

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Анализ паразитных акустических волн в пьезоэлектрических резонаторах
с поперечным электрическим полем**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента(ки) 4 курса 421 группы
направления (специальности) 03.03.03 Радиофизика
код и наименование направления (специальности)

физического факультета
наименование факультета, института, колледжа

Голубина Данила Эдуардовича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н., Зайцев Б. Д.
должность, учёная степень, звание подпись, дата инициалы, фамилия

Зав.кафедрой
зав.кафедрой, д.ф.-м.н., проф. Глухова О.Е.
должность, учёная степень, звание подпись, дата инициалы, фамилия

Введение

В настоящее время большой интерес исследователей вызывают пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем [1-4]. Это связано с тем, что в подобных резонаторах электроды располагаются на одной стороне пьезоэлектрической пластины. Это делает их крайне привлекательными для создания различных жидкостных и биологических датчиков, которые чувствительны к изменениям, как механических свойств, контактирующей среды, так и электрических в отличие от традиционных резонаторов с продольным электрическим полем. Основная трудность при создании резонаторов с поперечным электрическим полем – это подавление паразитных колебаний, которые ухудшают резонансные свойства. Традиционно подавление паразитных колебаний осуществляется экспериментальным выбором формы электродов. Обычно используют электроды в форме полумесяцев [1-2], однако их размеры зависят формы и размеров пластины и от ее кристаллографической ориентации. В настоящей работе, теоретически проанализированы все типы акустических волн, которые возбуждаются в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным электрическим полем на основе пластин ниобата лития, кварца, окиси цинка или керамики ЦТС с различной кристаллографической ориентацией. Показано, что помимо основной объемной моды, генерируемой поперечной компонентой электрического поля существует паразитные акустические волны, к которым относятся волны Лэмба и волны с поперечно-горизонтальной поляризацией. Эти волны распространяются вдоль поверхности пластины, переотражаются от ее боковых граней и ухудшают резонансные свойства резонатора. Для их подавления предложено использовать поглощающее покрытие, нанесенное на определенную часть резонатора [3,4]. Отмечено также, что существуют паразитные объемные волны, которые возбуждаются нормальными компонентами электрического поля и распространяются вдоль нормали к поверхности пластины. Для подавления этих волн используется пространственное разнесение источника ВЧ электрического поля и резонирующей пластины [5].

1. Анализ акустических волн в резонаторе с поперечным электрическим полем на основе ниобата лития

На рис.1.1 представлена общая схема пьезоэлектрического резонатора. На пьезоэлектрической пластине располагаются 2 электрода. В этом разделе рассмотрим резонаторы с поперечным электрическим полем на основе пластины из ниобата лития с различной кристаллографической ориентацией.

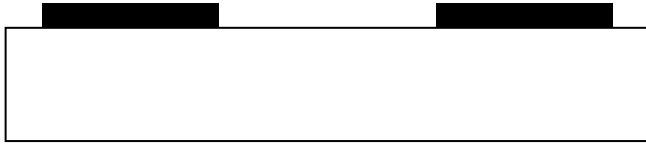


Рис. 1.1 Общий вид резонатора с поперечным электрическим полем.

1.1 Общие уравнения для механического напряжения в пластине ниобата лития произвольной ориентации.

Резонатор имеет произвольную кристаллографическую ориентацию. Запишем основные уравнения для механического напряжения (в самом общем виде) в пьезоэлектрической среде[6]:

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= C_{1111}S_{11} + C_{1122}S_{22} + C_{1133}S_{33} + C_{1112}S_{12} + C_{1113}S_{13} + C_{1123}S_{23} - e_{111}E_1 \\
 &\quad - e_{211}E_2 - e_{311}E_3 ; \\
 T_{22} &= C_{2211}S_{11} + C_{2222}S_{22} + C_{2233}S_{33} + C_{2212}S_{12} + C_{2213}S_{13} + C_{2223}S_{23} - e_{122}E_1 \\
 &\quad - e_{222}E_2 - e_{322}E_3 ; \\
 T_{33} &= C_{3311}S_{11} + C_{3322}S_{22} + C_{3333}S_{33} + C_{3312}S_{12} + C_{3313}S_{13} + C_{3323}S_{23} - e_{133}E_1 \\
 &\quad - e_{233}E_2 - e_{333}E_3 ; \\
 T_{13} &= C_{1311}S_{11} + C_{1322}S_{22} + C_{1333}S_{33} + C_{1312}S_{12} + C_{1313}S_{13} + C_{1323}S_{23} - \\
 &\quad e_{113}E_1 - e_{213}E_2 - e_{313}E_3 ; \\
 T_{23} &= C_{2311}S_{11} + C_{2322}S_{22} + C_{2333}S_{33} + C_{2312}S_{12} + C_{2313}S_{13} + C_{2323}S_{23} - e_{123}E_1 \\
 &\quad - e_{223}E_2 - e_{323}E_3 ; \\
 T_{12} &= C_{1211}S_{11} + C_{1222}S_{22} + C_{1233}S_{33} + C_{1212}S_{12} + C_{1213}S_{13} + C_{1223}S_{23} - e_{112}E_1 \\
 &\quad - e_{212}E_2 - e_{312}E_3 ;
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Здесь C_{ijke} – компоненты тензора упругих постоянных, T_{ij} – компонента тензора механических напряжений, S_{ij} – компонента тензора деформации, E_i – компонента напряженности электрического поля, e_{ijk} – компонента тензора пьезоэлектрических постоянных.

Запишем все материальные постоянные для ниобата лития в матричной форме[7]:

$$\begin{bmatrix}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\
 C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & 0 & 0 \\
 C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\
 C_{14} & C_{24} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56} & C_{66}
 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & e_{16} \\
 e_{21} & e_{22} & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\
 e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

(1.2)

С учетом (1.2) исходные уравнения (1.1) принимают вид:

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{21}E_2 - e_{31}E_3 ; \\
 T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{22}E_2 - e_{32}E_3 ; \\
 T_{33} &= C_{31}S_{11} + C_{32}S_{22} + C_{33}S_{33} - e_{33}E_3 ; \\
 T_{13} &= C_{56}S_{12} + C_{55}S_{13} - e_{15}E_1 ; \\
 T_{23} &= C_{41}S_{11} + C_{42}S_{22} + C_{44}S_{23} - e_{24}E_2 ; \\
 T_{12} &= C_{66}S_{12} + C_{56}S_{13} - e_{16}E_1 ;
 \end{aligned}$$

(1.3)

Далее рассмотрим различные ориентации пластины ниобата лития и поля.

1.2 Нормаль к пластине направлена вдоль оси X, поперечное электрическое поле направлено вдоль оси Y.

Рассматриваемая ситуация представлена на рис 1.2



Рис 1.2

В данном случае, существуют компоненты полей E_1 и E_2 ; $E_3 = 0$. Запишем те компоненты T_{ij} , которые возбуждаются этими компонентами поля:

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{21}E_2 ; \\
 T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{22}E_2 ; \\
 T_{13} &= C_{56}S_{12} + C_{55}S_{13} - e_{15}E_1 ; \\
 T_{23} &= C_{41}S_{11} + C_{42}S_{22} + C_{44}S_{23} - e_{24}E_2 ; \\
 T_{12} &= C_{66}S_{12} + C_{56}S_{13} - e_{16}E_1 ;
 \end{aligned}$$

(1.4)

Видно что, поперечная компонента поля E_2 порождает компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{23} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют. Ниже u_i – это компоненты механического смещения. Итак:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_3
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_2

$S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это объемная волна, на которую настроен резонатор. Остальные волны – это паразитные волны. Нормальная компонента поля E_1 порождает компоненты напряжения T_{13} , T_{12} , которые связаны с деформациями S_{12} , S_{13} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
2. $S_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_1 и поляризованная вдоль оси X_2
3. $S_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_1 и поляризованная вдоль оси X_3
4. $S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3

Все эти волны являются паразитными.

1.3 Нормаль к пластине направлена вдоль оси X, поперечное электрическое поле направлено вдоль оси Z.

Рассматриваемая ситуация представлена на рис. 1.3



Рис 1.3

В данном случае существуют компоненты полей E_1 и E_3 ; $E_2 = 0$. Запишем те компоненты T_{ij} , которые возбуждаются этими компонентами поля:

$$\begin{aligned}
T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{31}E_2 ; \\
T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{32}E_2 ; \\
T_{33} &= C_{31}S_{11} + C_{32}S_{22} + C_{33}S_{33} - e_{33}E_3 ; \\
T_{13} &= C_{56}S_{12} + C_{55}S_{13} - e_{15}E_1 ; \\
T_{12} &= C_{66}S_{12} + C_{56}S_{13} - e_{16}E_1 ;
\end{aligned}
\tag{1.5}$$

Видно, что поперечная компонента поля E_3 порождает компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{33} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это продольная волна, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_3
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_2

$S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна, на которую настроен резонатор. Остальные волны – это паразитные волны.

Нормальная компонента поля E_1 порождает компоненты напряжения T_{13} , T_{12} , которые связаны с деформациями S_{12} , S_{13} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
2. $S_{21} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_1 и поляризованная вдоль оси X_2
3. $S_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_1 , бегущая вдоль оси X_1 и поляризованная вдоль оси X_3
4. $S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3

Все эти волны являются паразитными.

1.4 Нормаль к пластине направлена вдоль оси Y, поперечное электрическое поле направлено вдоль оси X.

Рассматриваемая ситуация представлена на рисунке 1.4:



Рис. 1.4

В данном случае, есть компоненты полей E_1 и E_2 ; $E_3 = 0$. Запишем те значения T_{ij} , которые возбуждаются этими компонентами поля. Они в точности равны: (1.4) на странице 6. Поперечная Компонента поля E_1 порождает: компоненты напряжения T_{13} и T_{12} , которые связаны с деформациями S_{12} и S_{13} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
2. $S_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
3. $S_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_1
4. $S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_3

$S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это поперечная объемная волна, на которую настроен резонатор. Остальные волны паразитные.

Нормальная компонента поля E_2 порождает компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{23} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2

Все эти волны являются паразитными.

1.5 Нормаль к пластине направлена вдоль оси Y, поперечное электрическое поле направлено вдоль оси Z.

Рассматриваемая ситуация представлена на рис. 1.5



Рис. 1.5

В данном случае существуют, компоненты полей E_2 и E_3 ; $E_1 = 0$. Запишем те компоненты напряжения, которые возбуждаются этими компонентами поля:

$$\begin{aligned} T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{21}E_2 - e_{31}E_3 ; \\ T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{22}E_2 - e_{32}E_3 ; \\ T_{33} &= C_{31}S_{11} + C_{32}S_{22} + C_{33}S_{33} - e_{33}E_3 ; \\ T_{23} &= C_{41}S_{11} + C_{42}S_{22} + C_{44}S_{23} - e_{24}E_2 ; \end{aligned} \quad (1.6)$$

Видно что, нормальная компонента поля E_2 порождает компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{23} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2 и поляризованная вдоль оси X_3

Все эти волны паразитные.

Поперечная компонента поля E_3 порождает компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{23} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2 и поляризованная вдоль оси X_3

$S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ – это поперечная объемная волна, на которую настроен резонатор.

Остальные волны – паразитные.

1.6 Нормаль к пластине направлена вдоль оси Z, поперечное электрическое поле направлено вдоль оси X.

Рассматриваемая ситуация представлена на рис 1.6:



Рис. 1.6

В данном случае существуют, компоненты полей E_1 и E_3 ; $E_2 = 0$. Запишем те компоненты напряжения, которые возбуждаются этими компонентами поля:

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{31}E_3; \\
 T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{32}E_3; \\
 T_{33} &= C_{31}S_{11} + C_{32}S_{22} + C_{33}S_{33} - e_{33}E_3; \\
 T_{13} &= C_{56}S_{12} + C_{55}S_{13} - e_{15}E_1; \\
 T_{12} &= C_{66}S_{12} + C_{56}S_{13} - e_{16}E_1;
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

Видно, что нормальные компоненты поля E_3 порождают компоненты напряжения T_{11} , T_{22} и T_{33} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} и S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_3 и поляризованная вдоль оси X_2
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_2

Все эти волны паразитные.

Поперечная компонента поля E_1 порождает компоненты напряжения T_{13} и T_{12} , которые связаны с деформациями S_{12} , S_{13} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_2 и поляризованная вдоль оси X_1
2. $S_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1}$ - это SH-волна, бегущая вдоль оси X_1 и поляризованная вдоль оси X_2
3. $S_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
4. $S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_3 и поляризованная вдоль оси X_1

$S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ – это объемная поперечная волна, на которую настроен резонатор.

Остальные волны – паразитные.

1.7 Ориентация пластины 128Y-X, поперечное поле направлено вдоль оси X.

Теперь рассмотрим широко используемую ориентацию пластины ниобата лития: 128Y-X. В этом случае пластина повернута вокруг кристаллографической оси X на 128° , так что угол между нормалью к пластине и осью Y оставляет 128° . Для этой цели выберем новую систему координат $x' y' z'$



Рис. 1.7

В данном случае существуют компоненты полей: E_2 и E_1

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= C_{1111}S_{11} + C_{1122}S_{22} + C_{1133}S_{33} + C_{1112}S_{12} + C_{1113}S_{13} + C_{1123}S_{23} - e_{111}E_1 \\
 &\quad - e_{211}E_2 - e_{311}E_3 ; \\
 T_{22} &= C_{2211}S_{11} + C_{2222}S_{22} + C_{2233}S_{33} + C_{2212}S_{12} + C_{2213}S_{13} + C_{2223}S_{23} - e_{122}E_1 \\
 &\quad - e_{222}E_2 - e_{322}E_3 ; \\
 T_{33} &= C_{3311}S_{11} + C_{3322}S_{22} + C_{3333}S_{33} + C_{3312}S_{12} + C_{3313}S_{13} + C_{3323}S_{23} - e_{133}E_1 \\
 &\quad - e_{233}E_2 - e_{333}E_3 ; \\
 T_{13} &= C_{1311}S_{11} + C_{1322}S_{22} + C_{1333}S_{33} + C_{1312}S_{12} + C_{1313}S_{13} + C_{1323}S_{23} - \\
 &\quad e_{113}E_1 - e_{213}E_2 - e_{313}E_3 ; \\
 T_{23} &= C_{2311}S_{11} + C_{2322}S_{22} + C_{2333}S_{33} + C_{2312}S_{12} + C_{2313}S_{13} + C_{2323}S_{23} - e_{123}E_1 \\
 &\quad - e_{223}E_2 - e_{323}E_3 ; \\
 T_{12} &= C_{1211}S_{11} + C_{1222}S_{22} + C_{1233}S_{33} + C_{1212}S_{12} + C_{1213}S_{13} + C_{1223}S_{23} - e_{112}E_1 \\
 &\quad - e_{212}E_2 - e_{312}E_3 ;
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Запишем компоненты матриц c и e , в этой повернутой системе координат.

$$\begin{aligned}
 &\left[\begin{array}{cccccc}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\
 C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & 0 & 0 \\
 C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 \\
 C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56} & C_{66}
 \end{array} \right] \\
 &\left[\begin{array}{cccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & e_{16} \\
 e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & 0 & 0 \\
 e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & 0 & 0
 \end{array} \right] \tag{1.9}
 \end{aligned}$$

Запишем те компоненты напряжения, которые возбуждаются компонентами поля E_2 и E_1 :

$$\begin{aligned} T_{11} &= C_{11}S_{11} + C_{12}S_{22} + C_{13}S_{33} + C_{14}S_{23} - e_{21}E_2 ; \\ T_{22} &= C_{21}S_{11} + C_{22}S_{22} + C_{23}S_{33} + C_{24}S_{23} - e_{22}E_2 ; \\ T_{33} &= C_{31}S_{11} + C_{32}S_{22} + C_{33}S_{33} + C_{34}S_{23} - e_{23}E_2 ; \\ T_{13} &= C_{56}S_{12} + C_{55}S_{13} - e_{15}E_1 ; \\ T_{23} &= C_{41}S_{11} + C_{42}S_{22} + C_{43}S_{33} + C_{44}S_{23} - e_{24}E_2 ; \\ T_{12} &= C_{66}S_{12} + C_{56}S_{13} - e_{16}E_1 ; \end{aligned}$$

Видно, что поперечная компонента поля E_1 порождает компоненты напряжения T_{13} , T_{12} , которые связаны с деформациями S_{12} , S_{13} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это поперечная волна, распространяющаяся вдоль оси X_2
2. $S_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, распространяющаяся вдоль оси X'_1
3. $S_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$ - это SH-волна, распространяющаяся вдоль оси X'_1
4. $S_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ - это SH-волна, распространяющаяся вдоль оси X'_3

Волна $S_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2}$ - это объемная поперечная волна, на которую настроен резонатор. Остальные волны паразитные.

Нормальная компонента поля E_2 порождают компоненты напряжения T_{11} , T_{22} , T_{33} , T_{23} , которые связаны с деформациями S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{23} . Посмотрим, каким волнам они соответствуют:

1. $S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_1
2. $S_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$ - это продольная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
3. $S_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3
4. $S_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3}$ - это поперечная объемная волна, бегущая вдоль оси X_2
5. $S_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2}$ - это волна Лэмба, бегущая вдоль оси X_3

Все эти волны – паразитные.

1.8 Выводы

Таким образом, анализ показал, что если в качестве полезной волны использовать продольную волну, то наиболее подходящими ориентациями пластины и поля являются следующие: (1) нормаль к пластине направлена вдоль оси X ,

поле направлено вдоль оси Y ; (2) нормаль к пластине направлена вдоль оси X , поле направлено вдоль оси Z . Для остальных рассмотренных ситуаций полезной волной является объемная поперечная волна.

2. Аналогичный анализ был проведен для пластин из кварца, окиси цинка и керамики ЦТС с различной ориентацией.

В ходе анализа паразитных акустических волн в пьезоэлектрических резонаторах с поперечным электрическим полем, по аналогии было проанализировано 3 материала для создания пьезоэлектрического резонатора с различной кристаллографической ориентацией поля.

Таким образом, анализ показал, что на основе кварцевой пластины можно разработать резонатор с поперечным электрическим полем для продольной объемной волны: (1) нормаль по оси Z , поле по оси X ; (2) нормаль по оси Y , поле по оси X . Для поперечной волны наиболее подходящими являются следующие ориентации: (1) нормаль по оси Z , поле по оси X ; (2) нормаль по оси Z , поле по оси Y ; (3) нормаль по оси X , поле по оси Y . Остальные волны - паразитные волны Лэмба.

Анализ показал, что на основе пластины из керамики ЦТС или окиси цинка, можно создавать резонаторы с поперечным электрическим полем на продольной волне (нормаль по оси X , поле по оси Z) и на поперечной волне (нормаль по оси Z , поле по оси X).

Заключение

Теоретически проанализированы все типы акустических волн, которые возбуждаются в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным электрическим полем на основе пластин ниобата лития, кварца, оксида цинка или керамики ЦТС с различной кристаллографической ориентацией. Показано, что помимо основной объемной моды, генерируемой поперечной компонентой электрического поля существует паразитные акустические волны, к которым относятся волны Лэмба и волны с поперечно-горизонтальной поляризацией. Отмечено, что эти волны распространяются вдоль поверхности пластины, переотражаются от ее боковых граней и ухудшают резонансные свойства резонатора. Для их подавления используется поглощающее покрытие, нанесенное на определенную часть резонатора. Отмечено также, что существуют паразитные объемные волны, которые возбуждаются нормальными компонентами электрического поля и распространяются вдоль нормали к поверхности пластины. Для подавления этих волн можно использовать пространственное разнесение источника ВЧ электрического поля и резонирующей пластины.

Список использованных источников

1. Leblois T.G., Tellier C.R. Design of new lateral field excitation langasite resonant sensors // Proc. of 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2672–2675.
2. McCann D.F., McCann J.M., Parks J.M., Frankel D.J., Pereira da Cunha M., Vetelino J.F. A lateral-field-excited LiTaO₃ high frequency bulk acoustic wave sensor // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Control. 2009. V. 56. P. 779–787.
3. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Шихабудинов А.М., Васильев А.А. Новый способ подавления паразитных мод в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным электрическим полем // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. С. 27–34.
4. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Ignatov O.V., Guliy O.I. Biological Sensor Based on a Lateral Electric Field Excited Resonator // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel., and Freq. Control. 2012. V. 59. P. 963–969.
5. B.D. Zaitsev, A.M. Shikhabudinov, I.A. Borodina, A.A. Teplykh, I.E. Kuznetsova, Composite Lateral Electric Field Excited Piezoelectric Resonator// Ultrasonics, 2017, vol. 73, pp.125-129.
6. Зайцев Б.Д. Акустические волны в твердых телах, Саратов, издательство Саратовского университета, 1997, 150С.
7. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1979, 639С.