

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

**Исследование распределения акустических и электрических полей в  
резонаторах с поперечным электрическим полем**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 423 группы  
направления (специальности) 11.03.03 Конструирование и технология  
код и наименование направления (специальности)

электронных средств

физического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Мальцева Владислава Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., с.н.с.

А.А. Теплых

подпись

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

О.Е. Глухова

подпись

Саратов 2018

## Введение

В современной технике широко используются разнообразные пьезоэлектрические устройства. В их основе лежит явление пьезоэффекта, которое разделяют на прямой и обратный пьезоэффект. Прямой пьезоэффект – это явление возникновения электрической поляризации пьезоматериала при его механической деформации. Обратный пьезоэффект – это явление деформации пьезоматериала под действием электрического поля. Пьезоэффект может наблюдаться только в анизотропных материалах, в которых отсутствует центр симметрии. Пьезоэлектрическими свойствами обладают вещества 20 из 32 кристаллографических классов. Всего известно более 1500 веществ, у которых проявляются пьезоэлектрические свойства. Чем ниже класс симметрии кристалла, тем богаче его пьезоэлектрические свойства, больше полярных осей и независимых пьезоэлектрических коэффициентов [1-3]. К пьезоэлектрикам относятся такие материалы как кварц, сегнетова соль, титанат бария, ниобат лития, а также различные виды пьезокерамик. Для практических целей применяют пьезоэлементы различной формы: прямоугольные или круглые пластинки, цилиндры, кольца. Пьезоэлемент помещают между металлическими обкладками или наносят металлические пленки на противоположные грани пьезоэлемента. Если к такому устройству приложить переменное электрическое напряжение, то пьезоэлемент за счет обратного пьезоэффекта будет периодически сжиматься, расширяться или изгибаться, то есть совершать механические колебания. В этом случае энергия электрического поля превращается в энергию механических колебаний с частотой, равной частоте приложенного переменного напряжения. Так как пьезоэлемент обладает собственной частотой механических колебаний, то, когда, частота приложенного напряжения приближается к собственной частоте колебаний, амплитуда колебаний возрастает. Это явление называется резонансом, а устройство – пьезорезонатором. Если на пьезоэлемент воздействовать механически с некоторой частотой, то между электродами возникает

переменное напряжение той же частоты. В этом случае энергия механических колебаний преобразуется в электрическую, и пьезоэлемент становится генератором переменной ЭДС. Таким образом, можно сказать, что пьезоэлемент является колебательной системой с электромеханическими колебаниями.

### **Преимущество пьезорезонаторов.**

В настоящее время пьезорезонаторы широко используются в науке и технике в качестве разнообразных излучателей и приемников ультразвука. В последнее время они все чаще применяются как основа для датчиков свойств или идентификации различных жидкостей и газов. Как было показано ранее [1], пьезорезонаторы с традиционным расположением электродов на противоположных сторонах резонатора плохо подходят для этой цели. Поэтому, в последние годы пьезоэлектрические резонаторы с поперечным возбуждающим электрическим полем привлекают всё больше внимания. Они имеют два важных следующие преимущества. Во-первых, при контакте резонатора с исследуемыми жидкостями, его параметры реагируют как на механические, так и на электрические свойства жидкости. Во-вторых, контакт электродов с жидкостью отсутствует, и электроды не разрушаются под действием жидкости. Такие свойства этих резонаторов очень полезны для разработки различных биологических датчиков жидкости [8], датчиков бензина [6] и жидких датчиков для экспресс-анализа жидкостей малых объемов [5].

### **Основная проблема пьезорезонаторов и решение проблемы.**

Одна из ключевых проблем при проектировании таких резонаторов заключается в подавлении нежелательных колебаний для обеспечения четкой резонансной частотной зависимости для реальной и мнимой частей электрического импеданса и адмиттанса [4]. Для этого существуют, по крайней мере, два варианта. Первый вариант предполагает выбор оптимальной формы электродов и их точную ориентацию относительно кристаллографической оси пластины. Второй вариант включает нанесение специального вязкоупругого поглощающего слоя на определенную часть резонатора, которое подавляет

паразитные колебания и позволяет формировать четкую резонансную частотную зависимость для реальной и мнимой частей электрического комплексного сопротивления и комплексной проводимости. Однако, оба этих метода требуют создания большого количества экспериментальных образцов. Проблема более точного теоретического расчета характеристик и предсказания эффективности таких резонаторов считается актуальной. В этой работе используются численные методы для расчета акустических колебаний и сопровождающего электрического поля в резонаторе, представляющего пластину пьезоэлектрического материала с двумя прямоугольными электродами, нанесенные на одну сторону пластины. Применяемый в работе метод основан на широко известном методе конечных элементов и позволяет найти распределение компонент механического смещения в пьезоэлектрической пластине и электрического потенциала в пьезоэлектрической пластине и в окружающем её вакууме для определенной частоты колебаний возбуждающего электрического поля. Этот двухмерный метод учитывает конечные геометрические размеры и конкретную форму резонатора в плоскости расчета, а также различные механические и электрические граничные условия на разных участках поверхности резонатора. В том числе учитывается и влияние поглощающего покрытия на затухание колебаний в резонаторе.

#### **Описание численной модели.**

В данной работе рассматривается пьезоэлектрический резонатор в виде пьезоэлектрической пластины, ограниченной в направлениях  $x$  и  $y$  (рис. 1.). Значение изменяющегося во времени электрического потенциала задается на бесконечно тонких электродах  $e1$  и  $e2$ . Зазор между электродами равен  $g$ . Особые механические граничные условия указаны на участках  $d1$  и  $d2$ . Остальная поверхность пластинки считается механически и электрически свободной. В направлении  $z$  пластина и электроды являются неограниченными. Таким образом, нам необходимо найти распределение механических смещений в пластине, а также распределение электрического потенциала внутри пластины и в окружающем вакууме.

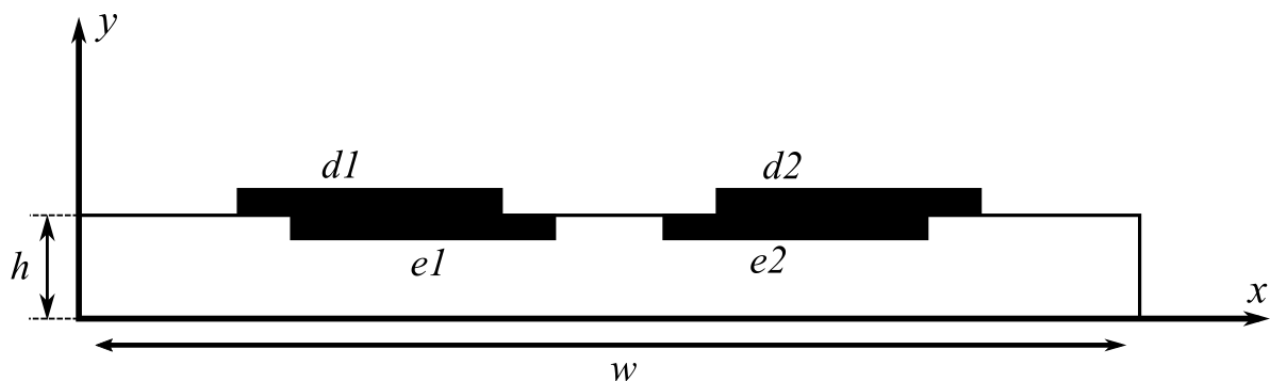


Рис. 1. Модель пьезоэлектрического резонатора

Возбуждающее электрическое поле является переменным и изменяется по гармоническому закону с частотой  $\omega$ . И её также является гармоническим, потому что нет других источников возбуждения колебаний и задача линейна. Кроме того, все переменные не зависят от координаты  $z$ .

**Описание эксперимента над пьезоэлектрическим резонатором из ниобата лития.**

Для сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными было произведено сравнение с резонаторами с поперечным электрическим полем, изготовленным из пластины ниобата X - среза. Размеры сдвига и толщина пластины равны  $18 \times 18$  мм и толщиной 0,456 мм соответственно. Два прямоугольных электрода толщиной 200 нм с размерами  $5 \times 10$  мм наносились с одной стороны пластины (рисунок 1) через специальную маску в вакууме. Электроды осаждались таким образом, что поперечное электрическое поле ориентировалось вдоль кристаллографической оси Y. Эта конфигурация поля возбуждала продольную объемную акустическую волну, переотражающуюся между сторонами пластины. Зазор  $g$  между электродами составлял 1 - 4 мм. Площадь вокруг электродов и часть электродов шириной 5 мм покрывали демпфирующим слоем поглощающего лака толщиной около 0,2 мм. Зазор между демпфирующими слоями 3 - 4 мм.

Частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора измерялись с использованием измерителя LCR (4285A,

AgilentTechnologiesInc.).

### **Сравнение теоретических и экспериментальных результатов пьезоэлектрика.**

В соответствии с экспериментом расчет проводился для случая, когда толщина пластины  $h=0,5$  мм, а ширина  $w=18$  мм (рисунок 1). На верхней поверхности пластины были отложены два электрода  $e1$  и  $e2$ . Поперечное электрическое поле ориентировалось вдоль кристаллографической оси  $Y$ . Ширина каждого электрода  $e1$  и  $e2$  составляла 5 мм с промежутком  $g$  между ними в диапазоне 1-3 мм в разных экспериментах. Ширина демпфирующих областей  $d1$  и  $d2$  составляла 5 мм, а области перекрытия ( $d1 - e1$ ) и ( $d2 - e2$ ) фиксировались на 3-4 мм.

Поскольку описанный метод расчета в дипломной работе позволяет найти распределение всех переменных и их производных для любой заданной частоты, можно было построить электрический импеданс в зависимости от частоты этого резонатора и сравнить их с экспериментом. Итак, мы рассчитали распределение акустического поля и электрического потенциала в диапазоне  $f = 6.4 - 6.8$  МГц. В теоретической модели ясно видно, что максимальная амплитуда акустических колебаний находится в зазоре между электродами. Эти колебания соответствуют продольной объемной акустической волне, распространяющейся в вертикальном направлении между границами пластины. Эта волна является причиной глубокого резонанса на частотной зависимости электрического импеданса.

Рассчитанные частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса представлены сплошными линиями в графиках дипломной работы. В ходе расчётов было видно, что между теоретическими и экспериментальными зависимостями существует некоторое согласие. Поэтому разница между значениями резонансной частоты не превышает 23 кГц. Немного большее различие по абсолютным значениям  $X$  объясняется паразитной электрической емкостью устройства, которое не учитывалось при расчете. Кроме того, используемые константы материала, могут отличаться от

реальных в диапазоне  $\pm 5\%$  (стандартная ошибка для современной технологии процесса выращивания кристаллов).

### Теоретическая модель резонатора на основе пьезокерамики ЦТС-19.

Рассмотрим пьезокерамическую пластину с двумя электродами [6], нанесенными на одну сторону пластины. Длина и толщина пластины равны  $l$  и  $h$  соответственно, а ширина зазора между электродами равна  $d$ . Геометрия резонатора представлена на рисунке 2. Граничные условия на разных частях сторон пластины различны. Значения переменного электрического потенциала во времени устанавливаются на бесконечно тонких электродах  $e1$  и  $e2$ . Оставшаяся часть поверхности пластины считается механически свободной и электрически открытой. В направлении оси  $z$  пластина и электроды считаются бесконечными.

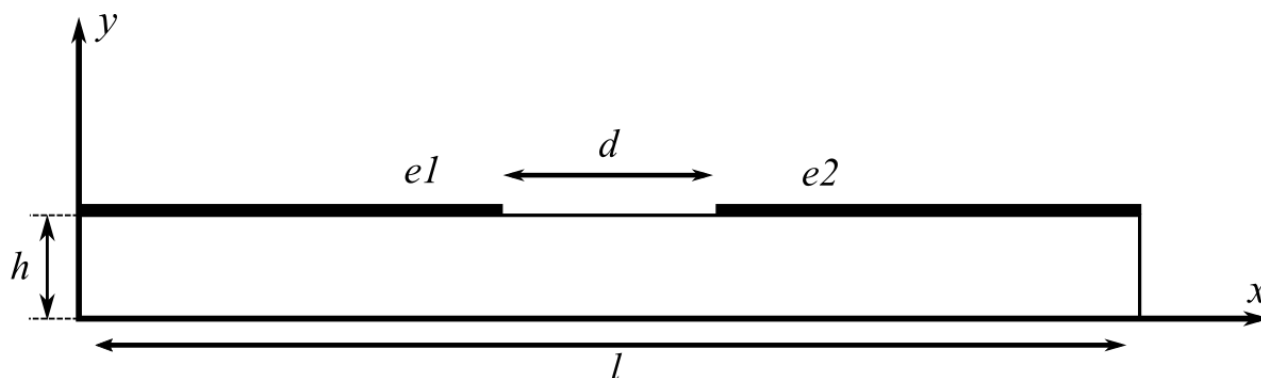


Рисунок 2.1 Модель керамического резонатора на ЦТС-19

Возбуждающее электрическое поле чередуется и изменяется в соответствии с гармоническим законом с частотой  $\omega$ . Поскольку другие источники возбуждения колебаний отсутствуют и задача линейна, решение также гармонично. Кроме того, все переменные не зависят от координаты  $z$ . В этом случае мы так же используем формулы, что и в случае с пьезорезонатором ниобата лития. Таким образом, эта задача представляет собой систему дифференциальных уравнений, которые описаны в дипломной работе. В этой работе эта проблема была решена методом Галеркина. Электрические граничные условия означают распределение потенциала на электродах  $e1$  и  $e2$  и

непрерывность потенциала на оставшейся части поверхности пластины. Механические граничные условия состоят в отсутствии нормальных компонентов механического напряжения на обеих сторонах пластины. Кроме того, в этом случае демпфирующее покрытие для подавления паразитных колебаний отсутствует. Этот факт значительно упрощает теоретическую постановку задачи по сравнению с аналогичной задачей для резонатора на основе пластины ниобата лития с демпфирующим покрытием. Чтобы рассмотреть акустическое затухание в резонаторе, мы ввели специальный коэффициент затухания  $\eta$ , который отражает тот факт, что пьезокерамика не является монокристаллом, а представляет собой поликристаллическое вещество.

#### **Описание эксперимента над резонатором из пьезокерамики ЦТС-19.**

Мы взяли экспериментальные данные двух резонаторов с поперечным возбуждающим электрическим полем. Для их изготовления использовались пластины пьезокерамики ЦТС - 19 с размерами  $l = 18$  мм и  $w = 20$  мм и толщиной  $h = 2$  мм (рисунок 2). Одна сторона каждой пластины была покрыта тонкой пленкой из алюминия с зазором в центре резонатора, который был ориентирован таким образом, что тангенциальное возбуждающее электрическое поле направлено вдоль кристаллографической оси  $z$ . Боковая часть каждой пластины, ориентированной вдоль оси  $y$ , имели волнообразную форму, чтобы уменьшить отражение паразитных акустических волн, распространяющихся вдоль оси  $z$ . Было изготовлено два образца с шириной зазора между электродами  $d = 2$  и 3 мм. Частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса измерялись с помощью измерителя LCR (4285A, Agilent Technologies Inc.). Мы нашли хороший резонанс в частотном диапазоне 75-125 кГц.

Эксперимент показал, что значение добротности параллельных резонансов не зависит от ширины зазора между электродами ( $Q = 180-190$ ). Однако эффективный коэффициент электромеханической связи увеличивается с увеличением ширины зазора от 11 до 16%. Полученные значения



коэффициента электромеханической связи являются рекордными, поскольку все известные значения ниобата лития не превышают 4%. Кроме того, следует отметить, что хорошее качество резонансов было получено без каких-либо специальных мер для подавления нежелательных колебаний. Теоретический анализ показал, что доминирующие компоненты механического смещения являются тангенциальными. Можно видеть очень хорошее количественное согласие между рассчитанными и измеренными значениями  $R$ . Немного большее различие по абсолютным значениям  $X$  объясняется паразитной электрической емкостью устройства, которое не учитывалось при расчете. Следует отметить, что разница рассчитанных и измеренных значений резонансной частоты во всех случаях не превышала 5 кГц.

### **Заключение**

В ходе проделанной работы был использован двумерный численный метод конечных элементов для создания теоретической модели резонатора с поперечным электрическим возбуждающим полем. При помощи этого метода были рассчитаны распределения акустического и электрических полей в резонаторах из ниобата лития и пьезокерамики ЦТС-19. Это позволило определить моду колебаний для каждого рассмотренного резонанса. Также были рассчитаны частотные зависимости импеданса этих резонаторов, и проведено сравнение и имеющимися экспериментальными данными. В результате работы сделан вывод, что данный численный метод удобен для создания теоретической модели, а получаемые с его помощью данные находятся в удовлетворительном численном согласии с экспериментом. Поэтому выбранный метод можно применять при конструировании данного типа пьезоэлектрических резонаторов и устройств на их основе.

1. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1979. 400с.
2. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику: Учебное пособие. М.: Наука. 1984. 400с.
3. D. Royer, E. Deiulesaint. Elastic waves in Solids, Vol I, Free and guided propagation. Springer-Verlag, Berlin, 2000
4. Teplykh A.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. Numerical Model of Piezoelectric Lateral Electric Field Excited Resonator // Sensors & Transducers, Vol. 184, Issue 1, January 2015, P. 60-65
5. Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., Kuznetsova I.E. Liquid sensor based on a piezoelectric lateral electric field-excited resonator // Ultrasonics. 2015. № 63. P. 179–183.
6. Zaitsev B.D., Teplykh A.A., Borodina I.A., Kuznetsova I.E., Verona E. Gasoline sensor based on piezoelectric lateral electric field excited resonator // Ultrasonics. 2017. №80. P. 96–100
7. Zaitsev B.D., Teplykh A.A., Kuznetsova I.E., Lateral electric field excited resonator based on PZT ceramics // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings
8. Гулий О.И., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Шихабудинов А.М., Балко А.Б., Теплых А.А., Староверов С.А., Дыкман Л.А., Макарихина С.С., Игнатов О.В.  
Использование метода электроакустического анализа для детекции бактериофагов в жидкой фазе // БИОФИЗИКА, 2016, том 61, вып. 1, с. 60–67