

РЕЗОНАТОР С УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОЗРАЧНОСТЬЮ ГРАНИЦ

© 2022 г. О. А. Савицкий*

АО «Акустический институт им. Академика Н.Н. Андреева», ул. Шверника 4, Москва, 117036 Россия

*e-mail: osav66@mail.ru

Поступила в редакцию 07.03.2022 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Рассматривается возможность управления акустической прозрачностью границ резонатора с использованием пьезоактивных материалов. Решена стационарная электроакустическая задача о колебаниях пьезоактивной структуры с граничными условиями специального вида в плосковолновом приближении. Рассмотрен переходной режим излучения резонатора с накачкой. Сформулированы предложения по применению резонаторов с управляемыми границами в гидроакустике и ультразвуковой эхоскопии.

Ключевые слова: акустический резонатор, уравнения пьезоэффекта, колебания пьезоактивной структуры, управление акустической прозрачностью

DOI: 10.31857/S0320791922040104

ВВЕДЕНИЕ

Во многих практических акустических задачах находят применение резонаторы в виде плоскопараллельных слоев волновых размеров. В качестве примеров можно упомянуть задачи, связанные с созданием мощных источников когерентного излучения, локальных областей с высокими интенсивностями ультразвука для реализации технологических процессов и т.д.

Резонаторы, как известно, представляют собой колебательные системы, предназначенные для создания и накопления энергии колебаний за счет резонанса при совпадении частоты вынуждающей силы с одной из собственных частот резонатора. Важнейшей характеристикой резонатора является его добротность

$$Q = \frac{\pi f_0}{\alpha}, \quad (1)$$

или связанная с ней величина – декремент затухания $\delta = \frac{\pi}{Q}$ [1]. В формуле (1) f_0 – собственная частота резонатора, α – временной коэффициент затухания амплитуды колебаний.

Основными факторами, препятствующими достижению больших плотностей энергии в резонаторе, т.е. снижающими добротность, являются внутренние потери акустической энергии в рабочем теле резонатора, а также потери, связанные с переизлучением акустической энергии через границы резонатора.

В твердотельном резонаторе в виде плоскопараллельного слоя, окруженного с обеих сторон жидкой или газообразной средой, амплитудный коэффициент временного затухания находится из дисперсионного уравнения и равен [2]

$$\alpha = \frac{\omega c'}{c} + \frac{c}{l} \ln \frac{1}{|R|}, \quad (2)$$

где ω – частота колебаний, c и c' – реальная и мнимая части скорости звуковых волн в материале резонатора, $|R|$ – модуль коэффициента отражения от границ резонатора, l – толщина резонатора. В (2) первое слагаемое представляет собой часть общего поглощения, связанную с превращением энергии колебаний в тепло в объеме резонатора, а второе – с переизлучением границ резонатора. При этом, как видно из (2), влияние второго фактора усиливается для резонаторов малых физических размеров l . Для резонаторов со свободными границами повышение их добротности связано с помещением в разреженные среды, однако при этом практически исключается возможность отвода тепла, выделяющегося за счет объемных потерь в материале резонатора, возникают технические проблемы при реализации крепления и т.д. Создание же твердотельных резонаторов высокой добротности с акустически жесткими границами для реальных материалов выглядит проблематичным. В приложениях важной может также оказаться возможность вывода накопленной в резонаторе колебательной энергии. Для резонаторов с акустически жесткими или мягкими границами это, очевидно, невоз-

где $T^{(1,2)}$, $\xi^{(1,2)}$ – комплексные амплитуды z -компонент тензора механических напряжений и смещений в первом ($0 < z < l_1$) и втором ($l_1 < z < l_2$) слоях пьезоэлектрика, соответственно; $E^{(1,2)} = -\frac{d\Phi}{dz}$ и $D^{(1,2)}$ – комплексные амплитуды z -компонент векторов напряженности и индукции электрического поля; ρ – плотность пьезосреды; ω – круговая частота. В (3) свойства пьезосреды описываются соответствующими компонентами электроупругой матрицы материала, где h_{33} – пьезоконстанта деформации; β_{33}^S – диэлектрическая непроницаемость; c_{33}^D – упругий модуль [6]. В (3) предполагается, что слои пьезоэлектрика имеют тождественные электроупругие матрицы и плотность.

Решение (3) удобно записывать в обезразмеренном виде, введя следующие обозначения: $a = \frac{l_2}{l_1}$; пространственная переменная $z_1 = \frac{z}{l_1}$; фазовая переменная $\varphi_1 = kl_1$; волновое число $k = \frac{\omega}{v_3^D}$; скорость продольных волн в пьезоэлектрике $v_3^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}}$; квадрат коэффициента электромеханической связи пьезоматериала $k_t^2 = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33}^S c_{33}^D}$; коэффициент электромеханической трансформации $N = \frac{h_{33} C_1^S}{S}$, где S – площадь поперечного сечения структуры, C_1^S – электрическая емкость между электродами в сечениях $z = 0$ и $z = l_1$.

Собственные частоты рассматриваемой электромеханической системы находятся из уравнения

$$\frac{\varphi_1}{k_t^2} = \frac{\sin \varphi_1 \cos \frac{\varphi_1(1-a)}{2}}{\cos \frac{\varphi_1(1+a)}{2}}. \quad (4)$$

Решение задачи (3) для полей T и ξ представляет собой кусочно-непрерывные на отрезке $[0, a]$ функции вида

$$T(z_1) = \frac{NU_1}{1 - k_t^2 \frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1} \frac{\sin[\varphi_1(1-a)]}{\sin(\varphi_1 a)}} \times \begin{cases} \frac{\sin[\varphi_1(1-a)]}{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)} \cos(\varphi_1 z_1) - 1, & 0 < z_1 < 1, \\ \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)} [\cos[\varphi_1(z_1 - a)] - 1], & 1 < z_1 < a, \end{cases} \quad (5)$$

$$\xi(z_1) = \frac{jNU_1}{z_p} \frac{z_p}{1 - k_t^2 \frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1} \frac{\sin[\varphi_1(1-a)]}{\sin(\varphi_1 a)}} \times \begin{cases} \frac{\sin[\varphi_1(1-a)] \sin(\varphi_1 z_1)}{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)} - 1, & 0 < z_1 < 1, \\ \frac{\sin \varphi_1 \sin[\varphi_1(z_1 - a)]}{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)}, & 1 < z_1 < a. \end{cases} \quad (6)$$

Найденные решения (5) и (6), с учетом симметрии, могут быть продолжены на весь отрезок $[-a, a]$, занимаемый резонатором.

В решение задачи также входят выражения для отношений возбуждающих напряжений U_1 , U_2 и токов I_1 , I_2 , протекающих через поперечные сечения $z = z_{1,2}$ ($0 < z_1 < l_1, l_1 < z_2 < l_2$) структуры, при условии непроницаемости ее внешних границ

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)}{a \sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)} \times \left(1 - k_t^2 \frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1} \frac{\sin(\varphi_1(1-a))}{\sin(\varphi_1 a)} \right), \quad (7)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 a)}{\sin \varphi_1}. \quad (8)$$

Отношение токов возбуждения I_{e1} , I_{e2} электродов $z = \pm l_1$ и $z = \pm l_2$ определяется из выражения

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sin(\varphi_1 a)}{\sin \varphi_1}. \quad (9)$$

Рассчитанные по формулам (5), (6) нормированные распределения амплитуд механических напряжений и скоростей смещений в рассматриваемой электромеханической системе на трех первых модах колебаний приведены на рис. 2а и 2б, соответственно. Расчеты выполнены для значений параметров системы $a = 1.6$ и пьезоэлектрика $k_t^2 = 0.42$.

Как видно из рис. 2, на границах исследуемой структуры условие акустической непроницаемости третьего типа левой и правой границ колебательной системы выполняется.

Накопленная в системе энергия может быть высвобождена после отключения электрического поля, обеспечивающего непроницаемость ее границ.

3. ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Полученные результаты для установившихся колебаний рассматриваемой электромеханической системы могут быть использованы для расчета формы волн, переизлучаемых во внешнюю

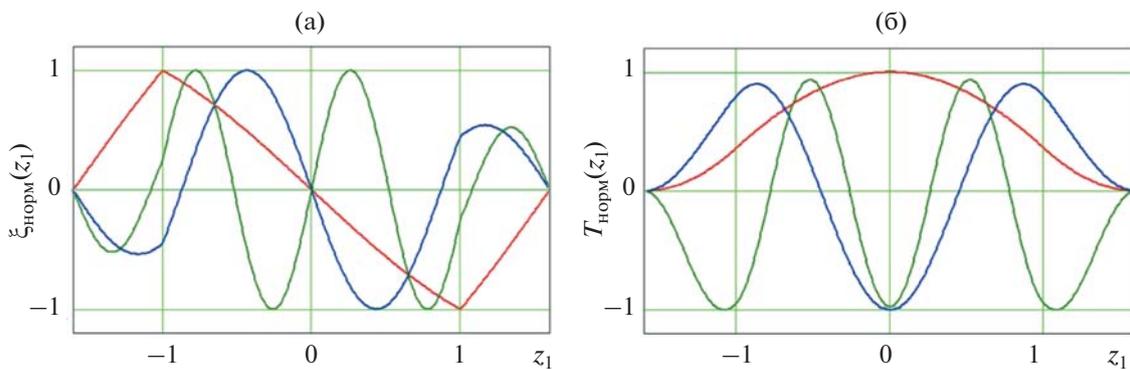


Рис. 2. Амплитуды (а) – колебательной скорости и (б) – механических напряжений на трех низших модах системы.

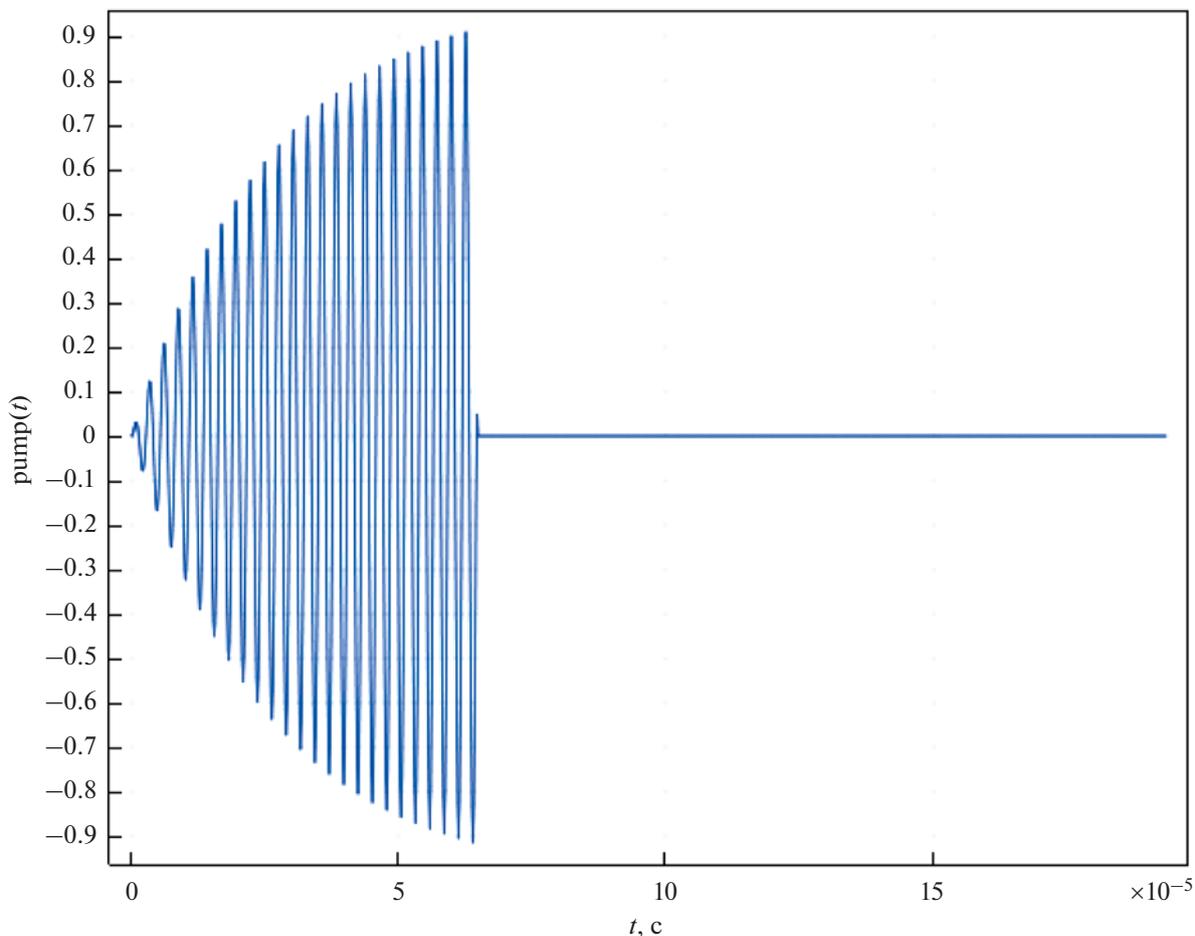


Рис. 3. Форма импульса возбуждения колебаний в пьезоэлектрической структуре.

среду после выключения электрического поля. В простейшем случае, когда импедансы пьезоэлектрика структуры и окружающей среды равны ($z_p = z_0$), форма профиля прямой $T_r(\zeta)$ и обратной $T_l(\eta)$ волн может быть легко определена по формулам

$$T_r(\zeta) = T(\zeta) \cos(\omega t_0) + z_p \dot{\xi}(\eta) \sin(\omega t_0), \quad (10)$$

$$T_l(\eta) = T(\eta) \cos(\omega t_0) - z_p \dot{\xi}(\eta) \sin(\omega t_0), \quad (11)$$

где $\zeta = t - \frac{z}{v_3^D}$, $\eta = t + \frac{z}{v_3^D}$, t_0 – момент выключения электрического поля.

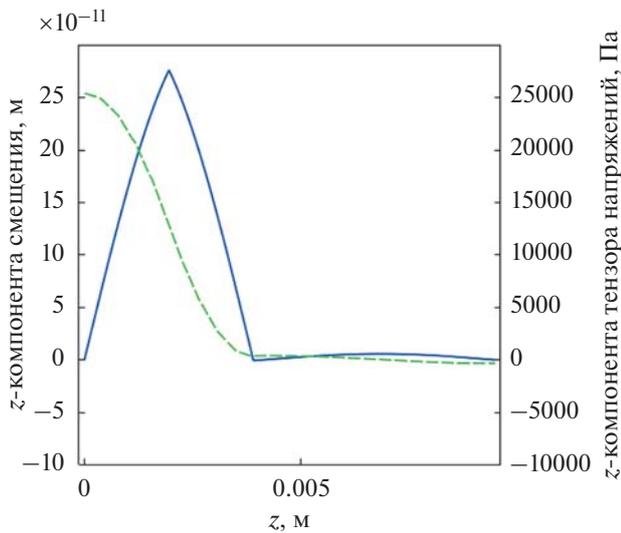


Рис. 4. z -компоненты механических смещений (сплошная линия) и тензора напряжений (пунктир) в момент перед выключением электрического поля. Электроды расположены в сечениях $z = 1.95$ мм и $z = 2.90$ мм.

Как следует из (10) и (11), форма профиля волн, излучаемых из области резонатора после “открытия” его границ, зависит от возбуждаемой моды и момента выключения возбуждающего колебания электрического поля.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нестационарные режимы работы пьезорезонатора с управляемой прозрачностью границ исследовались методами конечно-элементного анализа в среде Comsol multiphysics в одномерной постановке. Резонатор представлял собой равнотолщинную четырехслойную структуру ($a = 2$) из пьезокерамики PZT-5A с толщиной слоя 1.95 мм. Ось z нормальна к границам структуры. Левое и правое полупространства заполнялись средой, механические свойства которой совпадают со свойствами пьезокерамики PZT-5A. Таким образом, в отсутствие на электродах структуры электрических напряжений, среда представляет собой однородное упругое пространство. Гармонические колебания возбуждались подачей на электроды ($z = 1.95$ мм, $z = 2.90$ мм) импульсного сигнала с гармоническим заполнением частоты $f_0 = 372$ кГц и плавно нарастающей амплитудой (рис. 3).

Длительность импульса составляла $N = 24$ полных периода несущей частоты. После достижения амплитуд возбуждающих электрических напряжений на электродах $U_1 = 1$ В и $U_2 = 4.85$ В, соответственно, электрическое поле выключалось. Точка наблюдения располагалась в правом

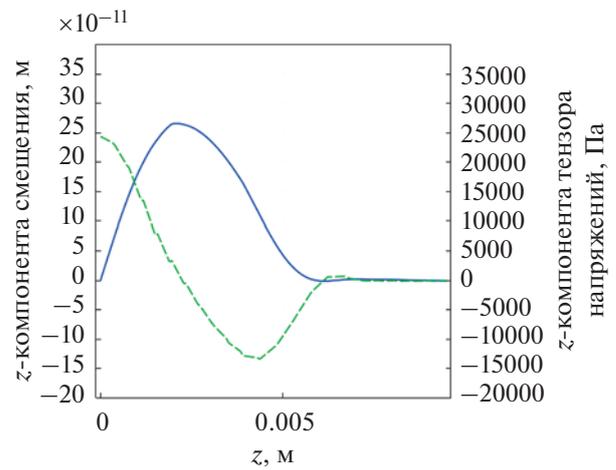


Рис. 5. z -компоненты механических смещений (сплошная линия) и тензора напряжений (пунктир) в момент после выключения электрического поля. Поле выключается при $t_0 = N/f_0$. Электроды расположены в сечениях $z = 1.95$ мм и $z = 2.90$ мм.

полупространстве на расстоянии $z = 10$ мм от начала координат.

На рис. 4 представлены пространственные распределения z -компоненты механических смещений и тензора напряжений в момент перед выключением электрического поля, когда они достигли наибольшей амплитуды. Видно, что за пределами резонатора амплитуда колебаний существенно меньше, чем внутри структуры.

В момент выключения поля граница резонатора $z = 2.90$ мм становится прозрачной, и накоп-

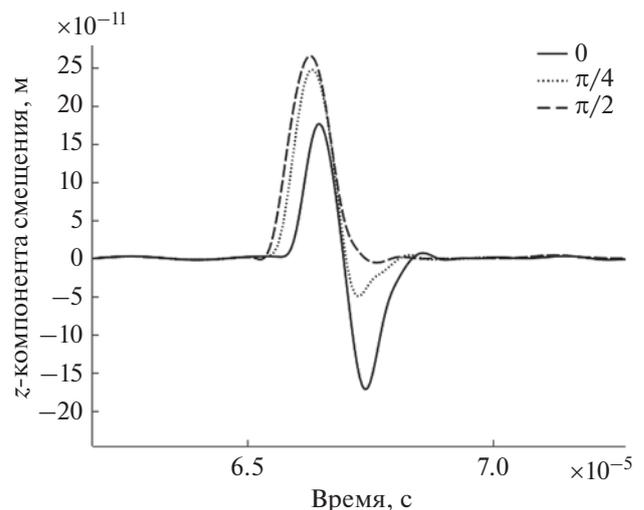


Рис. 6. z -компонента механических смещений в точке наблюдения при различных значениях фазы колебаний в резонаторе в момент выключения поля.

ленная колебательная энергия переизлучается в окружающее пространство в виде короткого акустического импульса (рис. 5).

Как указывалось выше (10), (11), форма акустического импульса, переизлучаемого структурой, зависит от фазы колебаний в момент выключения. На рис. 6 представлены формы волны смещений (z -компоненты) в точке наблюдения при различных значениях фазы колебаний ωt_0 в момент выключения поля.

Как следует из рис. 6, подбирая момент выключения электрического поля, можно управлять формой излучаемого акустического импульса от однополярной обеих знаков до двуполярной, в виде одного периода колебания, близкого к синусоидальному.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность управления акустической прозрачностью границ в пьезоэлектриках с использованием электрического поля. Электро-механические системы, подобные рассмотренной, могут быть использованы для создания источников мощных коротких акустических импульсов, а электрическое поле в них играет роль своеобразной накачки системы колебательной

энергией. Рассмотренная задача может рассматриваться как один из подходов к созданию акустических лазеров.

Автор выражает благодарность М.А. Миронову за полезные рекомендации и обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горелик Г.С.* Колебания и волны: Введение в акустику, радиофизику и оптику: Учебное пособие. Физматгиз, 1959.
2. *Исакович М.А.* Общая акустика. Учебное пособие. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973.
3. *Грищенко Е.К.* Акустический аналог электрооптического затвора // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 5. С. 827–828.
4. *Грищенко Е.К.* Пьезоэлектрический поглотитель ультразвука пластинчатого типа // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 4. С. 486–488.
5. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Демпфирование пьезопластины и использование электрической цепи на ее входе для получения короткого акустического импульса // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 6. С. 829–332.
6. Пьезокерамические преобразователи. Методы измерения и расчета параметров. Справочник / Под ред. Пугачева С.И. 1984.