

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

А. С. Волошин, Н. А. Дрокин (научный руководитель)

Красноярский государственный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: Alex_Vlshn@mail.krasu.ru

Исследования диэлектрической проницаемости в дециметровом диапазоне длин волн представляют значительный интерес, так как в этом частотном диапазоне могут проявляться внутримолекулярные движения как в ЖК, так и в более высокомолекулярных соединениях, таких, как биополимеры. Однако данных по диэлектрическим характеристикам ЖК и биополимеров в этом диапазоне длин волн недостаточно. Измерения диэлектрической проницаемости здесь затруднены, так как линии передачи на основе сосредоточенных элементов (емкости, индуктивности, сопротивления) уже не работают, а линии передачи или резонаторы с распределенными параметрами имеют неприемлемо большие размеры. Из этого положения, как правило, выходят, используя микрополосковые линии передач (МПЛ), по длине которой укладывается половина длины волны (рис. 1).

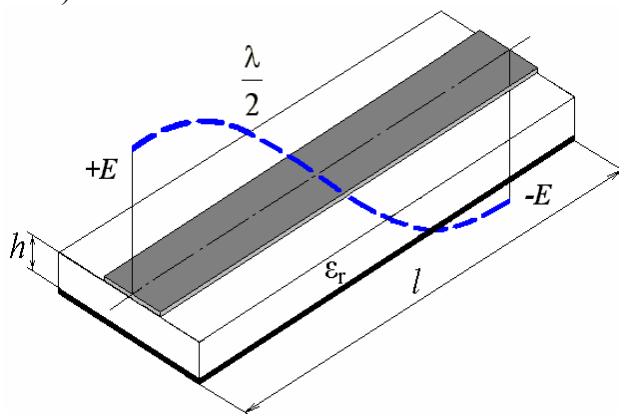


Рис. 1

Основным элементом таких линий передач является подложка, представляющая собой пластинку из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ_r , позволяющая уменьшить размеры устройства в $\sqrt{\epsilon_r}$ раз.

На основе таких линий передач были изготовлены очень чувствительные и миниатюрные датчики [1], показанные на рис. 2. В этих датчиках с целью создания СВЧ-электрического поля большой плотности МПЛ была согнута в кольцо, а чувствительные элементы (измерительные емкости или встречно-штыревые структуры) помещены в созданные таким образом пучности электрического поля (см. рис. 2).

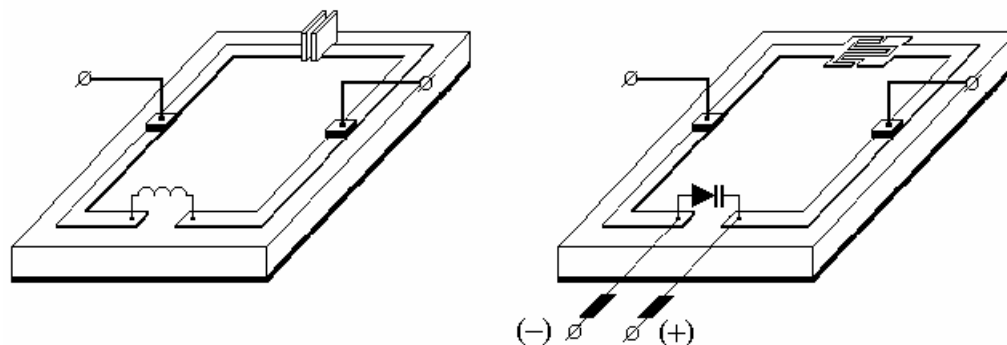


Рис. 2

Недостаток таких линий передач заключается в том, что в них есть сосредоточенные элементы (калиброванные катушки индуктивности или варактор, предназначенные для перестройки датчика по частоте), в связи с чем датчики на их основе хорошо работают лишь на час-

тотах до 2 ГГц. Для работы на частотах выше 2 ГГц могут быть применены резонаторы другого типа, показанные на рис. 3.

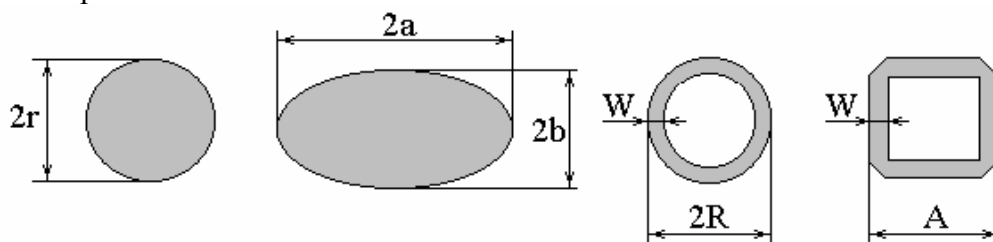


Рис. 3

Весьма перспективными являются резонаторы кольцевого типа, однако, до настоящего времени многие вопросы их работы еще не выяснены. В частности, представляет интерес вопрос о влиянии на характеристики такого резонатора точек подключения подводящих линий, а также наличие неоднородностей в структуре кольца и различного типа скачков волнового сопротивления. Прямоугольные кольцевые резонаторы для измерения диэлектрической проницаемости подробно еще не изучались. В связи с этим целью данной работы явилось изучение и исследование свойств микрополосковых кольцевых резонаторов (МКР), а также экспериментальная проверка расчетов.

В данной работе рассматривалась конструкция МКР со скачками волнового сопротивления, предназначенная для диэлькометрических исследований жидких кристаллов (рис. 4). Резонансный контур (2) нанесен на керамическую подложку (3), металлизированную снизу (1). Особенности этой конструкции являются окна (4), одно из которых предназначено для размещения исследуемого образца, а остальные для перестройки рабочей частоты датчика и других технических целей.

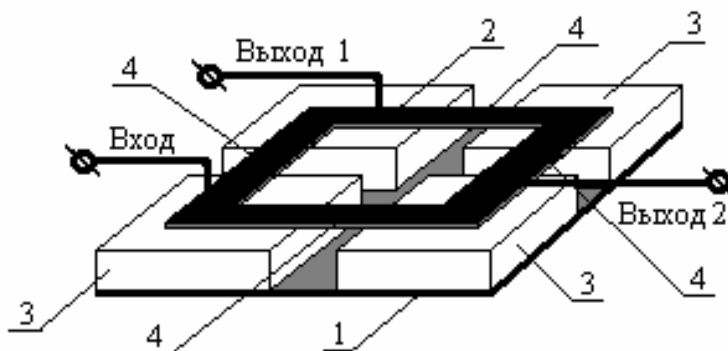


Рис. 4

Наличие двух выходов было обусловлено тем, что при расчетах появлялась возможность оценить эффективность работы устройства на различных резонансных модах и при различных способах подключения: перпендикулярном (выход 1) и параллельном (выход 2). На этапе проектирования предполагалось, что проводить измерения можно как по пику основного резонанса (по регистрации потерь со второго выхода), так и по полюсу затухания (по регистрации потерь с первого выхода). Анализ таких возможностей ранее не проводился.

Для исследования свойств амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) микрополоскового кольцевого резонатора в среде Microsoft Developer Studio на языке Fortran была разработана программа, позволяющая рассчитывать АЧХ прямых и обратных потерь такой конструкции в квазистатическом приближении. Данная программа позволяет для различных значений параметров датчика считать АЧХ его прямых и обратных потерь и сразу выводить их графики непосредственно на экран. Программа работает с 17 передаваемыми ей пользователем параметрами, содержащими всю необходимую информацию о геометрических размерах микрополоскового кольца датчика, о материале подложки и вставных секциях и о подводящих линиях. Комментарии ко всем вводимым пользователем параметрам отображаются в окне для комментариев в нижней части диалогового окна. С помощью этой программы был проведен расчет АЧХ конструкции МКР в зависимости от размеров измерительных окон, местоположения образца относительно входа и выходов (1,2) подводящих линий передач (см. рис. 4).

Наряду с расчетом АЧХ в квазистатическом приближении в пакете для проектирования СВЧ-устройств Microwave Office v3.09 был проведен электродинамический анализ распространения электромагнитных волн в МКР. Возможности данного пакета позволяют получать структуры распределения электромагнитных волн в устройствах с распределенными параметрами, что бывает очень полезно при их проектировании. На рис. 5 показаны структуры распределения напряжений и токов в МКР при емкостном подключении на частотах первой и второй мод соответственно. На рисунке дан вид этого СВЧ-устройства сверху, где показаны токи, текущие в металлической полоске, и напряжения в подложке.

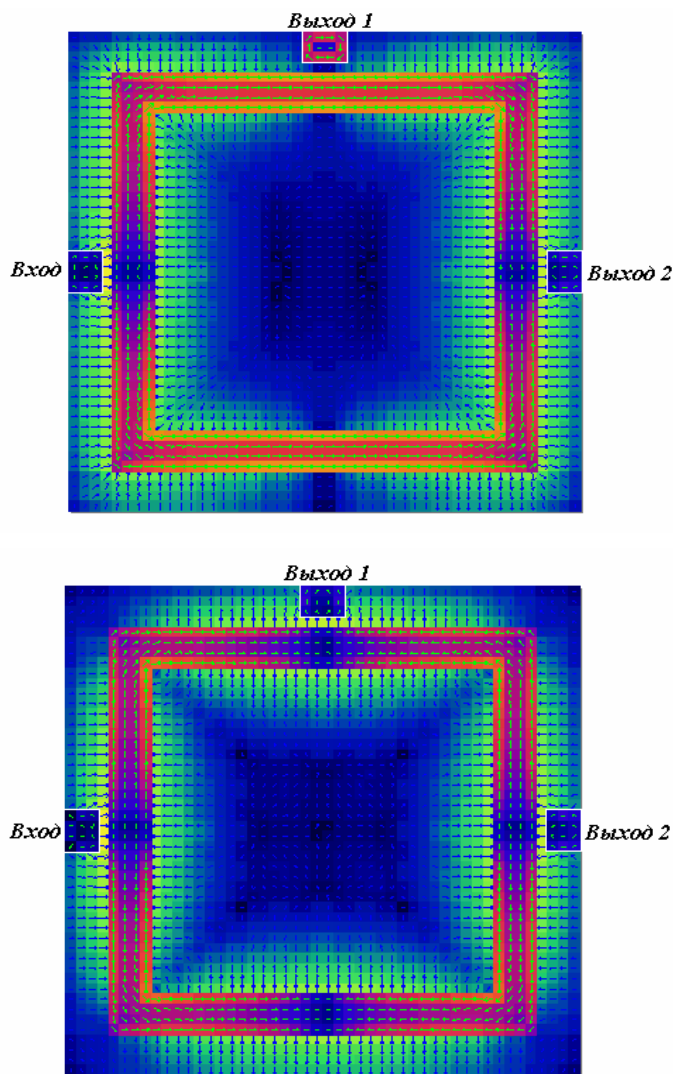


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что на частоте первой моды в МКР укладывается целая длина волны, а на частоте второй моды – пучности электрического поля устанавливаются по серединам всех сторон кольца резонатора.

Для проверки проведенных расчетов был изготовлен экспериментальный макет датчика на основе МКР без окон. В качестве подложки была взята керамика В-40. На рис. 6 приведены АЧХ такого датчика в окрестности первых двух мод для случаев, когда подводящие линии подключены параллельно (см. рис. 6 а) и перпендикулярно (см. рис. 6 б). Обращает на себя внимание некоторое несовпадение расчета и эксперимента вблизи второй моды – экспериментальные значения лежат дальше расчетных. Это можно объяснить несоответствием одномерной и двумерной моделей – уголки кольца (см. рис. 5) в квазистатическом приближении учесть сложно. К тому же, в расчете из-за сложностей программирования не учитывалась дисперсия. Незначительно на частоту могли повлиять и конфигурации разъемов и проводников подводящих линий.

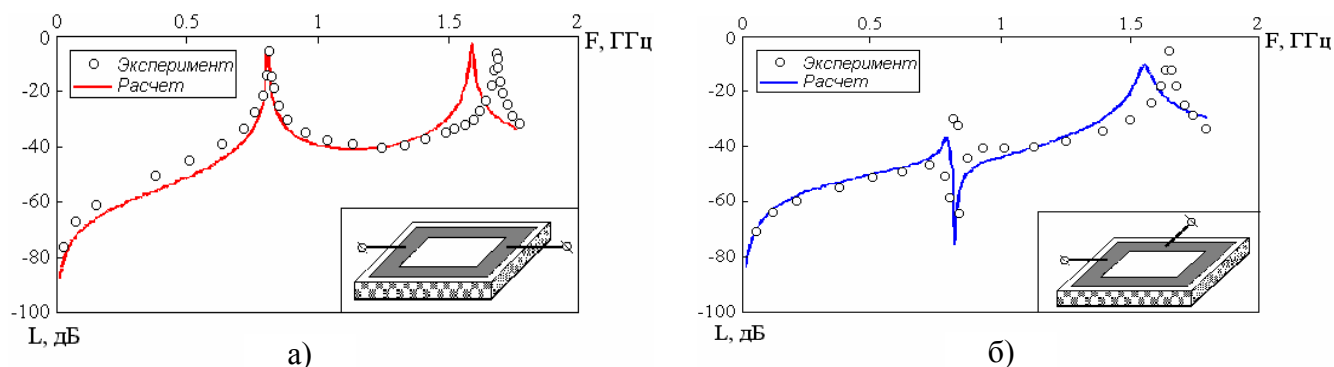


Рис. 6

Для измерений диэлектрической проницаемости жидкокристаллических веществ предыдущая конструкция МКР была несколько модифицирована наличием двух воздушных окон на противоположных сторонах кольца. Подводящие линии подключались параллельно. Идея измерения диэлектрической проницаемости состояла в том, что в одно из окон, расположенное в пучности СВЧ-электрического поля второй (рабочей) резонансной моды, помещался жидкокристаллический образец, а во второе окно могли вставляться диэлектрики с различной величиной диэлектрической проницаемости, позволяющие производить перестройку рабочей частоты. Топология такого датчика, размеры, а также значения резонансных частот приведены на рис. 7. Датчик был выполнен на подложке из поликора ($\epsilon' = 9,6$), при этом частота резонанса рабочей моды была равна 3669 МГц. Для данного датчика была проведена калибровка с помощью тестовых жидкостей, которая показала, что на этом датчике можно мерить диэлектрическую проницаемость ϵ' с точностью до 10%.

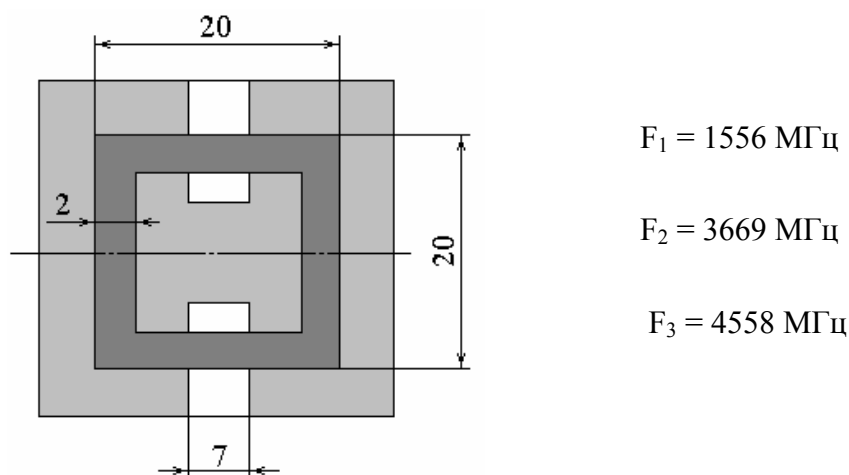


Рис. 7

Для этого датчика также была проведена перестройка рабочей частоты с помощью вставок, помещаемых в одно из измерительных окон. Грубая перестройка производилась с помощью вставок с разными ϵ' (поликор и ТБНС), а плавная – подвижкой вставки из ТБНС на расстояния от 0,5 до 5 мм. Таким образом, удалось перестроить датчик на 300 МГц в низкочастотную область.

С помощью вышепредставленного датчика была измерена концентрационная зависимость относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon'_{\text{экв}}$) двухкомпонентной смеси ацетон – жидкий кристалл 4-пентил-4'-цианобифенил (5СВ). На рис. 8 отображены результаты эксперимента. Точками на рисунке показаны значения $\epsilon'_{\text{экв}}$ для разных концентраций ЖК 5СВ в смеси (V), а сплошная кривая – это значения $\epsilon'_{\text{экв}}$, рассчитанные по формуле Лоренца-Лорентца. Ворота на рис. 8 отображают точность изготовления раствора.

Глядя на рис. 8, трудно сделать какие-либо выводы о взаимодействии молекул ЖК 5СВ и ацетона, однако, тот факт, что при малом значении V $\epsilon'_{\text{экв}}$ изменяется очень мало, позволяет сделать предположение, что концентрационная зависимость в этой области концентраций может быть сильно нелинейной.

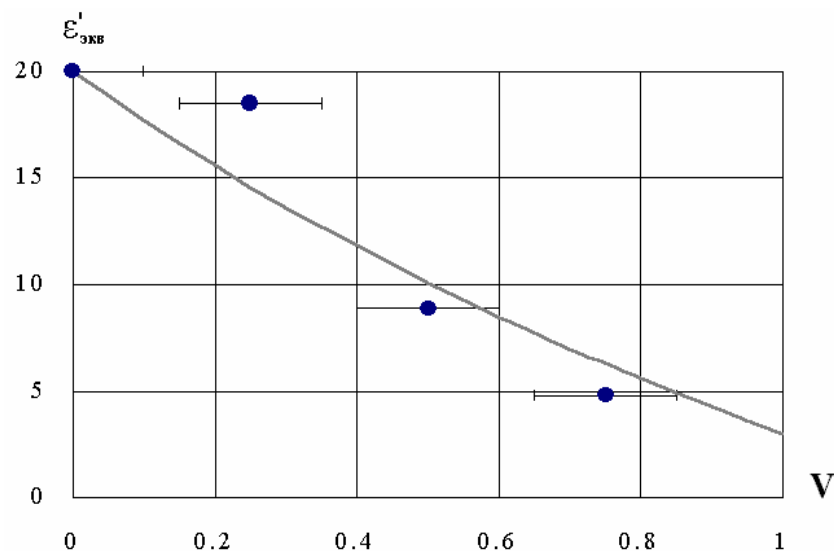


Рис. 8

Таким образом, было показано, что МКР со скачком волнового сопротивления вполне годен для диэлькометрических исследований в дециметровом диапазоне, и различные видоизменения его конфигурации могут быть взяты в качестве основы для других конструкций датчиков.

В данной работе были получены следующие результаты:

1. В среде Microsoft Developer Studio на языке Fortran разработана компьютерная программа для расчета в квазистатическом приближении характеристик микрополоскового кольцевого резонатора со скачками волнового сопротивления.
2. Используя электродинамический расчет в пакете для проектирования СВЧ-устройств Microwave Office v3.09, исследован характер поведения первых двух резонансных мод в кольцевом микрополосковом резонаторе в зависимости от способов подключения линий передач.
3. Для измерений диэлектрической проницаемости предложена и рассчитана четырехоконная и двухоконная модель микрополоскового резонатора, на основе которой изготовлен перестраиваемый по частоте датчик для исследования жидкокристаллических веществ.
4. На частоте 3,6 ГГц исследована действительная компонента диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси жидкий кристалл 5СВ - ацетон. Показано, что полученные результаты хорошо подчиняются формуле Лоренца-Лорентца, однако в области малых концентраций наблюдается небольшое отклонение.
5. Предложены новые оригинальные способы перестройки рабочей частоты измерительных датчиков на СВЧ.

Список литературы:

1. Беляев Б.А., Дрокин Н.А., Шепов В.Н. //ЖТФ, **65**, 2, 189 (1995).