

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОКРИСТАЛЛАХ ВИХРЕВЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

К.Н. Баранский, М.А. Зубарева, И.А. Яковлев

Рассмотрены условия поверхностного и объемного возбуждения и регистрации упругих колебаний в пьезокристаллах вихревым электрическим полем. Описаны впервые эксперименты по возбуждению и регистрации колебаний пьезокристаллов катушками индуктивности и указаны возможные применения этого метода.

Для возбуждения упругих колебаний в пьезокристаллах их обычно помещают в квазистационарное электрическое поле конденсатора, а на гиперзвуковых частотах в емкостный зазор коаксиального резонатора^{1, 2}. В пьезокристаллах, помещенных в электрическое поле, действуют, внутренние пьезоэлектрические силы соответственно с поверхностной и объемной плотностями³:

$$f_i^s = -e_{mij} E_m n_j; \quad f_i^v = -e_{mij} \partial E_m / \partial x_j, \quad (1)$$

где e_{mij} , E_m , n_j – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов, вектора электрического поля и единичного вектора внутренней нормали к поверхности. Для возбуждения упругих колебаний и волн с поляризацией \vec{p} необходимо обеспечить такое направление и конфигурацию поля внешних источников, чтобы проекции пьезосил на направление поляризации были отличны от нуля:

$$f_i^s p_i = e_{mij} p_i n_j E_m = b_m E_m \neq 0; \quad f_i^v p_i \neq 0. \quad (2)$$

В однородном поле действуют только поверхностные силы. Для оптимального поверхностного возбуждения пьезоактивной волны, пьезовектор которой $\mathbf{b} \neq 0$, распространяющейся в кристалл нормально к поверхности, необходимо, чтобы поле в кристалле у этой поверхности было направлено параллельно ее пьезовектору⁴. Распространение пьезоактивной акустической волны сопровождается связанной с ней волной электрического поля⁵, свойства которой зависят от ориентации ее пьезовектора относительно волновой нормали и определяют условия регистрации акустической волны. Волны, пьезовектор которых направлен по волновой нормали или составляет с ней острый угол, сопровождаются волной потенциального электрического поля с амплитудой пропорциональной проекции пьезовектора на волновую нормаль ($b_m n_m \neq 0$). Эти волны и связанные с ними собственные колебания пьезоэлектрических пластин по толщине требуют для своего возбуждения поля, направленного нормально или под острым углом к поверхности кристалла. Они возбуждаются и регистрируются в конденсаторе и используются в ультразвуке. Волны, пьезовектор которых перпендикулярен к волновой нормали ($b_m n_m = 0$), сопровождаются волной вихревого электрического поля и требуют для своего поверхностного возбуждения поля касательного к поверхности. В конденсаторе эти волны слабо возбуждаются лишь за счет краевых эффектов и поэтому практически не используются. Непьезоактивные упругие волны ($b_m = 0$) не возбуждаются с поверхности, но в неоднородном поле могут согласно (1) возбуждаться за счет объемных сил.

Неоднородное вихревое электрическое поле, вызванное переменным во времени потоком магнитной индукции, например, катушки индуктивности, может быть использовано для возбуждения в ряде пьезокристаллов как непьезоактивных упругих волн, так и пьезоактивных волн, невозбуждаемых в конденсаторе. Так в пьезокристаллах классов 32 (α -кварц), 422 (парателлурит) и 622 (β -кварц) с поверхности их Z -среза, перпендикулярной акустической оси OX_3 , для возбуждения вырожденных поперечных волн требуется поле касательное к поверхности, а продольные волны непьезоактивные и с поверхности не возбуждаются. Однако, если цилиндрический стержень Z -среза кварца поместить соосно в катушку индуктив-

ности так, чтобы ее магнитная индукция была направлена вдоль оси OX_3 кварца, то силовые линии вихревого электрического поля, имеющие вид окружностей, будут касательны к торцевым и боковым поверхностям цилиндра и в приближении однородной индукции $B_3 = B_0 \sin \omega t$ вихревое поле будет иметь составляющие:

$$E_1 = ax_2, E_2 = -ax_1, E_3 = 0, \quad (3)$$

где $a = (\omega B_0 / 2) \cos \omega t$, $x_1 = r \cos \varphi$, $x_2 = r \sin \varphi$, r — расстояние от оси цилиндра, φ — угол, отсчитываемый от оси OX_1 кварца. В этом поле на торцевых поверхностях должны действовать пьезосилы, направленные радиально и возрастающие с удалением от центров торцов:

$$f_1^s = e_{14} a r \cos \varphi, \quad f_2^s = e_{14} a r \sin \varphi, \quad f_3^s = 0. \quad (4)$$

Они должны вызывать неоднородные поперечные колебания. На боковую поверхность цилиндра кварца радиуса r_0 действуют пьезосилы:

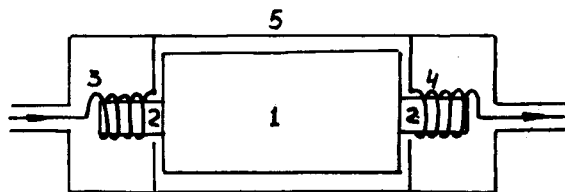
$$f_1^s = e_{11} a r_0 \sin 2\varphi, \quad f_2^s = e_{11} a r_0 \cos 2\varphi, \quad f_3^s = e_{14} a r_0, \quad (5)$$

которые должны вызывать сложную деформацию поперечного сечения кварца.

Кроме того вихревое поле неоднородное (3) и согласно (1) должно в объеме кварцевого цилиндра вызывать действие объемных пьезосил:

$$f_1^v = f_2^v = 0, \quad f_3^v = e_{14} \operatorname{rot}_3 \bar{E} = -e_{14} \dot{B}_3 = -e_{14} \omega B_0 \cos \omega t. \quad (6)$$

В короткой катушке индуктивности эти силы неоднородны и должны обеспечивать объемное возбуждение в кварцевом цилиндре продольных волн и связанных с ними собственных колебаний. Следует заметить, что все пьезосилы, вызванные вихревым полем растут с увеличением частоты.



Для выяснения возможности возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний в Z -срезе кварца катушками индуктивности использовался составной резонатор (рисунок). К торцам стеклянного цилиндра 1 длиной 62 мм и диаметром 40 мм приклеены салолом соосно цилиндры Z -среза кварца длиной и диаметром 10 мм — 2. На них надеты катушки по 100 витков провода 0,1 мм. Возбуждающая катушка 3 подключена к генератору непрерывных колебаний, а регистрирующая катушка 4 к осциллографу. При плавном изменении частоты генератора на осциллографе наблюдались резонансные максимумы на частотах 383, 386, 389 и 394 кГц, соответствующие собственным колебаниям составного резонатора. При напряжении генератора 40 В, резонансные максимумы были порядка нескольких милливольт и на порядок превышали ослабленный экраном 5 сигнал прямой индуктивной связи между катушками, величина которого не зависела от частоты. Использование тонких (0,3 мм) пластин Z -среза кварца позволило возбудить резонатор на частоте 14,435 МГц. Электромагнитное поле возбуждающей катушки кроме вихревого электрического поля имеет и потенциальное поле между катушкой и экраном и между витками катушки. Для выяснения их относительной роли в возбуждении колебаний были проведены контрольные опыты. При замене катушек электродами резонансы не наблюдались. При увеличении числа витков регистрирующей катушки амплитуда колебаний в максимумах увеличивалась, что соответствует

действию на нее вихревого поля, связанного с пьезоактивными упругими колебаниями, находящегося в ней цилиндра кварца. При замене кварцев стеклянными цилиндрами также колебания не наблюдались, что в данном случае исключает сколько-нибудь существенную роль действия пондеромоторных сил в неоднородном вихревом поле. Поэтому следует считать, что наблюдавшиеся в основном опыте собственные колебания составного резонатора возбуждены и зарегистрированы за счет вихревого электрического поля катушки индуктивности.

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний вихревым полем была также использована схема симметричного моста из двух катушек и двух сопротивлений. При внесении в одну из катушек пьезокристалла на частотах его собственных колебаний регистрировался сигнал нарушения баланса моста. Этим методом были возбуждены колебания в других срезах кварца, в германате висмута, ниобате лития и крутильные колебания стержня йодата лития. При этом спектры частот колебаний возбужденных в исследованных образцах кристаллов, существенно отличались от спектров колебаний этих образцов при помещении их в конденсатор, включенный в симметричный емкостный мост.

Возбуждение ультразвука в пьезокристаллах вихревым электрическим полем расширяет круг колебательных мод, которые могут использоваться в ультразвуке. Эффективность этого метода возбуждения должна расти с частотой. Метод может найти применение в акустооптических модуляторах и фильтрах, в которых используется коллинеарная дифракция света на ультразвуке.

Литература

1. Физическая акустика, М.: Мир, 1967, 1Б.
2. Баранский К.Н. ДАН СССР, 1957, 114, 517.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1962, II, ; М.: Наука, 1987, VII; М.: Наука, 1982, VIII.
4. Lamb J., Richter J. Proc. Roy. Soc., 1966, A293, 479.
5. Kyte J., J. Acoust. Soc. Amer., 1949, 21, 159.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
2 декабря 1987 г.