

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.8>

УДК: 621.372

ПОЛОСКОВЫЙ РЕЗОНАТОР СВЧ С ОБЪЕМНЫМ КРИСТАЛЛОМ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

А.А. Арутюнян, Н.Д. Малютин

Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2024 г.

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования частотных характеристик резонатора в виде двух полосковых вибраторов, разделенных большим зазором и перекрытых объемным кристаллом ниобата лития, на верхней поверхности которого установлен металлический электрод с плавающим потенциалом. При проведении эксперимента измерялись частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния в диапазоне частот до 3 ГГц. Электродинамический анализ проводился в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Проведено сравнение экспериментальных и численных результатов, показавших хорошее качественное совпадение коэффициентов передачи и коэффициентов отражения. Получены резонансные колебания на двух или трех частотах в зависимости от расположения и ориентации кристалла. Установлено, что на первой резонансной частоте электрод выполняет функцию экрана. Отсутствие электрода приводит к исчезновению добротных резонансов. Проведенное моделирование в COMSOL позволило оценить эффективную диэлектрическую проницаемость резонатора, соответствующую значениям резонансных частот. Расчет электромагнитных

полей дал возможность установить типы волн, соответствующих резонансным частотам. Знание типа волн и оценка относительной диэлектрической проницаемости позволили построить алгоритм уточняющей итерационной процедуры расчета значений резонансных частот и эффективной диэлектрической проницаемости резонатора. Показана возможность использования резонаторов в качестве однозвенных полосно-пропускающих фильтров с полосой пропускания около 1%, вносимыми потерями $-1,1$ дБ и минимальными возвратными потерями -28 дБ на центральной частоте.

Ключевые слова: резонатор, полосковые линии, объемный кристалл, ниобат лития, частотные характеристики, полосно-пропускающий фильтр, экспериментальные характеристики, моделирование.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

Автор для переписки: Арутюнян Артуш Арсенович, arutyunyan18@mail.ru

Введение

При измерении параметров диэлектрических материалов часто находят применение полосковые линии и полосковые резонаторы (ПР) благодаря их полезным особенностям: открытый доступ к поверхности токонесущего проводника; несложная технология изготовления; развитость методов расчета параметров и наличие программ для ЭВМ, реализующих эти методы [1-5]. Так в работе [1] рассмотрено использование микрополосковых резонаторов для исследования диэлектрических свойств жидких кристаллов в СВЧ диапазоне. В работах [2, 3] ПР применены для измерений ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$ листовых диэлектрических материалов. В публикациях [4, 5] рассмотрена оценка диэлектрической проницаемости объемных кристаллов ниобата лития и других материалов в диапазоне до 25 ГГц. В этих работах отмечается, что измерение полной фазы коэффициента передачи отрезков полосковых линий с объемными кристаллами,

необходимой для расчета относительной диэлектрической проницаемости, оказалось проблематично по причине большого числа возникающих резонансов. В работе [5] показано, что определение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r кристаллов дифосфида цинка германия, кварц, ниобата лития и КТР путем измерения полного фазового сдвига не соответствует физическому представлению полосковой структуры как линии передачи с некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью. Отмечается, что определяемая экспериментально функция $\arg[S_{21}(f)]$ не периодическая вследствие интерференции большого числа возбуждаемых собственных волн. Фаза, определяемая как $\arg[S_{21}(f)]$, не достигая значения ± 180 град, т.е. точки разрыва функции $\arg[S_{21}(f)]$, хаотично изменяется с частотой пересекая условный ноль. В результате, согласно используемому алгоритму определения полной фазы, каждое такое пересечение сопровождается добавлением к фазовому сдвигу -360 град, которого на самом деле физически нет. Таким образом, наличие интерференции сложного состава собственных волн и возникновение квази-хаотических колебаний является препятствием для определения относительной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов.

Поэтому была поставлена цель разреживания спектра собственных колебаний в полосковой структуре и использование выделяемых резонансов для оценки эффективной диэлектрической проницаемости полосковой структуры и относительной диэлектрической проницаемости объемных кристаллов на СВЧ. В стремлении решить эту задачу авторы данной статьи изменили условия взаимодействия полосковой структуры и кристалла. В данной работе сообщается о разработке, исследовании и моделировании резонатора, содержащего два соосных отрезка полосковых линий на диэлектрической подложке, разделенных зазором и являющихся электрическими вибраторами. Со стороны входа вибратор является возбудителем, а со стороны выхода вибратор служит

входного и выходного коаксиально-полосковых переходов. На кристалле сверху располагался электрод, находящийся под плавающим потенциалом, поскольку он не имеет контакта с металлизированным основанием полоскового модуля. Предполагалось, что наличие электрода позволит управлять параметрами резонаторов путем их шунтирования на внешний экран или заземляемое основание полоскового модуля по аналогии с полосковыми структурами на связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью [6]. Исследовалось несколько вариантов исполнения резонатора, отличающихся расположением кристалла на поверхности полоскового модуля на плоскостях XY, XZ, YZ, а также ориентацией кристалла по осям Z, Y, X с целью исследования влияния анизотропности диэлектрических свойств на характеристики резонатора. На рис. 2 показан внешний вид конструкции резонатора без электрода (рис. 2(a)) и с электродом на верхней плоскости (рис. 2(б)). Кристалл, устанавливаемый на полосковый модуль, фиксировался механическим прижимным устройством.

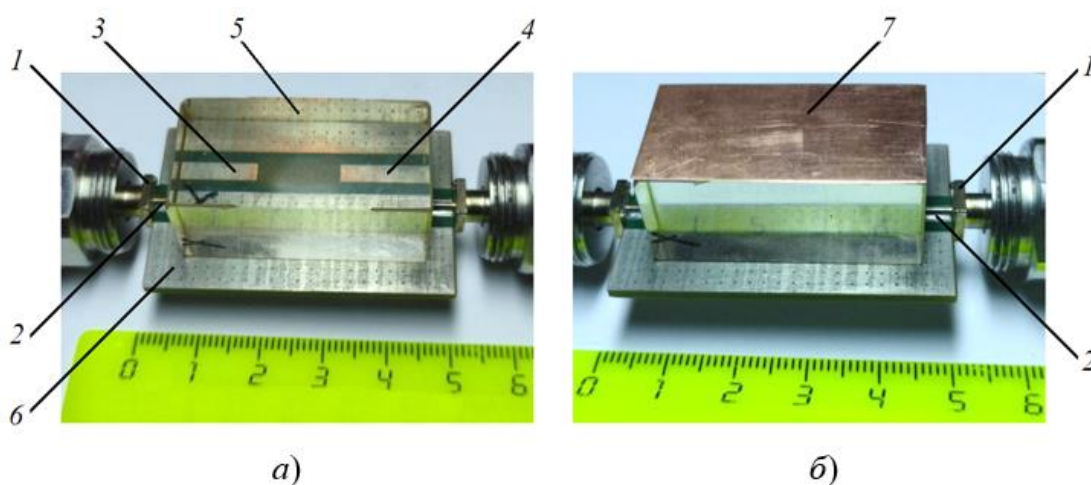


Рис. 2. Полосковый резонатор с объемным кристаллом ниобата лития: 1 – коаксиально-полосковые переходы; 2 – отрезки полосковых линий; 3 – вибратор-возбудитель; 4 – вибратор-приемник; 5 – кристалл ниобата лития; 6 – боковые экраны, соединенные металлизированными отверстиями с заземляющим основанием; 7 – металлический электрод с плавающим потенциалом. а) кристалл без электрода; б) кристалл с электродом на верхней плоскости XZ.

2. Экспериментальное исследование частотных характеристик

Измерения проводились на двухпортовом векторном анализаторе цепей (ВАЦ) P4226 производства АО НПФ «Микран» по стандартной схеме (рис. 3). Полосковый модуль подключался к ВАЦ с помощью фазостабильных коаксиальных кабелей КСФ26-13РН-13Н-700. Порт 1 соединялся через кабель, коаксиально-полосковый переход и короткий отрезок полосовой линии с вибратором-возбудителем, а порт 2 симметричным образом – с вибратором-приемником. В процессе измерений определялась полная матрица коэффициентов рассеяния S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{21} .

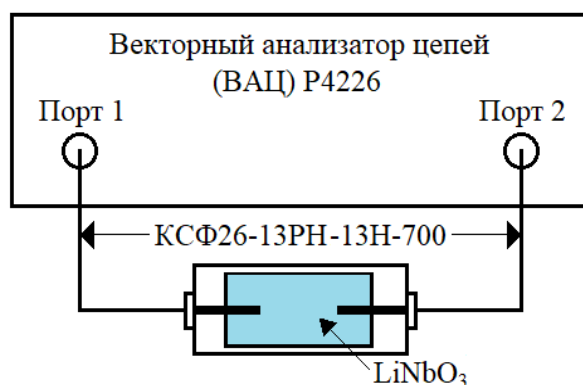


Рис. 3. Схема измерения полоскового резонатора.

Проведены измерения частотных характеристик полоскового модуля без кристалла. В диапазоне частот от 1 до 3 ГГц получены значения $[S_{11}] \leq -0,4$ дБ, коэффициент передачи изменяется с ростом частоты в пределах $[S_{21}] = (-67,8 \dots -38,8)$ дБ. При этом выполнилось условие $S_{22} = S_{11}$, $S_{12} = S_{21}$ с точностью до погрешностей измерения. Эти результаты измерения свидетельствуют об отсутствии сколь-либо значимого излучения электромагнитного поля вибратором-возбудителем, а также влияния электромагнитной связи между полосками вибраторов, разделенных большим зазором.

Для проведения измерений резонатора в сборе на подложку полоскового модуля устанавливался кристалл с экраном (рис. 2(б)) симметрично относительно коаксиально-полосковых переходов и токонесущих полосок, как

показано на рис. 1(а) и на рис. 2. Измерены частотные характеристики в шести вариантах расположения кристалла на плоскостях XY , $\bar{X}\bar{Y}$, XZ , $\bar{X}\bar{Z}$, YZ , $\bar{Y}\bar{Z}$. В обозначениях плоскостей индекс с чертой сверху означает, что кристалл перевернут на противоположную плоскость (см. рис. 3). На рис. 4 показана зависимость частотных характеристик $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ резонатора от положения кристалла. Цель измерений состояла в изучении влияния ориентации кристалла на спектр резонансных частот.

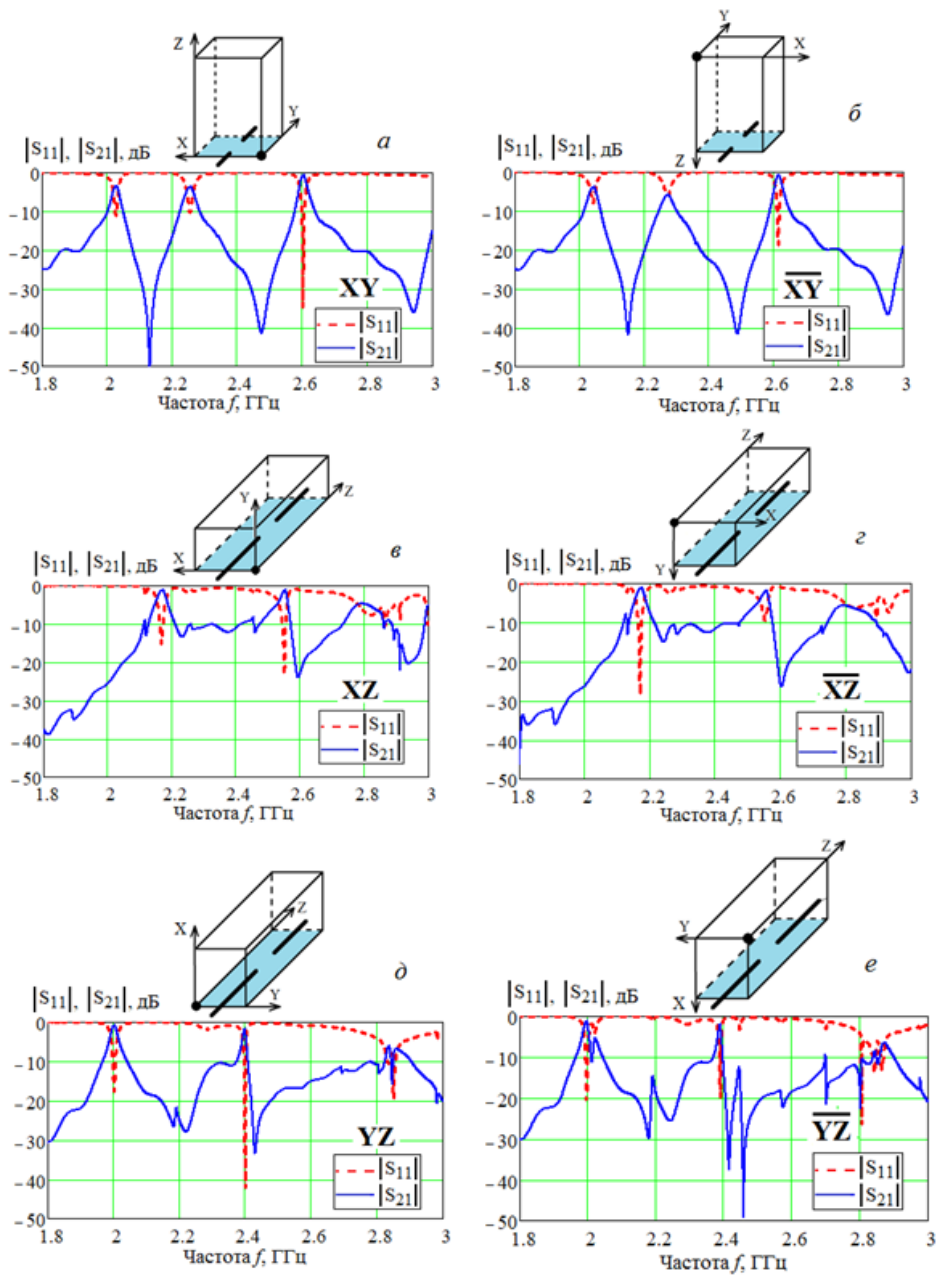


Рис. 4. Экспериментальные результаты частотной зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ резонаторов с разным расположением кристалла.

Экспериментальные результаты частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ от названного фактора показаны на рис. 4(a-e). Из графиков можно видеть, что при расположении на плоскости XY в диапазоне частот 1.8-3 ГГц наблюдается 3 резонанса, причем высокочастотный (третий) резонанс характеризуется максимальным значением коэффициента передачи $|S_{21}|$ и минимальным коэффициентом отражения $|S_{11}|$. Поворот кристалла на 180° по оси Z (рис. 3(a-b)) качественно не изменил частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$. В положении кристалла XY получен коэффициент отражения $|S_{11}| = -34$ дБ. Установка кристалла на плоскостях с индексами XZ, $\bar{X}\bar{Z}$, YZ, $\bar{Y}\bar{Z}$ привела к образованию только двух явным образом выраженных резонансов. Наилучшее согласование $|S_{11}| = -28$ дБ получено при положении кристалла $\bar{X}\bar{Z}$. Были определены частоты первых резонансов f_1 , значение коэффициента отражения и коэффициента передачи $|S_{21}|$ на f_1 , добротность Q и полоса пропускания Δf резонатора. Эти сведения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные результаты определения параметров резонаторов при разном расположении кристалла.

Параметр	Расположение кристалла					
	XY	$\bar{X}\bar{Y}$	XZ	$\bar{X}\bar{Z}$	YZ	$\bar{Y}\bar{Z}$
Частота первого резонанса f_1 , ГГц	2,0276	2,042	2,1696	2,1716	2,0016	1,9956
$ S_{11} $, дБ	-11,2	-7,7	-15,1	-28,6	-17,6	-20,3
$ S_{21} $, дБ	-3,3	-3,7	-1	-1	-0,7	-1,2
Q	79,2	65,4	58,0	90,4	83,4	113,3
Δf , %	1,26	1,52	1,11	1,1	1,20	0,88

Из таблицы видно, что на частоте первого резонанса f_1 наилучшее согласование получено в положении $\bar{X}\bar{Z}$, минимальные потери соответствуют варианту размещения YZ. Полоса частот составляет (1,10...1,2) %.

Как видно из рис. 4 и таблицы 1, при смене положения кристалла частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ значительно изменяются. Вероятно, это связано с несколькими факторами. Первый из них – анизотропия кристалла, приводящая к изменению эффективной диэлектрической проницаемости кристалла вследствие изменения его положения и ориентации относительно источника электромагнитного поля. Анизотропия кристалла сказывается на параметрах резонатора, т.к. при расположении его на разных боковых поверхностях полосковые вибраторы оказываются в различающейся диэлектрической среде. В силу объемности кристалла эффективная диэлектрическая проницаемость определяется составляющими ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} [7-10] с разными весовыми коэффициентами, зависящими от положения кристалла. Второй фактор – изменение размеров перекрытия области возбуждения кристалла полосковым вибратором. Следует также отметить фактор неточности установки кристалла по отношению к полосковым вибраторам.

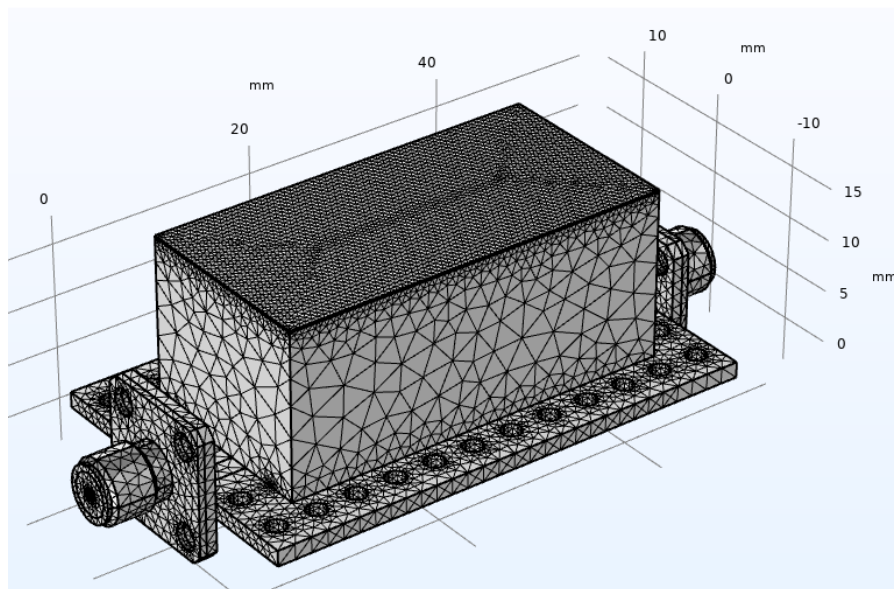


Рис. 5. 3D-модель резонатора.

3. Моделирование резонатора в среде COMSOL

Моделирование резонатора проведено с помощью программы численного моделирования COMSOL Multiphysics. Исходная 3D-модель показана на рис. 5, ее размеры соответствуют размерам полоскового модуля и кристалла, показанным на рис. 1.

Объектом электродинамического моделирования был взят резонатор с индексом расположения кристалла $\bar{X}\bar{Z}$. В процессе моделирования проведен расчет частотной зависимости S -параметров и напряженности электромагнитного поля E на дорезонансной частоте, на первой и второй резонансных частотах. Поскольку точные значения диэлектрических проницаемостей кристалла ϵ_{11} , ϵ_{33} не были известны, проведены расчеты частотной зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ при разных значениях относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r объемного кристалла. Первое приближение ϵ_r было взято в диапазоне между диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_{11} = 42$, $\epsilon_{33} = 26$ из работ [7-10] для частоты 2 ГГц. Наилучшее совпадение результатов моделирования и эксперимента было получено при $\epsilon_r = 27$.

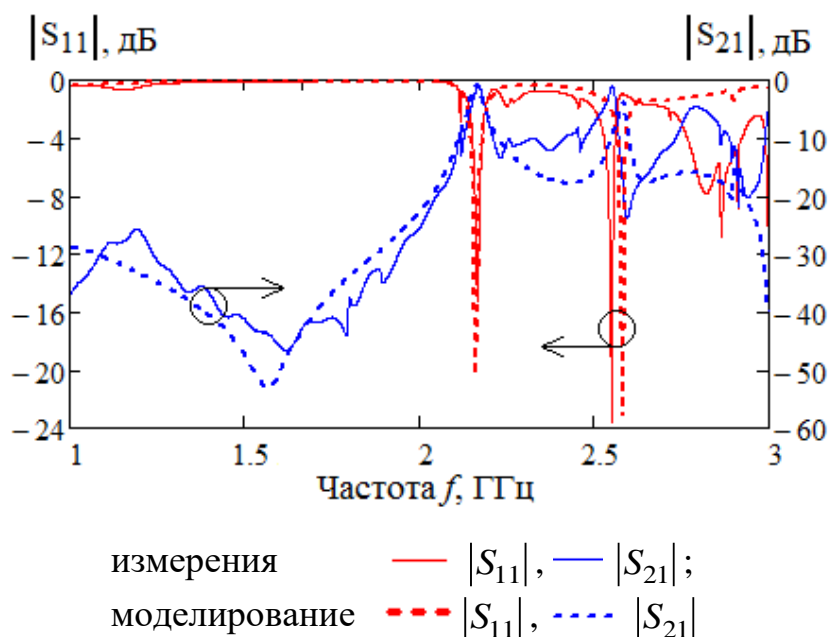


Рис. 6. Частотные зависимости измеренных и рассчитанных коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и коэффициентов отражения $|S_{11}|$ резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$.

На рис. 6 приведено сравнение результатов эксперимента и моделирования коэффициента передачи $|S_{21}|$ и коэффициента отражения $|S_{11}|$ резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$. Наблюдается отклонение расчетной резонансной частоты f_1 от экспериментального значения на 4,5%, частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ повторяют особенности экспериментальных характеристик.

Результаты электродинамического моделирования резонатора с индексом расположения кристалла $\bar{X}\bar{Z}$ показаны на рис. 7(a-з). Моделирование на слое модели расположения вибраторов проведено на дорезонансной частоте 1,5731 ГГц (рис. 7(a)), на частоте первого резонанса 2,1623 ГГц (рис. 7(б)), на частоте между первым и вторым резонансом 2,4188 ГГц (рис. 7(в)) и на второй резонансной частоте 2,5832 ГГц (рис. 7(г)). Показанные картины напряженности электрического поля иллюстрируют возникновение резонанса с картиной поля, отличающейся от картины поля четвертьволнового резонанса (рис. 7(a, б)), характерной для полоскового четвертьволнового вибратора в однородной среде. Это связано с сильным влиянием объемного кристалла на отбор энергии вибратора-возбудителя колебаний и передачу энергии в вибратор-приемник через кристалл.

Интересный механизм передачи-приема энергии в системе вибраторы-кристалл наблюдается на второй резонансной частоте 2,5832 ГГц (рис. 7(в, г)). На частоте второго резонанса в пространстве зазора образовалась область эффективной передачи энергии при взаимодействии вибраторов и среды в виде кристалла с высокой диэлектрической проницаемостью.

Результаты моделирования нормированной напряженности электрического поля на первой резонансной частоте в слое модели, соответствующем внешней поверхности электрода, показаны на рис. 7д, а с внутренней стороны – на рис. 7(ж). На рис. 7(е, з) показаны напряженности электрических полей на внешней и внутренней поверхностях электрода на второй резонансной частоте.

Анализируя рис. 7(д) можно сделать вывод, что электрод на частоте первого резонанса выполняет функцию заземленного экрана с почти нулевым потенциалом. С ростом частоты (рис. 7(е)) возникает возбуждение периметра электрода, хотя все еще эффект экранирования сохраняется.

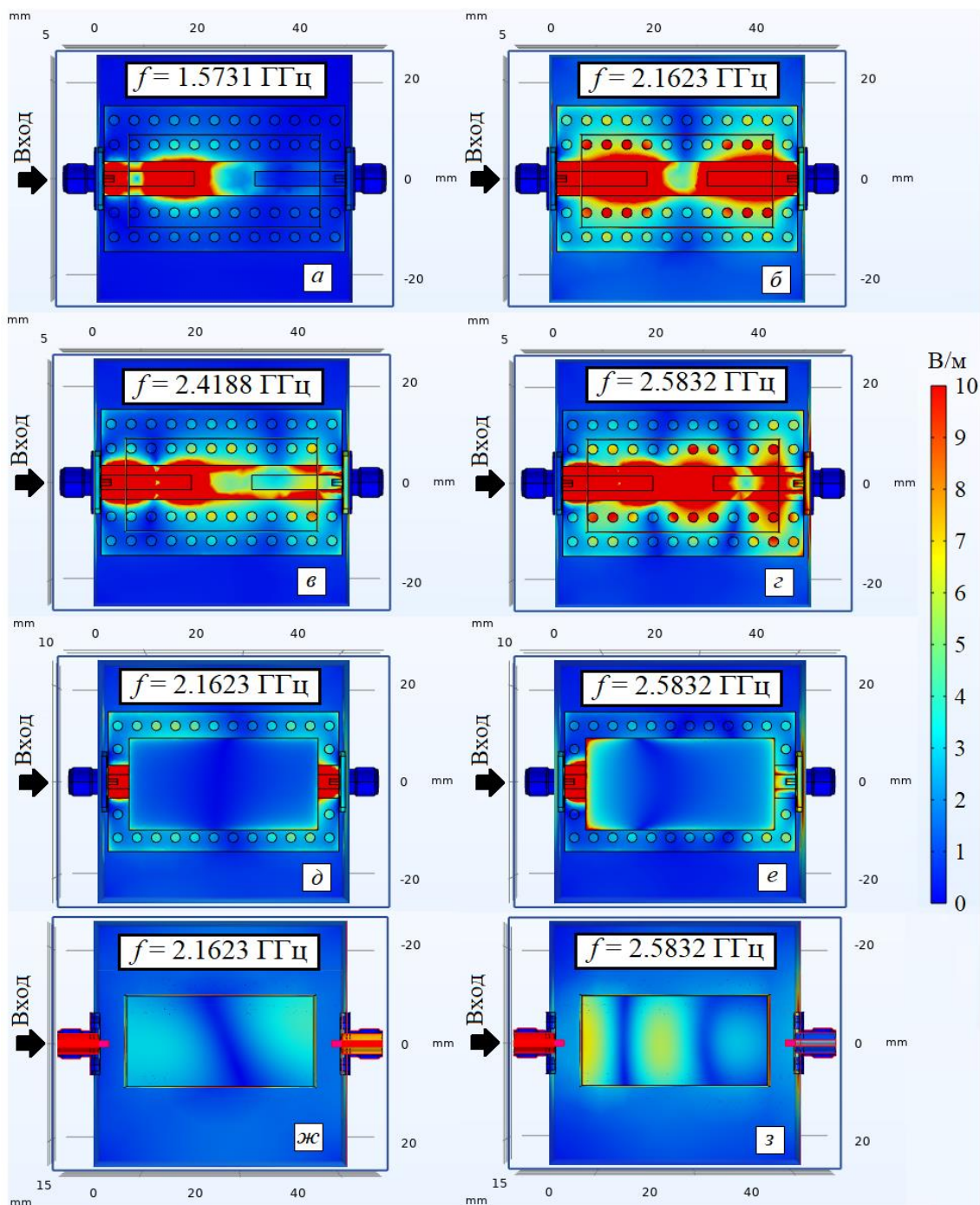


Рис. 7. Результаты моделирования нормированной напряженности электрического поля резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$ в слое модели расположения вибраторов (а-г), в слое модели, соответствующем внешней поверхности электрода (д, ж) и в слое внутренней поверхности электрода с плавающим потенциалом.

Результаты расчета напряженности электрического поля в продольном сечении полоскового резонатора посередине полосок вибраторов показаны на рис. 8.

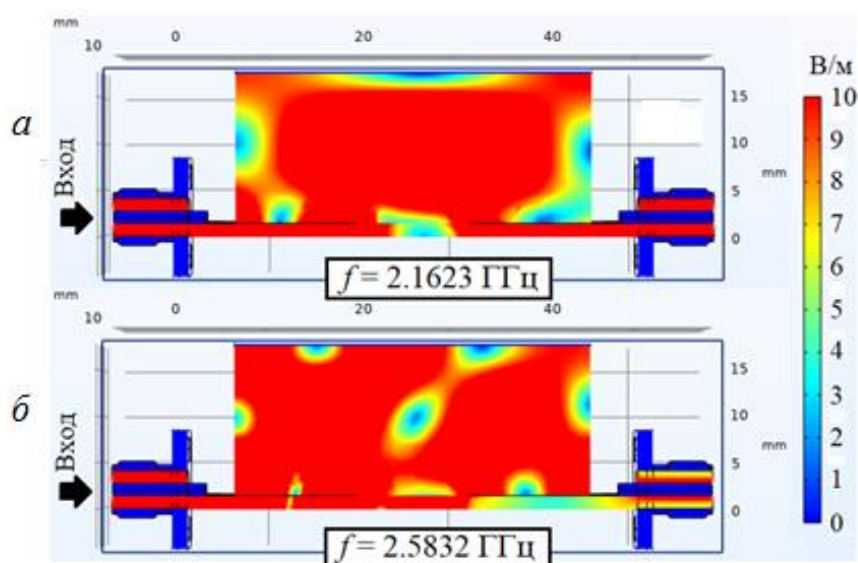


Рис. 8. Нормированная напряженность электрического поля в продольном сечении резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$ на первой и второй резонансных частотах.

4. Экстракция параметров диэлектрического резонатора

Известно [11, 12], что спектр частот собственных колебаний диэлектрических резонаторов в виде прямоугольного параллелепипеда находят по формуле (1)

$$f_{рез} = \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{A}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{B}\right)^2 + \left(\frac{\delta \cdot \pi}{L}\right)^2} \cdot \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

где m, n, δ – целые числа соответствующие колебаниям $TE_{mn\delta}$; A, B, L – размеры диэлектрика (см. рис. 1); c – скорость света; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала резонатора. Размеры кристалла были взяты в соответствии с рис. 1: $A = 0,016, B = 0,019, L = 0,038$ м.

Проблема расчета $f_{mn\delta}$ заключается в том, что в нашем случае относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r неизвестна. Знание экспериментальных резонансных частот $f_{1,exp}$ и $f_{2,exp}$ в рассматриваемом случае

также недостаточно чтобы определить ε_r . Проведенное моделирование в COMSOL позволило путем подбора определить по значениям $f_{1,exp}$ и $f_{2,exp}$ величину $\varepsilon_r \approx 27$. При этом расчет полей показал, что для $f_{1,exp}$ наблюдается картина поля, близкая к TE_{012} , а на частоте $f_{2,exp} - TE_{112}$. Это предположение и знание примерной ε_r позволило построить итерационную процедуру расчета значений $f_{1,sim}$, $f_{2,sim}$ и эффективной диэлектрической проницаемости резонатора $\varepsilon_{ef,sim}$ при моделировании (индекс sim). Такая постановка задачи нахождения $\varepsilon_{ef,sim}$ вызвана тем, что объемный кристалл не находится в состоянии “чистых” свободных колебаний, т.к. снизу граничные условия определяются полосковыми линиями передачи и диэлектриком подложки, а сверху металлической пластиной с плавающим потенциалом.

Введем матрицу, отражающую тип колебаний на двух частотах резонанса (см. рис. 6)

$$nm\delta = \begin{bmatrix} n_1 & m_1 & \delta_1 \\ n_2 & m_2 & \delta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где n_1, \dots, δ_2 имеют целочисленные значения, вообще говоря, не известные, их необходимо найти. Матрица экспериментально измеренных частот резонанса

известна $F_{exp} = \begin{bmatrix} f_{1exp} \\ f_{2exp} \end{bmatrix}$.

Зададим цикл по $i = 1, 2$, привязанный к первой и второй строке матрицы $nm\delta$ по i , а индекс $j = 1, 2, 3$ – соответственно к n_1, m_1, δ_1 или n_2, m_2, δ_2 . Варьируя сочетание n, m, δ , получим тот или иной тип колебаний. Как уже отмечалось, n, m, δ могут быть определены из анализа картины электромагнитного поля в резонаторе, рассчитанной на f_{sim1} и f_{sim2} в системе Comsol (см. рис. 7 и рис. 8) или путем случайного перебора.

Снабдим индексом i коэффициенты

$$\beta_{x_{i,1}} = \frac{nm\delta_{i,1} \cdot \pi}{A}, \quad \beta_{y_{i,2}} = \frac{nm\delta_{i,2} \cdot \pi}{B}, \quad \beta_{z_{i,3}} = \frac{nm\delta_{i,3} \cdot \pi}{L}.$$

Тогда частоты собственных колебаний f_{sim} с номерами $i=1,2$ будут определяться в соответствии с (3)

$$f_{sim,i} = \sqrt{\beta_{x_{i,1}}^2 + \beta_{y_{i,2}}^2 + \beta_{z_{i,3}}^2} \cdot \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r,i}}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{r,i}$ – изначально задаваемая относительная диэлектрическая проницаемость для i -того типа колебаний. Зная $f_{exp,i}$ можно найти эффективную диэлектрическую проницаемость резонатора (4)

$$\varepsilon_{ef,i} = \frac{c^2 \cdot (\beta_{x_{i,1}}^2 + \beta_{y_{i,2}}^2 + \beta_{z_{i,3}}^2)}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{exp,i}^2}. \quad (4)$$

Поскольку приближение $\varepsilon_{эф*i*}$ найдено, определим приближенно собственные (резонансные) частоты (5)

$$f_{sim,i} = \sqrt{\beta_{x_{i,1}}^2 + \beta_{y_{i,2}}^2 + \beta_{z_{i,3}}^2} \cdot \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef,i}}}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет избежать трудностей вычисления корня квадратного из матрицы $\varepsilon_{ef,i}$, возникающих если бы диэлектрическая проницаемость задавалась матрицей.

Условия истинности вычисления $\varepsilon_{ef,i}$ состоят в одновременном совпадении экспериментально определенных частот и рассчитанных частот при значениях эффективной диэлектрической проницаемости, максимально близких к данным, полученным в результате электродинамического моделирования

$$|f_{exp,i} - f_{sim,i}| \leq \Delta 1, \quad (6)$$

$$|\varepsilon_{r,i} - \varepsilon_{ef,i}| \leq \Delta 2, \quad (7)$$

где $\Delta 1$ и $\Delta 2$ – погрешности вычисления частот $f_{sim,i}$ и $\varepsilon_{ef,i}$.

Шаг 1. Из анализа картины электрических полей (рис. 7, 8) сделан вывод, что

$$nm\delta = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Вначале вычислений было взято $\varepsilon_{r,i} = \begin{bmatrix} 27 \\ 27 \end{bmatrix}$.

При таких значениях индексов типов волн и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{r,i}$ получены резонансные частота $f_{sim,i} = \begin{bmatrix} 2,1487 \cdot 10^9 \\ 2,8057 \cdot 10^9 \end{bmatrix}$.

Разница между резонансными частотами, полученными в результате эксперимента и расчета составила $\Delta 1 = |f_{exp,i} - f_{sim,i}| = \begin{bmatrix} 1,4525 \cdot 10^7 \\ -2,2251 \cdot 10^8 \end{bmatrix}$. Далее

выполнен расчет $\varepsilon_{ef,i}$ по формуле (4) с использованием экспериментально полученных значений резонансных частот $f_{exp,i}$. Получены значения эффективной диэлектрической проницаемости на первом шаге вычислений

$$\varepsilon_{1,ef,i} = \begin{bmatrix} 26,6386 \\ 31,8518 \end{bmatrix} \text{ и погрешность вычислений } \Delta 2 = \begin{bmatrix} 0,3614 \\ 4,8518 \end{bmatrix}.$$

Шаг 2. Как видно, эффективная диэлектрическая проницаемость для второго типа колебаний значительно отличается от первоначально взятой $\varepsilon_{r,i}$ при моделировании. Поэтому на втором шаге в качестве диэлектрических проницаемостей в формуле (5) взяты $\varepsilon_{1,ef,i}$, полученные на первом шаге. Подставив значение $\varepsilon_{1,ef,i}$ в выражение (5), получим значения резонансных

частот $f_{sim,i} = \begin{bmatrix} 2,1632 \cdot 10^9 \\ 2,5832 \cdot 10^9 \end{bmatrix}$ и погрешность $\Delta 1 = |f_{exp,i} - f_{sim,i}| = \begin{bmatrix} 1,4114 \cdot 10^3 \\ 1,3369 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$.

Заменив $f_{exp,i}$ на $f_{sim,i}$ в выражении (4), получаем эффективную

диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{2,ef,i} = \begin{bmatrix} 26,6386 \\ 31,8518 \end{bmatrix}$ и погрешность

$$\Delta 2 = |\varepsilon_{1,ef,i} - \varepsilon_{2,ef,i}| = \begin{bmatrix} 3,4762 \cdot 10^{-5} \\ 3,2968 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}. \quad \text{Таким образом одновременно}$$

минимизированы ошибки вычисления резонансных частот и эффективной проницаемости, а также определены типы колебаний на основе проведенного электродинамического моделирования. Абсолютные погрешности определения искомых параметров не более $\Delta 1, \Delta 2 \leq 10^{-4}$.

Итак, примененная итерационная процедура позволяет проводить экстракцию эффективной диэлектрической проницаемости полосковых резонаторов СВЧ с объемными кристаллами по критерию минимальной погрешности.

5. Применение резонаторов

Применение резонаторов в составе аппаратуры, вероятно, потребует проведения оценки влияния внешних экранов, изменения параметров резонатора без электрода с плавающим потенциалом, температурной зависимости на характеристики и др.

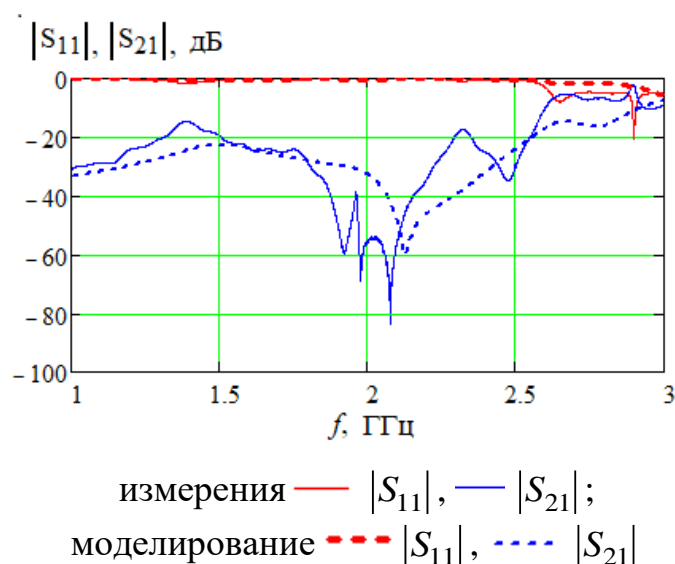


Рис. 9. Частотные зависимости измеренных и рассчитанных коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и коэффициентов отражения $|S_{11}|$ резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$ без электрода.

Был проведен эксперимент по выявлению критичности от изменения параметров рассматриваемой конструкции резонаторов. Положение и ориентация кристалла, как было показано (см. рис. 7), не являются критическими для получения резонансов. Во всех вариантах получается звено полосно-пропускающего типа с узкой полосой пропускания порядка 1...1,5 %.

Исследовалось влияние электрода из меди, располагаемого на верхней поверхности кристалла. Экспериментальные и рассчитанные частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ резонатора без электрода показаны на рис. 9. Как видно из рис. 9 на резонансных частотах максимальный коэффициент передачи $|S_{21}| \approx -15$ дБ, $|S_{11}| \approx -1...-2$ дБ, что означает потерю основной функции устройства. Таким образом, наличие верхнего электрода с плавающим потенциалом оказалось критичным. Использование электрода для управления параметрами резонаторов без изменения представленной конструкции остается под вопросом, т.к. электрод на частоте первого резонанса выполняет функцию заземленного экрана с почти нулевым потенциалом.

Для решения практической задачи построения полосно-пропускающего фильтра наиболее целесообразно использовать третий резонанс при размещении кристалла с индексом XY, если по условиям технических требований допускаются первый и второй резонанс. Если же требуется обеспечивать полосу частот от 1 до 2,5 ГГц, тогда в наибольшей степени подходит звено фильтра с индексом $\bar{X}\bar{Z}$.

Заключение

В ходе работы были получены экспериментальные частотные характеристики резонаторов, отличающихся расположением и ориентацией кристалла ниобата лития на поверхности полоскового модуля в диапазоне частот до 3 ГГц. Показано, что на основе исследованной конструкции могут быть построены звенья полосно-пропускающих фильтров. Наличие на поверхности металлического электрода является обязательным атрибутом конструкции для

получения приемлемого коэффициента передачи и коэффициента отражения на резонансных частотах. Проведенное моделирование в системе COMSOL подтвердило физические свойства и достижимые границы параметров, хотя предложенная модель требует детализации. Тем не менее, при сравнении экспериментальных данных и результатов расчета на модели в COMSOL, получено хорошее совпадение резонансных частот, минимальных значений коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и максимальных величин коэффициентов передачи $|S_{21}|$.

В предложенной конструкции резонатора получено разреживание спектра резонансных частот в полосковой структуре. Использование выделяемых резонансов позволило оценить диэлектрическую проницаемость объемных кристаллов на СВЧ по экспериментально полученным резонансным частотам.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

Литература

1. Беляев Б.А., Дрокин Н.А., Шабанов В.Ф. Резонансные датчики для измерения диэлектрических спектров жидких кристаллов в широком диапазоне частот // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – №. 5. – С. 111-118. DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-1-41-47
2. Миненко Д.Е., Шеерман Ф.И., Федоров Е.А. Методы измерений диэлектрических свойств листовых диэлектриков в СВЧ диапазоне на основе полосковых резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. – 2022. – С. 66-68.

3. Миненко, Д.Е. Шеерман Ф.И. Проектирование полосковых резонаторов для измерения ϵ_r и $\text{tg}\delta$ листовых диэлектрических материалов в СВЧ-диапазоне // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 41-47. – DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-1-41-47
4. Арутюнян А.А. и др. Частотные характеристики полосковых модулей формирования квазихаотических сигналов на основе объемных нелинейно-оптических кристаллов // Ural Radio Engineering Journal. – 2023. – Т. 7. – №. 3. – С. 227-249. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.001
5. Малютин Г.А., Арутюнян А.А. Особенности измерения фазовой задержки в полосковых структурах с диэлектрическим заполнением нелинейными объемными кристаллами // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». – 2023.
6. Воробьев П.А., Малютин Н.Д., Федоров В.Н. Квази-Т-волны в устройствах на связанных полосковых линиях с неуравновешенной электромагнитной связью // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27. – №. 9. – С. 1711-1718.
7. Рез И.С, Поплавко Ю.М. Диэлектрики: основные свойства и применения в электронике. – Радио и Связь, 1989. ISBN 5-256-00235-X.
8. Wong K.K. (ed.). Properties of lithium niobate. – IET, 2002. – №. 28.
9. Журавлев А.А. Разработка и исследование диэлектрических интегрально-оптических датчиков напряженности электрического поля: дис. канд. техн. наук. – Пермь. – 2020. – С. 142.
10. Лебедев В.В. Исследование высокочастотной и сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения в волноводных структурах на основе ниобата лития: дис. – диссертация на соискание учёной степени к. ф.-м. н., СПб: Физико-технический институт им. АФ Иоффе РАН. – 2016. – С. 126.
11. Геворкян В., Кочемасов В. Объемные диэлектрические резонаторы-основные типы, характеристики, производители. Часть 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2016. – №. 4. – С. 62-77.

12. Диэлектрические резонаторы для ЭПР спектроскопии / И.С. Головина, И.Н. Гейфман, В.Е. Родионов – Национальная академия наук Украины, Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины. – Киев: НАН Украины. – 2015. – С. 158. ISBN 978-966-02-7675-8.

Для цитирования:

Арутюнян А.А., Малютин Н.Д. Полосковый резонатор СВЧ с объемным кристаллом: экспериментальные характеристики и определение эффективной диэлектрической проницаемости. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.8>