зазор конденсатор (Lumped Element) с переменной емкостью.
  5. Определить, при какой величине емкости первый резонанс будет соответствовать заданной частоте (в соответствии с вариантом). Определить связь с параметром  $d$ .

Задание 3.

Сделать аналогичное моделирование с разомкнутым кольцевым резонатором с конфигурацией как на рис. 6(б) со следующими параметрами:

- Радиус внешнего кольца 12 мм.
- Ширина внутреннего и внешнего кольца 2 мм.
- Ширина зазора между кольцами 0.5 мм.
- Зазор во внешнем и внутреннем кольце 0.5 мм.
- Ширина и глубина подложки 30 мм.
- Высота подложки 1мм.
- Материал подложки FR-4.
- Разомкнутый кольцевой резонатор, и кольцевая антенна должны располагаться параллельно и находиться в параллельных плоскостях, расстояние между которыми 4 мм. Кольцевая антенна должна быть расположена со стороны металлических элементов.

1. Определить положение первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора.
2. Рассчитать добротность первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора.
3. Найти сдвиг первого резонанса при толщине подложки 0,5; 1; 2 мм
4. Определить изменения первого резонанса для разных материалов подложки:
  - 4.1.FR-4 (lossy).
  - 4.2.Isola IS680 (lossy).
  - 4.3.Rogers RO3003 (lossy).
  - 4.4.Rogers RO3006 (lossy).
  - 4.5.Rogers XT8100 (loss free).

*Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1.Метод расчёта.
  - 3.2.Частотный диапазон.
  - 3.3.Граничные условия.
  - 3.4.Общее число сеточных элементов.
4. Полученные результаты моделирования.
5. Выводы по полученным результатам.

*Дополнительные вопросы*

1. Эквивалентная RLC схема для Рис. 6(а) и Рис. 6(б).
2. Формула для расчета резонансной частоты RLC контура.

Варианты заданий:

№ варианта	D, мм	f <sub>рез</sub> , ГГц
1	10	1
2	10.5	1.2
3	11	1.4
4	11.5	1.6

5	12	1.8
6	12.5	2
7	13	2.2
8	13.5	2.4
9	14	2.6
10	14.5	2.8
11	15	3
12	15.5	3.2

### Практический этап:

Практический этап лабораторной работы состоит из двух частей. В первой части необходимо самостоятельно изготовить кольцевые резонаторы и измерить их характеристики. Во второй части измерить характеристики предложенных кольцевых резонаторов.

### *Оборудование и материалы*

Для анализа спектральных характеристик используется векторный анализатор спектра (конкретный тип уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детектора используется кольцевая антенна, соединенная с векторным анализатором спектра посредством коаксиальных проводников.

### *Порядок выполнения работы*

1. Изготовить самостоятельно 10 одинаковых кольцевых резонаторов как на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** б(а) (размеры уточнить у преподавателя). При изготовлении необходимо принимать во внимание результаты, полученные при выполнении подготовительного этапа.
2. Настроить измерительное оборудование:
  - 2.1. Включить векторный анализатор спектра.
  - 2.2. Собрать измерительную схему (убедится, что измерительная кольцевая антенна подключена к порту № 1).
  - 2.3. Выбрать измеряемый параметр  $S_{11}$ .
  - 2.4. Выбрать частотный диапазон 0.5 – 10 ГГц.
  - 2.5. Установить число точек в спектре 1601.

- 2.6. Мощность сигнала установить 0 dBm.
- 2.7. Тип отображения сигнала – линейный.
3. Определить рабочий частотный диапазон измерительной кольцевой антенны. По полученным данным произвести корректировку верхней границы измеряемого спектрального диапазона.
  4. Произвести калибровку.
  5. Зафиксировать измерительную кольцевую антенну, предусмотрев возможность однотипного поднесения измеряемых кольцевых резонаторов (должно сохраняться расстояние между кольцевым резонатором и его положением).
  6. Измерить положение и добротность первого резонанса для:
    - 6.1. Изготовленных колец.
    - 6.2. Колец, предложенных преподавателем.

*Добавить в отчет:*

1. Характеристики измеренных кольцевых резонаторов
2. Характеристики спектрального разброса изготовленных элементов

*Дополнительные вопросы*

1. С чем связан спектральный разброс изготовленных кольцевых резонаторов?
2. Почему важно фиксировать положение измерительной кольцевой антенны и измеряемого элемента?
3. Какую роль в измерении играют окружающие элементы (стол, оператор, провода и т.д.)?
4. Какие возможные области применения имеет (имеют) разомкнутые кольцевые резонаторы?

*Рекомендованная литература:*

[1] D.R. Smith, W. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).

[2] R. Shelby, D.R. Smith, and S. Schultz, Science 292, 77 (2001).

[3] J.B. Pendry, Phys. Rev. Lett., 85, 3966 (2000).

[4] J.B. Pendry, D. Schurig, and D.R. Smith, Science 312, 1780 (2000).

- [5] A.D. Boardman, V.V. Grimalsky, Yu.S. Kivshar, S.V. Koshevaya, M. Lapine, N.M. Litchinitser, V.N. Malnev, M. Noginov, Yu.G. Rapoport, and V.M. Shalaev, *Lasers Photonics Rev.* 5, 287 (2011).
- [6] V.M. Shalaev, *Nat. Photon.* 1, 41 (2007).
- [7] J.A. Schuller, E.S. Barnard, W. Cai, Y.C. Jun, J.S. White, and M.L. Brongersma, *Nat. Mater.* 9, 193 (2010).
- [8] Л.И. Мандельштам, Полное собрание трудов. Т. 5, М: Изд-во АН СССР (1950).
- [9] Д.В. Сивухин, *Оптика и спектроск.* 36 308 (1957).
- [10] В.Г. Веселаго, *УФН* 8, 2854 (1967).
- [11] J.B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W.J. Stewart, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, 2075 (1999).
- [12] R. Marques, F. Medina, R. Rafii-El-Idrissi, *Phys. Rev. B* 65, 144440 (2002).
- [13] R. Marques, F. Mesa, J. Martel and F. Medina, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 51, 2572 (2003).
- [14] J.D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. Marques, F. Falcone, T. Lopetegui, M.A.G. Laso, J. Garcia-Garcia, I. Gil, M. Flores, and M. Sorolla, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 53, 1451 (2005).
- [15] J.D. Baena, R. Marques, F. Medina, and J. Martel, *Phys. Rev. B* 69, 014402 (2004).
- [16] R. Marques, J.D. Baena, J. Martel, F. Medina, F. Falcone, M. Sorolla, and F. Martin, *Proc. ICEAA'03*, 439, Torino, Italy, 2003.
- [17] J.D. Baena, L. Jelinek, R. Marques, and J. Zehentner, *Appl. Phys. Lett.* 88, 134108 (2006).
- [18] R. Marques, F. Martin, M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications*, Wiley-Interscience, (2008).



## 2 МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ РАЗОМКНУТОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Цель работы – научиться управлять положением резонансной частоты посредством контактного и бесконтактного воздействия на нелинейный элемент.

Как было описано в первой лабораторной работе, метаматериалы, как правило, обладают уникальными свойствами в узком частотном диапазоне, в связи с этим активно развивается концепция перестраиваемых метаматериалов. Она заключается в возможности плавного изменения их свойств при помощи определенного внешнего воздействия. Ключ к перестройке резонансных метаматериалов лежит в воздействии на систему таким образом, чтобы изменить параметры резонанса. Характеристики метаматериала могут варьироваться, позволяя настраивать, например, «окно» пропускания на определенную частоту. Здесь и далее авторы методического указания ссылаются на материал из обзора [1] и рекомендуют читателю ознакомиться с несколькими обзорами [1, 2]. Можно выделить несколько способов реализации перестройки метаматериалов:

1. Модификация образующих элементов композитной структуры, например, разомкнутых кольцевых резонаторов или спаренных стержней. В СВЧ диапазоне такая модификация заключается во введении варакторного диода, как нелинейного, так и (в большинстве случаев) управляемого извне элемента, что ведет к сдвигу резонансной частоты разомкнутого кольца. Для композитной структуры это вызовет изменение магнитного или электрического отклика (или обоих одновременно) при изменении мощности падающей волны [3].

2. Подбор подложки, на которой располагаются слои элементов, такие как разомкнутые кольцевые резонаторы. Возможно использование специфических свойств подложки для достижения перестройки отклика всей структуры [4]. Схожим образом подложка может менять свои свойства при освещении.

3. Контроль свойств метаматериала путем изменения геометрии структуры с целью модификации ближнепольного взаимодействия между образующими структуру элементами – так называемая структурная перестройка [5].

Как было показано в лабораторной работе №1, разомкнутые кольцевые резонаторы имеют прямой и простой (в общем случае) RLC аналог, а также обладают высокой добротностью (первый резонансный пик имеет достаточно узкую полосу), поэтому эти элементы хорошо подходят для рассмотрения методов перестройки.

Метод, основанный на перестройке RLC контура, подразумевает прямое изменение у одного или нескольких элементов величины емкости и/или индуктивности. Наиболее распространенным способом является изменение величины ёмкости конденсатора. В качестве такого элемента может использоваться варакторный диод. Этот элемент обладает перестраиваемой емкостью, которая может изменяться в зависимости от величины приложенного обратного напряжения. При этом может наблюдаться линейное или нелинейное изменение резонансной частоты разомкнутого кольцевого резонатора.

Для изучения перестраиваемости резонансной частоты рассмотрим единичный разомкнутый кольцевой резонатор, расположенный на подложке (FR4) на основе медной металлизации [6], как показано на Рис. 7(a). Радиус внутреннего кольца составляет 2,56 мм. Оба кольца имеют ширину 1,44 мм, расстояние между кольцами, так же как и величина щели размыкания, равно 0,32 мм.

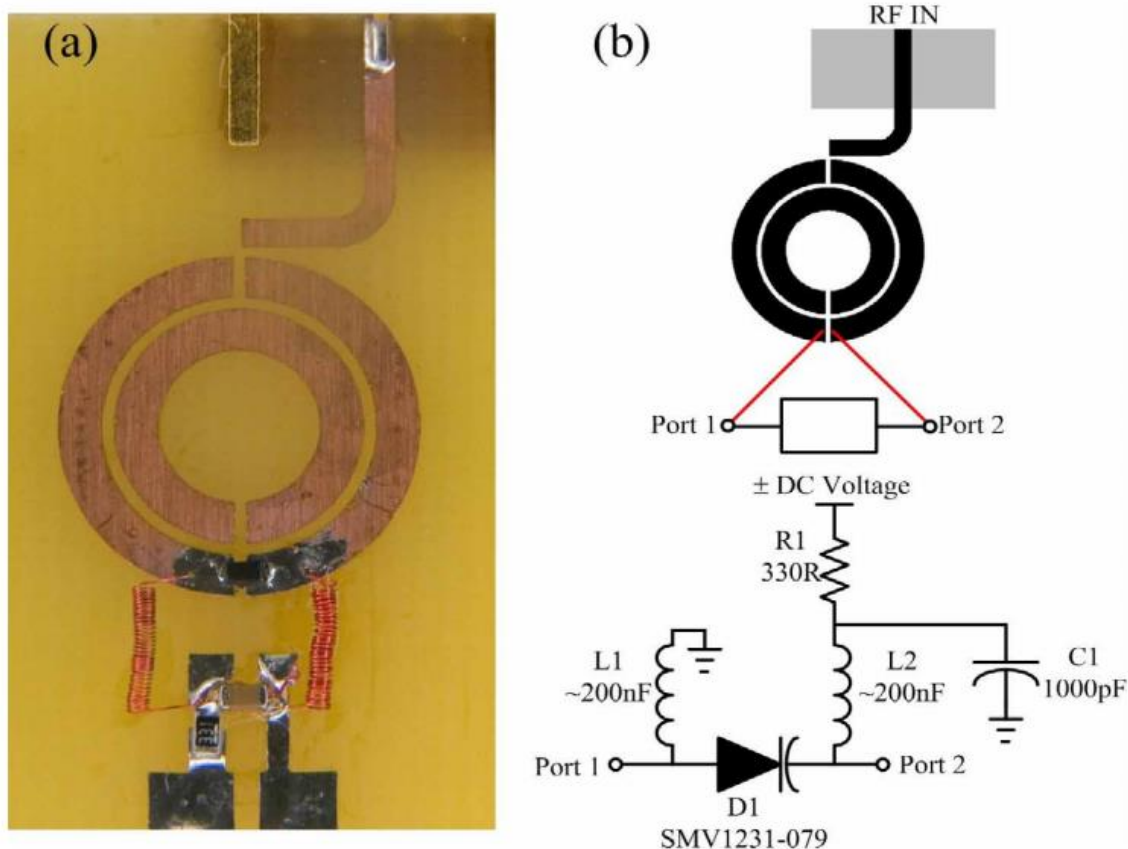


Рисунок 7. Экспериментальный образец структуры, состоящей из разомкнутого кольцевого резонатора, нагруженного варакторным диодом:

- (а) фотография изготовленного разомкнутого кольцевого резонатора и контура смещения для прямой настройки резонансной частоты; (б) структура резонатор–диод и схема контура смещения [3].

Простая цепь смещения состоит из индуктивностей ( $L_1$ ,  $L_2$ ) и развязывающего конденсатора ( $C_1$ ), что схематично проиллюстрировано на Рис.7(б). Отметим, что для представленного образца при обратном напряжении смещения величиной около 10 В (на графике не показано) резонансная частота может быть смещена до 2,9 Г. При уменьшении напряжения смещения до 1 В резонансная частота снижается до 2,27 ГГц, то есть ширина полосы перестройки составляет 0,63 ГГц, что эквивалентно диапазону перестройки приблизительно 26% (Рис. 8).

Различные режимы перестройки могут достигаться путем добавления индуктивности параллельно варакторному диоду [7]. Индуктивность способна менять знак нелинейности и исключает эффект памяти, обусловленный накоплением заряда в варакторном диоде. В дополнение к этому при более высоких мощностях нелинейный отклик разомкнутого кольцевого резонатора становится многозначным, открывая дорогу к созданию бистабильных перестраиваемых метаматериалов [7].

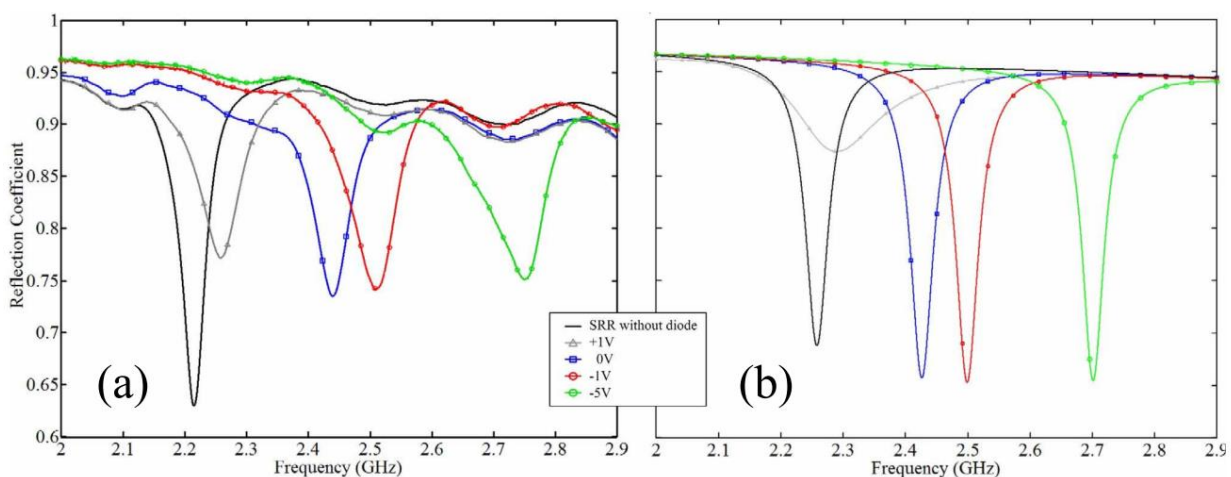


Рисунок 8. Спектральная зависимость модуля коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) полученная (а) экспериментально и (б) численно в случае подачи различного напряжения на диод интегрированный в разомкнутый кольцевой резонатор [3].

Подготовительный этап:

*Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio параметров отражения в соответствии с заданиями.

Задание 1 (аналогично лабораторной работе №1).

При моделировании использовать упрощенную модель кольцевой антенны – разомкнутое металлическое кольцо с активным источником.

Параметры кольцевой антенны:

- Диаметр кольца – 8 мм.
- Диаметр провода – 0.5 мм.
- Материал провода – медь.
- Ширина зазора – 10 град.
- В качестве источника использовать точечный источник (Discrete Port) с фиксированным волновым сопротивлением 50 Ом.

Задание 2.

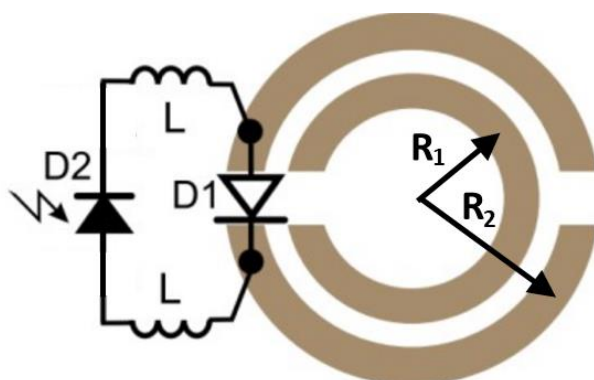
Добавить в проект разомкнутый кольцевой резонатор с конфигурацией (Рис. 6(а) лабораторная работа №1) со следующими параметрами:

- Радиус кольца 12.25 мм.
- Диаметр провода 1 мм.
- Толщина кольца 0.1 мм.
- Зазор 0.5 мм.
- В зазор поместить конденсатор (Lumped Element) емкость которого может меняться аналогично варакторному диоду SMV1413 (характеристики элементов необходимо найти самостоятельно).
- Разомкнутый кольцевой резонатор, и кольцевая антенна должны быть расположены параллельно и находиться в параллельных плоскостях, расстояние между которыми 3 мм.

1. Рассчитать по параметру  $S_{11}$  положение первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора.
2. Определить максимальный частотный сдвиг первого резонанса при изменении емкости варакторного диода в возможных пределах.

Задание 3.

1. Произвести расчет элементов для схемы:



- D1 – варакторный диод (SMV1413, при моделировании принять как переменный конденсатор).
  - D2 – светодиод, на который производится засветка когерентным лазером (длина волны лазера определяется вариантом).
  - L – фильтрующая индуктивность, ограничивающее протекание СВЧ сигнала в фотодиод.
  - Ширина внутреннего и внешнего кольца 2 мм.
  - Ширина зазора между кольцами 0.5 мм.
  - Зазор во внешнем и внутреннем кольце 0.5 мм.
  - Ширина и глубина подложки 30мм.
  - Высота подложки 1мм.
  - Материал подложки FR-4.
  - Разомкнутый кольцевой резонатор и кольцевая антенна должны быть расположены параллельно и находиться в параллельных плоскостях, расстояние между которыми 3 мм. Антенна должна находиться со стороны металлических элементов.
2. Подобрать в соответствии с вариантом наиболее подходящий фотодиод, имеющий наибольшую эффективность генерации на указанной длине волны. Определить его рабочее напряжение при  $E_e \approx 1 \text{ mW/cm}^2$  (стандартная интенсивность). Использовать информацию с сайта <https://ru.mouser.com>
  3. При моделировании принять фотодиод в качестве конденсатора с постоянной емкостью (определяется на основе характеристик выбранного фотодиода).
  4. Определить емкостной сдвиг варакторного диода при условии, что всё напряжение, генерируемое на фотодиоде, передается без потерь и приводит к смещению его номинала.
  5. Определить сдвиг частоты первого резонанса разомкнутого кольцевого резонатора.

### *Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1. Метод расчёта.

- 3.2. Частотный диапазон.
- 3.3. Граничные условия.
- 3.4. Общее число сеточных элементов.
- 4. Полученные результаты моделирования.
- 5. Наименование используемых элементов, основные характеристики, которые были использованы при моделировании, их технические характеристики в отдельном файле.
- 6. Выводы по полученным результатам.

*Дополнительные вопросы*

- 1. Методы фильтрации СВЧ сигнала.
- 2. Диапазоны применимости СВЧ элементов (резистор, конденсатор, катушка индуктивности).
- 3. ВАХ и C(U) диодов.
- 4. Примеры использования перестраиваемых элементов в повседневной жизни.

*Варианты заданий:*

№ варианта	$\lambda$ , нм
1	400
2	450
3	500
4	550
5	600
6	650
7	700
8	750
9	800
10	850
11	900
12	950

*Практический этап:*

Практический этап лабораторной работы состоит из двух этапов. На первом этапе производится исследование перестройки резонансной частоты под

действием оптического излучения на светочувствительный элемент. На втором этапе перестройка резонансной частоты за счет изменения мощности СВЧ сигнала.

### *Оборудование и материалы*

Для анализа спектральных характеристик используется векторный анализатор спектра (конкретный тип уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детектора используется кольцевая антенна, соединенная с векторным анализатором спектра посредством коаксиальных проводников.

Исследуемые элементы:

1. Разомкнутый кольцевой резонатор с варакторным и фото-диодами.
2. Разомкнутый кольцевой резонатор с варакторным диодом.

### *Порядок выполнения работы*

1. Настройка измерительного оборудования:
  - 1.1. Аналогично лабораторной работе №1
2. Измерить положение первого резонанса для:
  - 2.1. Разомкнутого кольцевого резонатора со светодионом с засветкой и без.
  - 2.2. Разомкнутого кольцевого резонатора с варактором для разной мощности сигнала  $P \in [-5 \dots 15] \text{ dB}$ .

*Добавить в отчет:*

1. Характеристики измеренных кольцевых резонаторов с указанием нагрузочных элементов.
2. Величины сдвигов резонансной частоты.
3. Характер сдвига резонансной частоты (линейный / нелинейный).

### *Дополнительные вопросы*

1. Оценить величину мощности СВЧ сигнала, необходимую для аналогичного частотного сдвига при увеличении расстояния между кольцевой антенной и разомкнутым кольцевым резонатором в 2 и в 4 раза.
2. Дать рекомендации по выбору фотодиода, варакторного диода, частоты СВЧ сигнала.

Рекомендованная литература:

- [1] Ю.С. Кившарь, А.А. Орлов, Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, № 3, 79, 1-10 (2010).
- [2] M. Lapine, I. V. Shadrivov and Y. S. Kivshar, Rev. Mod. Phys. 86, p. 1093 (2014).
- [3] I.V. Shadrivov, S.K. Morrison, and Yu.S. Kivshar, Optics Express 14, 9344 (2006).
- [4] S. O'Brien, D. McPeake, S.A. Ramakrishna, and J.B. Pendry, Phys. Rev. B. 69, 241101 (2004).
- [5] M. Lapine, D. Powell, M. Gorkunov, I. Shadrivov, R. Marques, and Yu. S. Kivshar, Appl. Phys. Lett. 95, 084105 (2009).
- [6] D.A. Powell, I.V. Shadrivov, Yu.S. Kivshar, and M.V. Gorkunov, Appl. Phys. Lett. 91, 144107 (2007).



### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ОБЪЕКТА ПОСРЕДСТВОМ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО СЕНСОРА

Цель работы – научиться измерять диэлектрическую проницаемость у жидкости и твердого объекта посредством ближнепольного сенсора.

Знание электромагнитных свойств (материальных параметров) является исключительно важным как в фундаментальном изучении природных явлений, так и в промышленной индустрии. Значения материальных параметров материалов используются в самых различных областях, где происходит взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Последнее объясняется тем, что эти параметры определяют поведение электромагнитной волны внутри материала и на его границе или, другими словами, являются коэффициентом, описывающим индивидуальные свойства среды в макроскопическом рассмотрении.

Рассмотрим материальные уравнения электрической и магнитной индукции:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \end{aligned}$$

где:

$\vec{D}$  – электрическая индукция;

$\vec{E}$  – напряженность электрического поля;

$\vec{B}$  – магнитная индукция;

$\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;

$\mu$  – магнитная проницаемость.

Здесь и далее мы говорим об относительной диэлектрической и магнитной проницаемостях. Важно отметить, что  $\epsilon, \mu \in \mathbb{C}$  в общем случае являются частотно-зависимыми и могут быть записаны в виде:

$$\epsilon \equiv \epsilon(\omega) = \Re(\epsilon) + i \cdot \Im(\epsilon) = \epsilon' + i\epsilon'';$$

$$\mu \equiv \mu(\omega) = \Re(\mu) + i \cdot \Im(\mu) = \mu' + i\mu''.$$

Через материальные параметры можно выразить отношение скорости распространения электромагнитной волны в двух средах в виде:

$$\frac{v_1}{v_2} \equiv n_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}$$

где  $v_i$  - скорость распространения электромагнитной волны в  $i$ -ом материале, а величину  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  называют показателем преломления. Важно, что мы рассматриваем материалы с относительно малыми потерями. Зависимости  $\epsilon(\omega)$  и  $\mu(\omega)$  часто называют просто дисперсией материала.

Материальные параметры фактически связывают микромир (т.е. отклик атомов и молекул, из которых состоит рассматриваемый объект) с макромиром, в котором фактически производится характеристика взаимодействия объекта с электромагнитным излучением. Стоит отметить, что частотная зависимость материальных параметров (дисперсия) возникает за счет спектральных откликов «комплектующих» макрообъекта. Для примера рассмотрим диэлектрическую проницаемость воды в диапазоне частот от 0–10<sup>15</sup> Гц (DC – оптический диапазон).

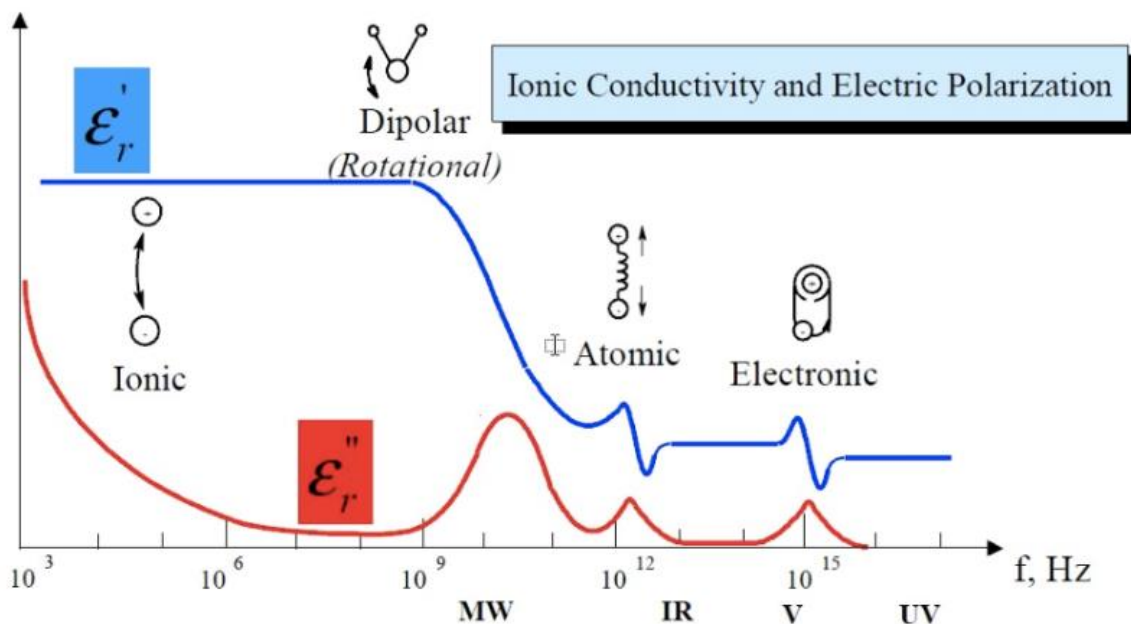


Рисунок 9 Дисперсия воды в широком частотном диапазоне.

Из схемы (Рис. 9) можно видеть, как меняется диэлектрическая проницаемость воды в зависимости от частоты или от «основного элемента», откликающегося на электромагнитное излучение. Так, на низкой частоте (DC - 1 ГГц)  $n \approx 9$ , а в оптическом диапазоне частот показатель преломления воды  $n \approx 1.33$ .

Для определения (или экстракции) материальных параметров существуют шесть основных техник, основанных на анализе параметров отражения и пропускания электромагнитного излучения (Рис. 10). В общем случае (для изотропного материала) процесс нахождения материальных параметров сводится к решению уравнения с четырьмя неизвестными -  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ , для

определения которых необходимо прямое измерение  $R, T \in \mathbb{C}$ . Однако, принимая во внимание, что широкий класс материалов можно описать только электрическим ( $\mu \equiv const$ ) или магнитным ( $\varepsilon \equiv const$ ) откликом, процесс измерения может быть упрощен и сведен к определению только  $R$  или  $T \in \mathbb{C}$  или  $R, T \in \mathbb{R}$ .

Более детально с каждой из методик можно ознакомиться самостоятельно в [1, 2].

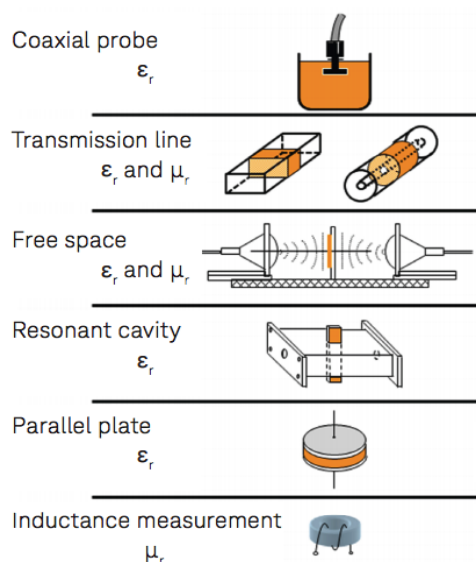


Рисунок 10. Методы экстракции материальных параметров

Основное отличие этих техник заключается в рабочем частотном диапазоне, соотношении доступных для измерения параметров  $\varepsilon' / \varepsilon''$ , форме и типу (твердое, жидкое, газообразное) измеряемого образца и др. Например, компания Agilent предлагает измерительные приборы, представленные на Рис.11, где прямоугольными блоками показаны области применимости:

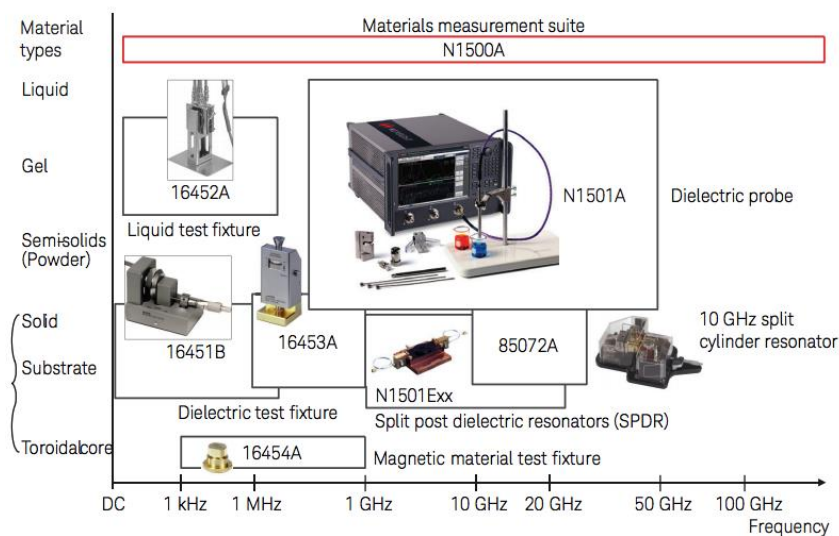


Рисунок 11. Приборы для измерения материальных параметров [3]

В данной лабораторной работе в качестве примера более подробно рассмотрим метод экстракции диэлектрической проницаемости у объектов с фиксированной геометрической формой.

Известно, что диэлектрические объекты могут обладать собственными резонансами, причем для шара радиуса  $R$ , изготовленного из материала с коэффициентом преломления  $n_{\text{шара}}$ , положение первого резонанса может быть определено в виде

$$\lambda_{1\text{рез.}} \cong 2n_{\text{шара}}R,$$

Применяя упрощение, что материал шара не имеет магнитного отклика  $\mu(\omega) \equiv 1$ , получаем:

$$\lambda_{1\text{рез.}} \cong 2\sqrt{\varepsilon_{\text{шара}}}R \quad (*).$$

### Подготовительный этап:

#### *Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio параметров отражения и произвести расчёт диэлектрической проницаемости в соответствии с заданиями. Для расчета применять частотный метод (Frequency domain solver).

#### Задание 1.

При моделировании необходимо использовать в качестве источника кольцевую антенну.

Параметры антенны:

- Диаметр кольца – 6 мм;
- Диаметр провода – 0.5 мм;
- Материал провода – медь;
- Ширина зазора – 10 град;
- В качестве источника использовать точечный источник (Discrete Port) с фиксированным волновым сопротивлением 50 Ом;
- В качестве резонансной структуры добавить в проект шар радиуса  $R_{ш} = 10$  мм;
- Материал шара задать постоянной величиной  $\varepsilon_{const}$  (определяется вариантом).

1. Определить положение первого резонанса.
2. Найти диэлектрическую проницаемость по формуле (\*) на основе п.1.

3. Рассчитать погрешность определения диэлектрической проницаемости в процентах.

Задание 2.

- Описать шар новым материалом с параметрами:
  - $\varepsilon' = 80, \varepsilon'' = 1 @ 0.1 \text{ GHz}$
  - $\varepsilon' = 40, \varepsilon'' = 1 @ 5 \text{ GHz}$
1. Определить положение первого резонанса для  $R_{\text{ш}} \in [5:30]$  мм, используя параметрический метод с логарифмическим шагом (Parameter Sweep, 7 steps);
  2. Принять  $\varepsilon'(\omega)$ ;
  3. Найти погрешность  $\Delta\varepsilon'(R_{\text{ш}})$ .

Задание 3.

- Описать шар новым материалом с параметрами:
  - $\varepsilon' = 80, \varepsilon'' = 5 @ 0.1 \text{ GHz}$
  - $\varepsilon' = 40, \varepsilon'' = 5 @ 5 \text{ GHz}$
1. Используя параметрический метод с логарифмическим шагом (Parameter Sweep, 7 steps), определить положение первого резонанса для  $R_{\text{ш}} \in [5:30]$  мм.
  2. Принять  $\varepsilon'(\omega)$ .
  3. Найти погрешность  $\Delta\varepsilon'(R_{\text{ш}})$ .

### *Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1. Метод расчёта.
  - 3.2. Частотный диапазон.
  - 3.3. Граничные условия.
  - 3.4. Общее число сеточных элементов.
  - 3.5. Метод моделирования.
4. Полученные результаты моделирования.
5. Расчёт погрешности.
6. Выводы по полученным результатам.

### Дополнительные вопросы

1. Чему соответствует резонансная длина волны, определяемая по формуле (\*)?
2. Когда может быть применено условие  $\mu(\omega) \equiv 1$ ?
3. Что описывают материальные уравнения?
4. Какой вид приобретают материальные уравнения в анизотропном случае и как могут быть определены материальные параметры в этом случае?
5. Как связаны между собой  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ ? (Соотношения Крамерса — Кронига).
6. Можно ли оценить потери в материале, используя описанный метод?

### Варианты заданий:

№ варианта	$\varepsilon_{const}$
1	21
2	22
3	23
4	24
5	25
6	26
7	27
8	28
9	29
10	30
11	31
12	32

### Практический этап:

Практический этап лабораторной работы состоит из двух этапов. На первом этапе производится характеристика керамических резонаторов. На втором этапе определяется характеристика жидкости.

### Оборудование и материалы

Для анализа спектральных характеристик используется векторный анализатор спектра (конкретный тип уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детектора используется кольцевая антенна, соединенная с векторным анализатором спектра посредством коаксиальных проводников.

Исследуемые элементы:

1. Набор диэлектрических сферических резонаторов.
2. Набор емкостей разного размера с жидкостью.

*Порядок выполнения работы*

1. Настроить измерительное оборудование аналогично лабораторной работе №1
2. Измерить:
  - 2.1. Радиусы керамических резонаторов.
  - 2.2. Положение первого резонанса для каждого керамического резонатора.
  - 2.3. Радиусы емкостей с жидкостью.
  - 2.4. Положение первого резонанса для каждой емкости.
3. Произвести нагрев жидкости:
4. Повторно измерить положение первого резонанса для каждой емкости.
5. Выбрать емкость с наиболее явным первым резонансом и постепенно добавить в нее соль:
6. Выявить изменение спектральных характеристик.

*Добавить в отчет:*

1. Характеристики измеренных резонаторов.
2. Определенные значения диэлектрических проницаемостей.

*Дополнительные вопросы*

1. Что изменилось при повышении температуры жидкости?
2. Может ли быть применена формула (\*) для определения диэлектрической проницаемости в данных примерах?
3. Что происходит при добавлении соли?

Рекомендованная литература:

[1] James R. Baker-Jarvis et al, “Dielectric and Conductor-Loss Characterization and Measurements on Electronic Packaging Materials”, Technical Note (NIST TN) – 1520 (2001)

[2] Pérez Cesaretti, Mauricio David (2012), “General effective medium model for the complex permittivity extraction with an open-ended coaxial probe in presence of a multilayer material under test”, [Dissertation thesis].

[3] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5980-2862EN.pdf>

## 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Цель работы – изучить характеристики диэлектрических волноводов на примере одномерного фотонного кристалла и цепочки диэлектрических цилиндров с высоким значением показателя преломления.

Микроволновый частотный диапазон, кроме непосредственного использования в различных областях науки и техники, также может быть использован для изучения сложных объектов и процессов, протекающих в других спектральных диапазонах. Данный подход основан на масштабируемости уравнений Максвелла во всем спектральном диапазоне, где могут быть введены материальные параметры, т.е. квантовыми взаимодействиями можно пренебречь. Такую область применимости также называют «максвелловской средой». При использовании данного приближения для изучения характеристик, например, антенны, известной в СВЧ диапазоне, нужно обеспечить аналогичные электродинамические условия в интересующем диапазоне спектра, например оптическом, по следующей схеме:

- Подобрать аналоги материалов в оптическом диапазоне, которые соответствуют материалам антенны в СВЧ диапазоне (аналогичные по дисперсии).
- Подобрать аналоги материалов в оптическом диапазоне материалам, окружающим антенну в СВЧ диапазоне (аналогичные по дисперсии).
- Произвести масштабирование всех геометрических параметров в соответствии с коэффициентом пропорциональности:

$$K = \frac{\lambda_{original}}{\lambda_{target}},$$

где  $\lambda_{original}$  – «рабочая» длина волны масштабируемого элемента,  $\lambda_{target}$  – длина волны, на которую проводится масштабирование.

Данная методика широко применяется для изучения, оптимизации и комбинирования различных оптических элементов. Это связано с существенными различиями в условиях проведения оптического и микроволнового эксперимента.

Недостатки (сложности) эксперимента в оптическом диапазоне частот:

- Сложность изготовления экспериментальных образцов.
- Высокая себестоимость экспериментальных образцов.



- Высокая стоимость измерительного и производственного оборудования.
- Ограничения в возможных формах образцов.
- Невозможность исключения влияния подложки.
- Отсутствие возможности прямого измерения всех компонентов электрического и магнитного поля (с фазой).
- Ограничения возможных углов обзора.
- Отсутствие возможности не инвазивного ближнепольного измерения.
- Большое время обратной связи (анализ образца – изготовление нового).

Преимущества эксперимента в микроволновом диапазоне частот:

- Простота изготовления экспериментальных образцов.
- Низкая стоимость оборудования и материалов.
- Практически отсутствуют ограничения на форму образца.
- Возможность измерения в свободном пространстве.
- Возможность прямого измерения всех компонентов электромагнитного поля (с фазой) практически в любые точки пространства.
- Возможность измерения без искажения ближнего поля.
- Низкое время обратной связи (анализ образца – изготовление нового), возможность механического и электродинамического изменения образца в процессе измерения.

Благодаря вышеупомянутым особенностям методика прототипирования в микроволновом диапазоне является наиболее удобной, быстрой и простой для изучения таких оптических элементов, как наноантенны, нановолноводы, слоистые структуры, рассеиватели различной природы, элементы переключения, деления оптического сигнала и многие другие.

Рассмотрим более подробно данную методику на двух примерах диэлектрических волноводов. Волновод первого типа относится к гибридным волноводам, т.е. волноводам, составленным из периодически повторяющихся элементов или, другими словами, из модулированной диэлектрической проницаемости (показателя преломления), причем период повторения подбирается таким образом, чтобы было возможно брэгговское переотражение света. При этом в случае, когда волновод имеет достаточное количество слоев (обычно больше 10), данный волновод становится частным случаем одномерного фотонного кристалла. Его ключевой особенностью является наличие периодических запрещенных зон или, на языке волноведущих характеристик волновода, обладающего областями спектра, в которых

отсутствует пропускание [1]. Спектральное положение центров запрещенных зон описывается соотношением  $m\lambda = n_1 \cdot d_1 + n_2 \cdot d_2$ ,

где  $\lambda$ - длина волны  $m$ -той запрещенной зоны,  $n_i, d_i$ - показатель преломления и толщина  $i$ -го слоя элементарной ячейки ширины  $a$  фотонного кристалла.

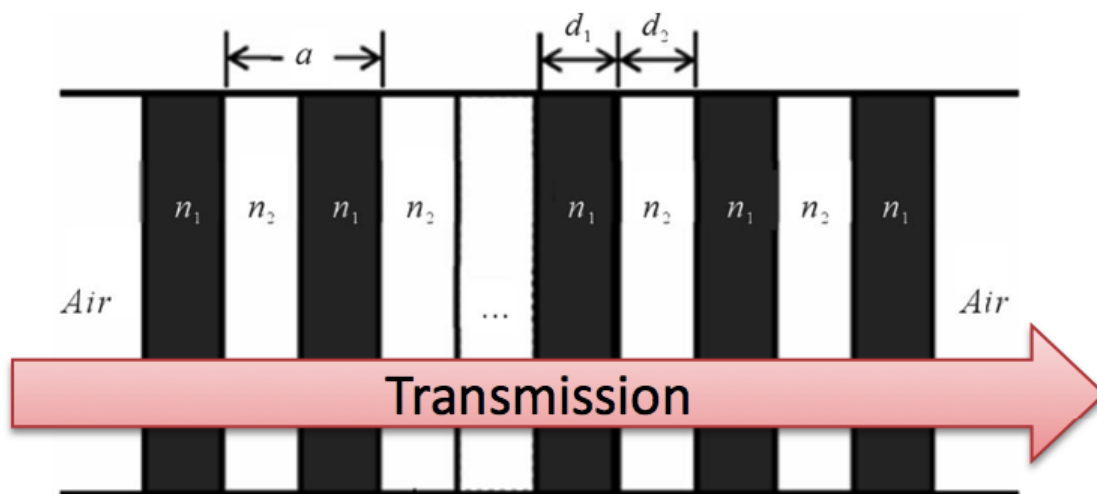


Рисунок 12. Схема одномерного фотонного кристалла

Для простоты рассмотрен одномерный случай фотонного кристалла, состоящий из двух периодически повторяющихся слоев с нормальным падением плоской волны (Рис. 12). В общем случае описание может включать в себя 1D, 2D и 3D геометрии с большим числом комбинированных материалов и дефектов.

Вторым типом диэлектрического волновода является цепочка резонаторов, состоящая из диэлектрических цилиндров с высоким значением показателя преломления. Следует отметить, что в оптическом диапазоне частот показатель преломления  $n > 3$  считается большим. Отличительной особенностью данного волновода является резонансное пропускание электромагнитного сигнала, за счет сильной диполь-дипольной (и более высоких порядков, например, квадрупольной) связи электрической и магнитной природы между соседними элементами цепочки [2]. В результате данный волновод имеет не только высокую эффективность передачи, но и поддерживает возможность изменения формы волноведущей цепочки практически любой сложности.

В качестве примера рассмотрим волновод, состоящий из диэлектрических цилиндров со следующими параметрами:

$$r = h = \text{const};$$

$$\varepsilon = 16, \quad \tan(\delta) = 10^{-4};$$

$$\frac{2r}{\lambda_t} \in [0.2 \dots 0.4],$$

где  $\lambda_t$  - диапазон длин волн с областями пропускания,  $h$  - высота цилиндра,  $r$  – радиус цилиндра, диэлектрическая проницаемость примерно соответствует кремнию (Si), который широко используется в оптическом и ближнем ИК диапазоне.

### Подготовительный этап:

#### *Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio параметров пропускания электромагнитных волн в соответствии с заданиями.

#### Задание 1.

Рассчитать одномерный фотонный кристалл с конфигурацией (Рис. 12) со следующими параметрами:

- $d_1 = 3$  мм.
- Положение центра первой запрещенной зоны 10 ГГц.
- $n_2$  – определяется вариантом.
- При моделировании считать слои бесконечными.
- В качестве источника использовать волноводный порт с выбранной поляризацией.
- Использовать приближение немагнитных материалов с маленькими потерями.

Определить:

1.  $d_2$
2. Частотный диапазон с явно выраженными первыми тремя запрещенными зонами при  $N$  (число повторений слоев) = 15.
3. Минимальное значение  $N$ , при котором первая запрещенная зона становится явно различима.

#### Задание 2.

1. Рассчитать волноведущие характеристики волновода на основе диэлектрических цилиндров со следующими параметрами:

- $r$  – определяется вариантом.
  - Материал соответствует оптическому кремнию.
  - Число цилиндров – 20.
  - Зазор между цилиндрами 0.5 мм.
  - Все цилиндры соосны.
  - Источник-приемник:
    - Аналогично кольцевой антенне в лабораторной работе №1.
    - Кольцевая антенна-источник находится перед передней гранью первого цилиндра так, чтобы между их поверхностями было 0.5 мм.
    - Кольцевая антенна-приемник находится за дальней гранью последнего цилиндра так, чтобы между их поверхностями было 0.5 мм.
2. Определить характеристику пропускания.
  3. Изогнуть волновод в центральной точке на  $90^\circ$  и определить характеристику пропускания.

### Задание 3.

1. Добавить в проект диэлектрическую подложку бесконечной толщины электродинамические характеристики которой соответствуют стеклу ( $\text{SiO}_2$ ) на 1000 нм. Считать, что все цилиндры касаются подложки.
2. Определить изменение волноведущих характеристик по сравнению с заданием 2. п.1.

### *Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1. Метод расчёта.
  - 3.2. Частотный диапазон.
  - 3.3. Граничные условия.
  - 3.4. Общее число сеточных элементов.
4. Полученные результаты моделирования.
5. Выводы по полученным результатам.

### *Дополнительные вопросы*

1. Как именно сложности оптического эксперимента решаются в СВЧ диапазоне?
2. Примеры используемых диэлектрических волноводов.
3. Брэгговская дифракция.
4. Примеры нерезонансных волноводов.

#### *Варианты заданий:*

№ варианта	$(n_2)^2$	$r$ , mm
1	10	3.5
2	12	3.6
3	14	3.7
4	16	3.8
5	18	3.9
6	20	4
7	22	4.1
8	24	4.2
9	26	4.3
10	28	4.4
11	30	4.5
12	32	4.6

#### *Практический этап:*

Практический этап лабораторной работы заключается в измерении параметров пропускания у волновода, состоящего из диэлектрических цилиндров.

#### *Оборудование и материалы*

Для анализа параметров пропускания у диэлектрического волновода используется векторный анализатор цепей (конкретный тип прибора уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детекторов используется две кольцевые антенны.

Исследуемые элементы:

1. Набор керамических резонаторов

2. Матрицы с разной формой линии, вдоль которой выкладываются керамические резонаторы

*Порядок выполнения работы*

1. Настройка измерительного оборудования: уточнить рабочий частотный диапазон у преподавателя.
2. Поместить керамические резонаторы в форму номер 1.
3. Измерить параметр пропускания через получившийся волновод.
4. Повторить п.2 и п.3 для всех предложенных форм.
5. Для п.2 последовательно убрать несколько резонаторов.
6. Оценить изменение параметра пропускания.

*Добавить в отчет:*

1. Описание экспериментальной установки.
2. Измеренные параметры пропускания.

*Дополнительные вопросы*

1. Как повысить точность измерения параметров пропускания?
2. Какое влияние на измеряемые характеристики может внести собственный резонанс кольцевой антенны?
3. Почему в спектре много резонансов, связанных с цилиндрами?

*Рекомендованная литература:*

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton Univ. Press (2008).
- [2] R. S. Savelev, A. P. Slobozhanyuk, A. E. Miroshnichenko, Y. S. Kivshar, and P. A. Belov, Phys. Rev. B. 89, 035435 (2014).

## 5 ВИЗУАЛИЗАЦИИ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы – научиться измерять и описывать ближнее поле проводника с током на примере проводников, расположенных в свободном пространстве, и микрополосковых линий.

Задача описания тока в проводнике всегда может быть разделена на две взаимосвязанные подзадачи – описание тока в проводнике и взаимодействие электромагнитного поля, наведенного движущимися зарядами вокруг проводника, с окружающими объектами. Уравнения Максвелла в совокупности с материальными уравнениями и граничными условиями устанавливают прямую зависимость влияния окружающих объектов на протекающий в проводнике ток посредством ближнепольного взаимодействия. Причем знание о токе в проводнике достаточно для определения ближнего поля в окружающих объектах, а информация о ближнем поле вокруг проводника однозначно определяет текущий в нем ток. Таким образом, измеренное ближнее поле может описать протекающий ток в проводнике, что является исключительно важным в случаях, когда прямое измерение тока технически невозможно, а также при проектировании и описании характеристик токоведущих линий в антеннах, системах передачи информации, печатных платах и т.д.

Экспериментальное измерение электромагнитного поля в общем случае сводится к последовательному измерению всех компонент электрического и магнитного поля, которые могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z; \\ \vec{H} &= \vec{H}_x + \vec{H}_y + \vec{H}_z,\end{aligned}$$

где  $\vec{E}_{x,y,z}, \vec{H}_{x,y,z} \in \mathbb{C}$  и являются частотно-зависимыми.

Данный подход возможен, но достаточно трудоёмок и требует проведения специальной калибровки. Поэтому на практике для определения распределения токов в системе чаще всего проводят измерения только одной, наибольшей по модулю, компоненты поля. При этом верно приближение:

$$\begin{aligned}|\vec{E}| &\approx |\vec{E}_x|; \\ |\vec{H}| &\approx |\vec{H}_y|,\end{aligned}$$

где  $\vec{E}_x$  – тангенциальная компонента электрического поля,  $\vec{H}_y$  – перпендикулярная к проводнику с током компонента магнитного поля.

Результатом такого изменения, как правило, является 1D, 2D или 3D карта распределения поля, по которой делается вывод о распределении токов в системе. Стоит отметить, что под током понимается суммарный отклик всех

движущихся зарядов (ток проводимости для металлов и ток смещения в диэлектрике).

Следующей важной характеристикой ближнего поля является затухание при отдалении от проводника с током, которое пропорционально расстоянию  $r$  следующим образом:

$$|E|, |H| \sim \frac{1}{r^3}.$$

В случае, когда проводник с током не строго линеен и/или когда в относительной близости ( $< \lambda$ ) расположены другие проводники, необходимо учитывать не только затухание, но и эффекты, связанные с интерференцией и дифракцией, что в совокупности приводит к задаче пространственного разрешения (в самом простом случае двух точечных источников) рядом расположенных источников относительно наблюдателя (измерительного прибора, находящегося на некотором расстоянии). Задача разрешения таких источников изначально была сформулирована в оптическом диапазоне частот, но актуальна для всего электродинамического диапазона и имеет критерий (критерий разрешения Рэля), при выполнении которого наблюдатель может утверждать, что видит два отдельных источника, а не один (как результат слияния двух). Два источника одинаковой интенсивности, расположенные близко друг к другу, считаются разрешимыми, если интенсивность «провала» между максимумами составляет  $\leq 80\%$  интенсивности в максимуме (Рис.13).

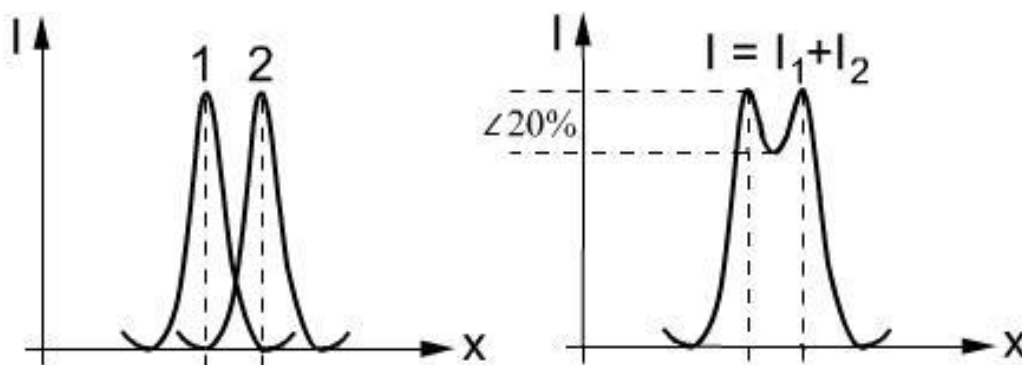


Рисунок 13. Критерий разрешения Рэля

В случае, когда решается задача описания протекающих токов в реальных проводниках (т.е. токоведущие проводники подсоединены к линии передач) или диэлектрических проводниках, в которых запускается электромагнитное излучение, необходимо учитывать граничные условия или, другими словами, волновое согласование в месте контакта, или на границе раздела двух сред, так как у любой реальной системы невозможно добиться идеального согласования. В результате данного рассогласования в волноведущей структуре возникает



отражение от точки контакта, и, если среда имеет относительно небольшие потери (почти все металлические проводники и многие диэлектрики), возникает стоячая волна с выраженными областями минимума и максимума тока. Поэтому при интерпретации измеренного ближнего поля необходимо иметь представление о степени согласованности измеренной структуры. Области максимума поля также еще часто называют пучностями поля.

Подготовительный этап:

*Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio величины распределения электромагнитного поля вблизи металлических проводников.

Задание 1.

Параметры проводника в свободном пространстве:

- Радиус кольца – R (определяется в соответствии с вариантом).
- Диаметр провода – 1 мм.
- Материал провода – медь.
- Ширина зазора для источника – 2 мм.
- В качестве источника использовать точечный источник (Discrete Port) с фиксированным волновым сопротивлением 50 Ом/

Определить:

1. Распределение модуля электрического поля в плоскости кольца на расстоянии 2 мм на 1; 2; 5 ГГц.
2. Распределение модуля магнитного поля в плоскости кольца на расстоянии 2 мм на 1; 2; 5 ГГц.
3. Распределение модуля поверхностного тока на проводнике на 1; 2; 5 ГГц.
4. Вклад стоячей волны в ближнее поле (в %).

Задание 2.

Параметры микрополосковой линии:

Проводник:

- Ширина 2 мм.
- Высота 0,1 мм.
- Длина 100 мм.
- Материал – медь.

- Расположен на подложке.

Подложка:

- Ширина 100 мм.
- Высота 1,5 мм.
- Длина 100 мм.
- Материал – FR-4.
- Нижняя сторона имеет слой меди толщиной 0,1 мм.
- Источники:
  - Два волноводных порта с волновым сопротивлением 50 Ом.
  - Ширина 6 мм.
  - Высота 6 мм.
  - Центр порта прилегает к центру торца проводника.

Определить:

1. Распределение модуля электрического поля в плоскости над проводником на расстоянии 0,2 мм на 2 ГГц.
2. Распределение модуля магнитного поля в плоскости над проводником на расстоянии 0,2 мм на 2 ГГц.
3. Распределение модуля поверхностного тока на проводнике на 2 ГГц.
4. Вклад стоячей волны в ближнее поле (в %).
5. Скорость затухания модуля электрического поля в тангенсальном направлении (над проводником) в диапазоне [0.1 ... 20] мм

Задание 3.

Добавить в микрополосковую линию:

Проводник:

- Ширина 2 мм.
- Высота 0,1 мм.
- Длина 100 мм.
- Материал – медь.
- Расположен на подложке.
- Сдвинутый на расстояние  $L$  (определяется вариантом).
- Источники:
  - Аналогично 3.2 добавить 2 порта

Определить:

1. Распределение модуля электрического поля в плоскости над проводником на расстоянии 0,2 мм на 2 ГГц.
2. Максимальное расстояние, на котором два проводника могут быть определены как два источника тока.

#### Задание 4.

Собрать микрополосковую линию таким образом, чтобы электрическое поле вблизи поверхности имело хорошо разрешимую форму (на выбор):

- Свое имя (можно краткую форму).
- Правильный скрипичный ключ.

Пример:



#### *Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1. Метод расчёта.
  - 3.2. Частотный диапазон.
  - 3.3. Граничные условия.
  - 3.4. Общее число сеточных элементов.
  - 3.5. Метод моделирования.
4. Полученные результаты моделирования.
5. Аргументация полученных результатов.
6. Выводы по полученным результатам.

#### *Дополнительные вопросы*

1. Можно ли, имея полную информацию об электрическом поле, восстановить магнитное поле?
2. Чем отличается ближнее и дальнее поля?

3. Что такое стоячая волна и как она связана с понятием «моды»?
4. Чем отличается микрополосковая линия от проводника в свободном пространстве?

*Варианты заданий:*

№ варианта	R, mm	L, mm
1	15	4
2	15.5	4.5
3	16	5
4	16.5	5.5
5	17	6
6	17.5	6.5
7	18	7
8	18.5	7.5
9	19	8
10	19.5	8.5
11	20	9
12	20.5	9.5

*Практический этап:*

Практический этап лабораторной работы состоит из двух этапов. На первом этапе производится восстановление картины металлических проводников посредством измерения ближнего поля. На втором этапе определяются разрывы в микрополосковой линии.

*Оборудование и материалы*

Для анализа ближнего поля возле исследуемых проводников с током используется осциллограф и источник СВЧ сигнала (конкретные типы приборов уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детектора используется кольцевая антенна с высоким волновым сопротивлением.

Исследуемые элементы:

1. Микрополосковая линия с неизвестным расположением токопроводящих элементов.
2. Микрополосковая линия с поврежденными токопроводящими элементами.

### *Порядок выполнения работы*

1. Настроить измерительное оборудование: уточнить рабочую частоту у преподавателя.
2. Восстановить расположение токопроводящих элементов на плате (1) посредством измерения ближнего поля.
3. Определить положения поврежденных токопроводящих элементов на плате (2) посредством измерения ближнего поля.

#### *Добавить в отчет:*

1. Восстановленную карту токопроводящих элементов.
2. Карту с указанием поврежденных элементов.

#### *Дополнительные вопросы*

1. Как отличить разрыв в цепи от минимума поля в стоячей волне?
2. Важно ли сохранять ориентацию антенны в процессе всего измерения?
3. Какое поле проще измерять в эксперименте – электрическое или магнитное?
4. Почему у измерительной антенны должно быть высокое собственное сопротивление?

## 6 ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Цель работы – научиться измерять и анализировать спектры рассеяния в выбранном направлении на примере элементарных и комбинированных рассеивателей.

Величина рассеяния является одной из ключевых характеристик в задаче взаимодействия электромагнитного излучения с материальным объектом. Для большинства объектов эта величина является своеобразной спектральной картой, напоминающей отпечатки пальца у человека, по которой можно определить тип объекта, его примерные размеры, скорость движения, положение в пространстве и многое другое.

Начало активного изучения этой области соответствует временам второй мировой войны, когда появилась острая необходимость определять наличие летящих в воздухе самолетов. Рассмотрим основные вопросы, на которые необходимо было быстро отвечать оператору, контролирующему воздушное

пространство, и приведем каждому из них аналогию на языке электромагнитного взаимодействия:

- Появление самолета в воздушном пространстве – в зоне видимости появился рассеивающий объект.
- Скорость самолета – скорость движения рассеивающего объекта.
- Множество близкорасположенных самолетов – степень взаимодействия между соседними (близкими) объектами достаточно мала для разрешения каждого из них.
- Тип каждого самолета – сопоставление формы и размера рассеивающего объекта с известными.
- Боевая принадлежность каждого самолета (свой, союзник, враг) – наличие у рассеивателей уникальной спектральной «окраски».

Для ответа на каждый из этих вопросов было необходимо организовать системы контроля воздушного пространства, которые работают по принципу «послал - принял - обработал сигнал» и в общем случае называются радиолокационными системами (РЛС) или просто радары. Под принятым сигналом в данном случае понимается детектируемое изменение электромагнитного сигнала или, другими словами, измеренная величина рассеяния.

Отметим два основных принципа работы радара: моностатический и бистатический. Принципиальное отличие этих двух режимов заключается в том, что моностатический радар представляет собой передающую и принимающую антенны, находящиеся в одной точке пространства, а следовательно, такой радар может анализировать пришедший сигнал только из того направления, куда исходный был отправлен. Бистатический принцип работы радара основан на том, что излучающая и принимающая антенны (у современных систем может быть несколько принимающих антенн) расположены в разных точках пространства, что в случае движущегося объекта приводит к наличию диапазона углов между направлением излучения и приема (Рис. 14). Поэтому в общем случае все РЛС основаны на измерении и анализе величины рассеяния в зависимости от частоты, направления излучения и направления приема сигнала в режиме реального времени.

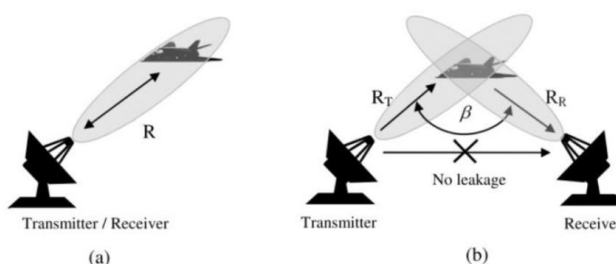


Рисунок 14. Моностатический и бистатический типы радара.

Задачи и системы, связанные с РЛС, чрезвычайно обширны и имеют множество областей применения, как гражданских, так и военных. В данной лабораторной работе будут рассмотрены общие представления о спектральных характеристиках рассеяния для трех наиболее общих случаев:

- Рассеяние назад (в сторону излучателя, моностатический режим).
- Рассеяние вперед (излучатель, рассеиватель и приемник находятся на одной линии, бистатический режим).
- Полное рассеяние.

В общем случае величина рассеяния пропорциональна эффективной площади рассеяния на интересующей длине волны. Рассмотрим более подробно, от каких параметров зависит величина рассеяния. Выделяют три условных диапазона по соотношению размера рассеивателя и длины волны излучения:

1.  $\lambda \gg r$  – рассеяние Рэля или упругое рассеяние на маленьких частицах. При этом рассеяние на частице с хорошей точностью описывается дипольной моделью.
2.  $\lambda \sim r$  – рассеяние Ми. При этом необходимо учитывать набег фазы внутри частицы и интерференцию с излучением от дополнительных пучностей поля внутри и на поверхности частицы, приводящие к дополнительным спектральным особенностям.
3.  $\lambda \ll r$  – «оптическое рассеяние», при котором можно использовать законы геометрической оптики, пренебрегая интерференционными и дифракционными особенностями, величина рассеяния практически не зависит от длины волны и может быть описана с хорошей точностью геометрическими размерами.

При этом направление рассеяния описывается диаграммой рассеяния, которая в общем случае зависит от частоты и направления. Так, для асимметричного рассеивателя диаграммы рассеяния будут различными для каждого направления падающего излучения.

Рассмотрим четыре типа рассеивателей с квазиизотропным, резонансным и асимметричным типом рассеяния.

Квазиизотропным рассеивателем будем называть металлический шар радиуса  $R$ . Данный рассеиватель имеет точное аналитическое решение и может быть описан в формульном виде (более детальное обсуждение данного вопроса доступно в обзоре [1]).

В качестве элементарного резонансного рассеивателя рассмотрим металлический проводник и керамический шарик. Металлический проводник или дипольный рассеиватель имеет несколько характерных пиков рассеяния на частотах, что соответствует кратному числу полудлин волн. Керамический рассеиватель с высоким значением диэлектрической проницаемости поддерживает резонансный режим за счет коллективного отклика токов смещения внутри себя. При этом форма керамического резонатора определяет конкретный тип резонансного распределения.

Более сложной рассеивающей системой является комбинированный рассеиватель, состоящий из двух элементов – дипольного рассеивателя и SRR. Данный рассеиватель имеет комбинированный отклик электрического и магнитного диполя (элемент Гюйгенса). Причем при комбинировании данного элемента на основе электрического (металлический провод) и магнитного (кольцевой резонатор) элементов, принимая во внимание асимметричность уравнений Максвелла для магнитного поля, можно получить асимметричное рассеяние.

#### *Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio величины рассеяния электромагнитного поля в соответствии с заданиями.

Задание 1.

Рассеяние на шаре в широком диапазоне частот. Параметры:

- Радиус шара –  $R_1$  (определяется в соответствии с вариантом).
- Материал шара – медь.
- Частотный диапазон: 1 МГц – 50 ГГц.

Определить:

1. Величину полного рассеяния (Total RCS). Использовать логарифмический тип отображения по обеим осям графика (величина рассеяния, частота).

Сравнить:

1. Полученный спектр рассеяния с аналитическим решением (рассеяние на идеальном металлическом проводнике).

Указать:

1. На спектре три диапазона рассеяния в соответствии с длиной волны.



## Задание 2.

Рассеяние на диэлектрическом шаре.

Параметры:

- Радиус шара –  $R_2$  (определяется в соответствии с вариантом).
- Материал шара:  $\varepsilon = 16$ .
- Частотный диапазон: 1 ГГц – 10 ГГц.

Определить:

1. Величину полного рассеяния (Total RCS).
2. Величину рассеяния в прямом направлении (Forward RCS).
3. Величину рассеяния в обратном направлении (Backward RCS).
4. Диаграмму рассеяния на 1-, 2-, 3- и 4м спектральных резонансах.

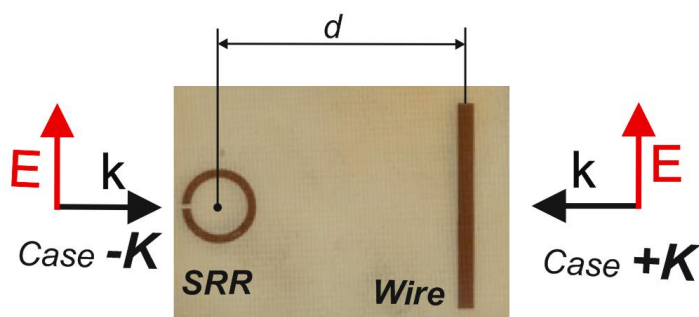
## Задание 3.

Рассеяние на асимметричные элементы.

Параметры (недостающие параметры определить самостоятельно):

- Металлический проводник.
  - Материал: медь.
  - Цилиндр, радиус 1 мм.
  - Положение первого пика рассеяния 4 ГГц.
  - Цилиндр расположен вдоль электрического поля.
- Кольцевой резонатор:
  - Материал медь.
  - Кольцевой резонатор с одним зазором.

Комбинированный элемент:



Определить:

1. Величину  $d$ , при котором вблизи 4 ГГц наблюдается асимметрия обратного рассеяния (“Case -K” имеет нулевое обратное рассеяние.)
2. Диаграммы рассеяния для прямого и обратного направления для частоты, на которой “Case -K” имеет нулевое обратное рассеяние.

## *Содержание отчета*

1. Цели и задачи работы.
2. Описание структуры.
3. Выбранные параметры моделирования:
  - 3.1.Метод расчёта.
  - 3.2.Частотный диапазон.
  - 3.3.Граничные условия.
  - 3.4.Общее число сеточных элементов.
  - 3.5.Метод моделирования.
4. Полученные результаты моделирования.
5. Аргументация полученных результатов.
6. Выводы по полученным результатам.

## *Дополнительные вопросы*

1. От чего зависит величина рассеяния?
2. Можно ли скрыть самолет от радара?
3. Чему соответствуют пики рассеяния на языке токов?
4. Как увеличить рассеяние?
5. Основное уравнение радара

## *Варианты заданий:*

№ варианта	R <sub>1</sub> , mm	R <sub>2</sub> , mm
1	4	7
2	4.5	7.2
3	5	7.4
4	5.5	7.6
5	6	7.8
6	6.5	8
7	7	8.2
8	7.5	8.4
9	8	8.6
10	8.5	8.8
11	9	9
12	9.5	9.2

### Практический этап:

Практический этап лабораторной работы заключается в оценочном измерении секторов рассеяния и определении характеристических спектральных особенностей резонаторов различного типа.

#### *Оборудование и материалы*

Для анализа спектров рассеяния исследуемых рассеивателей используется векторный анализатор цепей, широкополосные рупорные антенны, безэховая камера (конкретные типы приборов уточнить у преподавателя при выполнении работы).

Исследуемые элементы:

1. Металлический проводник.
2. Керамический шарик.
3. Асимметричный комбинированный рассеиватель.

#### *Порядок выполнения работы*

1. Настройка измерительного оборудования: уточнить рабочую частоту у преподавателя.

Использовать следующую формулу для анализа спектральных характеристик:

$$\sigma_b \sim \left( \frac{S_{11} - M_{11}}{M_{11}} \right)^2 ; \sigma_f \sim \left( \frac{S_{12} - M_{12}}{M_{12}} \right)^2 ,$$

где  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  - параметры отражения и прохождения с измеряемым объектом,  $M_{11}$ ,  $M_{12}$  - параметры отражения и прохождения без объекта,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_f$  - относительные величины рассеяния в обратном и прямом направлениях.

#### *Добавить в отчет:*

1. Описание измеряемых рассеивателей.
2. Измеренные спектры.

#### *Дополнительные вопросы*

1. С чем связаны дополнительные осцилляции в спектре?
2. Как измерить полное рассеяние?

### Рекомендованная литература:

[1] Fabrizio Frezza, Fabio Mangini, Nicola Tedeschi, Journal of the Optical Society of America A 35, 163 (2018).

## 7 РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Цель работы – изучить методы локализации радиочастотного магнитного поля аппарата МРТ при помощи резонансных структур на основе среды из проводов.

В магнитно-резонансной томографии (МРТ) для приема сигнала используются проводные радиочастотные катушки, соединенные с томографом. В качестве альтернативы проводным радиочастотным катушкам было предложено использование беспроводных катушек. Как правило, беспроводные катушки представляют собой резонансные структуры, которые индуктивным образом связываются с катушкой типа «птичья клетка» (которая используется в томографе для передачи радиочастотного сигнала – катушка представлена на Рис. 15). Катушка типа «птичья клетка» является обязательным атрибутом практически любой современной клинической МРТ-системы. Метаматериалы, такие как, например, среда из проводов, могут быть использованы для создания беспроводных катушек [1]. Беспроводные катушки на основе метаматериалов позволяют перераспределять ближние поля катушки типа «птичья клетка», что улучшает ее приемо-передающую эффективность [1].

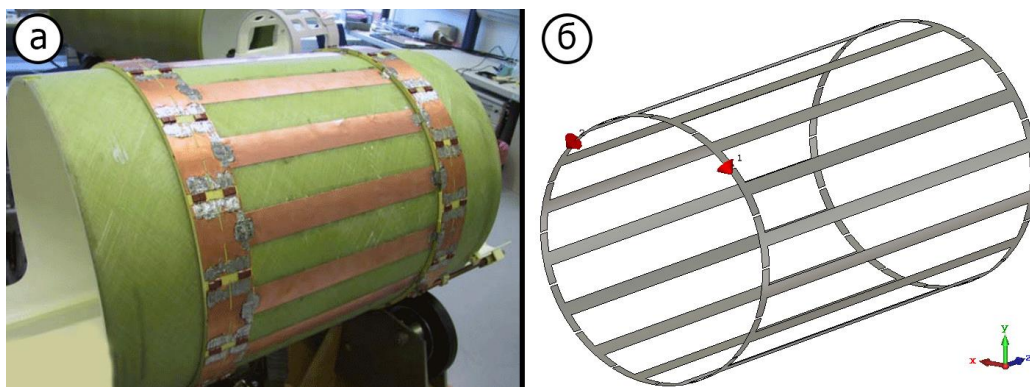


Рисунок 15. Радиочастотная катушка типа «птичья клетка» (а) и модель ее проводников (б).

Рабочая частота катушки должна соответствовать частоте магнитного резонанса:

$$\omega_0 = \gamma B_0,$$

где  $B_0$  - величина индукции магнитного поля (Т),  $\gamma$  - гиромагнитное отношение, означающее коэффициент пропорциональности между моментом импульса и магнитным моментом ядра [2]. В основной массе клинические исследования делаются с получением сигналов ядер атомов водорода – протонов, а самые распространенные сканеры МРТ имеют поля величиной 1.5Т.

Чтобы обеспечить сильную индуктивную связь с встроенной в томограф радиочастотной катушкой, резонансная структура должна быть рассчитана на ту же рабочую частоту. Применительно к среде из проводов это может представлять проблему, так как резонансная длина составляющих метаматериал элементов – полуволновых диполей на рабочей частоте томографа с силой поля 1.5Т окажется более двух метров. Для компактности структуры ее помещают внутрь среды с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости, например, в дистиллированную воду (Рис.16). При этом стоит подчеркнуть, что размеры емкости с водой могут существенно влиять на рабочую частоту структуры и положение ее собственных мод.

Каждая собственная мода структуры из проводов обладает уникальным распределением ближнего поля, резонансной частотой и глубиной проникновения. Тем не менее, для всех мод характерна общая черта - локализация электрического поля у краев, а у магнитного поля в центре проводов. Именно это свойство и нашло широкое применение в МРТ, где важно обеспечить минимальную величину электрического поля в регионе исследования и максимальную величину магнитного.

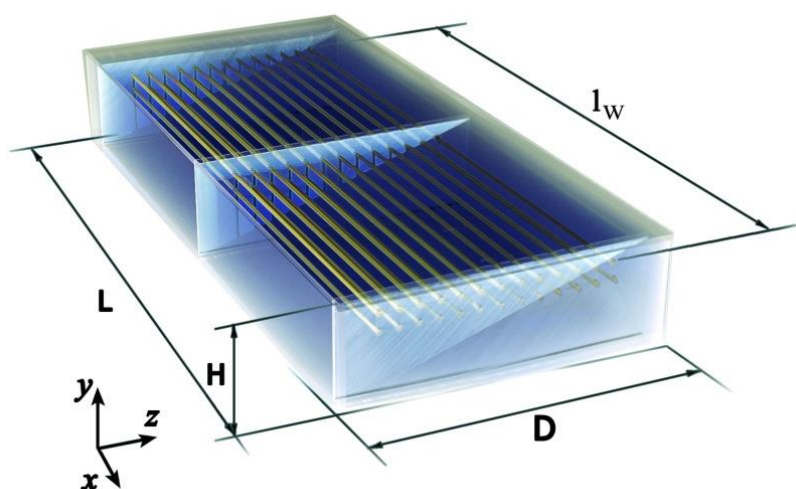


Рисунок 16. Резонансная структура на основе среды из проводов погруженных в дистиллированную воду для 1.5Т МРТ.

Исследуемый объект помещается в центральной зоне структуры, причем наличие объекта влияет как на резонансную частоту, так и на добротность. По этой причине расчет резонаторов для МРТ всегда выполняется с учетом нагрузки – объекта исследования, который может быть прототипом, близким по электромагнитным характеристикам к человеческим тканям.

Подготовительный этап:

*Указания к выполнению работы*

Провести численное моделирование в CST Microwave Studio резонансной структуры на основе среды из проводов в соответствии с заданиями.

Задание 1.

Смоделировать резонансную структуру для МРТ сканера в виде 12 проводов, находящихся в одной плоскости.

Рассчитать:

- Резонансную частоту для МРТ сканера с силой поля 1.5Т.
- Резонансную длину полуволнового диполя, погруженного в дистиллированную воду, для полученной частоты.
- Амплитуду магнитного поля на высоте 20 мм от проводов в центре структуры в диапазоне  $\pm 10$  МГц от найденной резонансной частоты.
- Распределения электрического и магнитного полей (мониторы) для всех найденных собственных мод.

Параметры модели:

- Диаметр провода – 2 мм.
- Материал провода – латунь.
- Расстояние между центрами проводов – 10 мм.
- Источник – плоская волна, распространяющаяся ортогонально проводам, электрическая компонента параллельна проводам.
- Провода погружены в дистиллированную воду – толщина слоя воды 100 мм сверху и снизу структуры, а также от краев проводов.

Задание 2.

В соответствии с вариантом определить из найденных в прошлом задании мод нужную. Заменить возбуждение плоской волной на возбуждение при помощи магнитной петлевой антенны с портом, расположенной над структурой.

Рассчитать:

- Новую длину проводников, такую, чтобы выбранная мода совпала с рабочей частотой 1.49Т МРТ сканера.
- Диаметр магнитной антенны и ее положение над проводами, позволяющее возбуждать выбранную моду.
- S11 параметры магнитной антенны в диапазоне  $\pm 10$  МГц от найденной резонансной частоты.

Определить:

- Распределение электрического и магнитного полей (мониторы) на резонансной частоте.
- График зависимости резонансной частоты выбранной моды от уровня воды над проводами.

Задание 3.

Добавить в проект объект исследования. Поместить объект на расстоянии 2 мм от проводов в центре структуры.

Параметры модели:

- Размеры объекта 73x143x20 мм.
- Материал с электромагнитными параметрами, соответствующими мышечной ткани человека.

Рассчитать:

- Смещение резонансной частоты собственной моды до и после добавления объекта, построить графики S11 параметров кольцевой антенны для обоих случаев.
- Отношение среднего значения магнитного поля в объеме объекта ( $H_{\text{mean}}$ ) к корню от поглощенной мощности в материале объекта ( $P_{\text{loss}}$ ) на резонансной частоте выбранной моды.

### *Содержание отчета*

#### 1. Цели и задачи работы.

- Описание структуры.
- Выбранные параметры моделирования.
- Метод расчёта.
- Частотный диапазон.
- Граничные условия.
- Общее число сеточных элементов.
- Полученные результаты моделирования.
- Выводы по полученным результатам.

*Дополнительные вопросы*

1. Почему технология МРТ применяется в основном для визуализации распределения ядер водорода?
2. Почему дистиллированная вода позволяет сократить размеры резонансных диполей?
3. Работает ли структура из проводов в случае круговой поляризации возбуждающего поля?
4. Какая из собственных мод структуры из проводов наиболее пригодна для использования в МРТ?
5. Почему антенна типа «птичья клетка» плохо подходит для получения изображений небольших регионов человеческого тела?
6. В какую сторону смещается резонансная частота при добавлении к структуре объекта и почему это происходит?
7. Сколько всего собственных мод у исследуемой структуры?

*Варианты заданий:*

№ варианта	№ Моды
1	I
2	II
3	III
4	IV

*Практический этап:*

Практический этап лабораторной работы состоит из двух этапов. На первом этапе производится сборка резонаторов и проверка их характеристик. Второй этап включает в себя эксперимент с клиническим аппаратом МРТ.



## *Оборудование и материалы*

Для определения резонансных характеристик структур из проводов используется векторный анализатор спектра (конкретный тип уточнить у преподавателя при выполнении работы). В качестве детектора используется симметризованная магнитная антенна, соединенная с векторным анализатором спектра посредством фазостабильных коаксиальных проводников.

## *Порядок выполнения работы*

1. Настроить измерительное оборудование аналогично лабораторной работе №1, но в частотном диапазоне 50-90 МГц:
2. Измерить резонансные частоты построенной структуры.
3. Определить положение моды в спектре (согласно варианту).
4. Проверить теоретические расчеты, изменив уровень воды в баке.
5. Поместить на структуру объект и повторно измерить положение моды (согласно варианту).
6. Вычислить уровень воды, необходимый для того, чтобы частота выбранной моды структуры с объектом соответствовала рабочей частоте аппарата МРТ.

## *Добавить в отчет:*

1. Измеренные данные  $S_{11}$  с объектом и без.
2. Значение уровня воды, необходимого для настройки на нужную частоту.

## *Дополнительные вопросы*

1. Почему уровень воды влияет на резонансную частоту?
2. Как необходимо располагать структуру в аппарате МРТ – параллельно основному магнитному полю или перпендикулярно?
3. Что будет, если латунные провода заменить медными?
4. Для обследования каких регионов человеческого тела можно применить данную структуру?

## *Рекомендованная литература:*

[1] A.P. Slobozhanyuk, et al. *Adv. Mater.* 28, 1832 (2016).

Белов Павел Александрович  
Слобожанюк Алексей Петрович  
Филонов Дмитрий Сергеевич

**Экспериментальные методы радиофизики и томографии**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49