

08;12

Ультразвуковые пьезокерамические преобразователи с магнитоакустическим слоем

© М.М. Карпук, Д.А. Костюк, Ю.А. Кузавко, В.Г. Шавров

Koszalin Technical University,
Kwiatkowskiego ave. 6-E, 75-343, Koszalin, Polska
Брестский государственный технический университет,
224017, Брест, Московская-267, Беларусь
Институт радиотехники и электроники РАН,
103907, Москва, Моховая-11/7, Россия
E-mail: kuzavko@newmail.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2004 г.

Предложен и рассчитан ультразвуковой преобразователь, содержащий пластину пьезоэлектрика, механически соединенную со слоем магнитоакустического материала (МAM), с сильными зависимостями скоростей поперечной и продольной волн от магнитного поля. В результате возникают возможности управления их резонансной частотой и полосой частот при использовании низкодобротной пьезокерамики, а также реализация перестраиваемого эталона частоты при применении высокочастотных пьезоэлектриков.

Введение. Электромеханические преобразователи преобразуют электрическую энергию в механическую и наоборот. На средних частотах ($1 \div 100$ МГц) эффективно используются пьезоэлектрические преобразователи (УЗП) как для излучения, так и для приема акустических волн. Использование низкодобротной пьезокерамики РКЗ-1 ($Q \approx 60$) позволяет реализовать короткие, а при использовании дополнительных согласующих и демпфирующих слоев — сверхкороткие ультразвуковые импульсы (продолжительностью $\tau = QT$, где T — период колебаний), необходимые при проведении ультразвукового контроля и медицинской эхотомоскопии. С другой стороны, высокая добротность ($Q > 10^5$) пьезокристаллов как электромеханических резонаторов позволяет использовать их в качестве стабилизаторов частоты электрических колебаний в генераторах радиоэлектронных приборов. Большую ценность при проведении ультразвуковых измерений приобрела бы возможность плавной перестройки резонансных частот излучения и приема [1].

В данной работе рассматривается УЗП, у которого существенным топологическим элементом является наличие дополнительного слоя из МАМ, контактирующего со слоем пьезоэлектрика. Под МАМ понимаем материал с сильной зависимостью скоростей продольной и поперечной волны от магнитного поля \mathbf{H} . Так, для антиферромагнитного гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ экспериментально установлено вблизи его ориентационного фазового перехода (ОФП) по магнитному полю уменьшение скорости продольной волны до 10%, а поперечной волны — до 50% [2]. При этом ОФП осуществляется в диапазоне полей $0 < H < 2000$ Ое, легко достигаемых с помощью постоянных магнитов.

Выражения для скоростей поперечной и продольной магнитоакустических волн (МАВ) с учетом магнитоупругого взаимодействия связи имеют вид [3]:

$$\tilde{S}_t = S_t(1 - \xi)^{1/2}, \quad \tilde{S}_l = S_l(1 - t \cdot \xi)^{1/2}, \quad (1)$$

где $t = S_t^2/S_l^2$, $\xi = 2 \cdot H_E \cdot H_{me} / [2 \cdot H_E \cdot H_{me} + H \cdot (H + H_0)]$ — параметр магнитоупругой связи, H — магнитное поле, H_E , H_0 , H_{me} — соответственно эффективные поля обмена, Дзялошинского и магнито-стрикции [3]. Так как скорости упругих волн в МАМ зависят от величины поля, то при акустическом контакте с пьезоэлектрическим слоем резонансная частота такого слоистого преобразователя также начинает зависеть от поля. Таким образом, существует возможность перестраивать акустоэлектронные параметры преобразователя, т.е. его резонансную частоту, полосу частот, амплитудно-частотную, фазочастотную характеристики и т.д.

1. Ультразвуковой пьезокерамический преобразователь. Для расчетов характеристик УЗП с МАМ использовался метод эквивалентной электрической цепи [4], учитывающей нагружение со стороны исследуемой среды (рис. 1). В рассматриваемом случае электрический импеданс запишется следующим образом:

$$Z_e = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_0} \times \left[1 - \frac{K^2}{\beta_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta_1 - \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \operatorname{tg} 2\beta_2 + i \cdot \left(\frac{Z}{Z_2} \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \beta_2 - \frac{Z_0}{2Z_1} \right)}{1 + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \operatorname{ctg} 2\beta_1 \cdot \operatorname{tg} 2\beta_2 + i \cdot \left(\frac{Z}{Z_2} \cdot \operatorname{tg} 2\beta_2 - \frac{Z}{Z_1} \cdot \operatorname{ctg} 2\beta_1 \right)} \right], \quad (2)$$

где $\beta_1 = k_1 \cdot d_1/2$, $\beta_2 = k_2 \cdot d_2/2$, k — волновое число, ω — циклическая частота, C_0 — емкость преобразователя, K — постоянная электромеханической связи, Z — акустический импеданс.

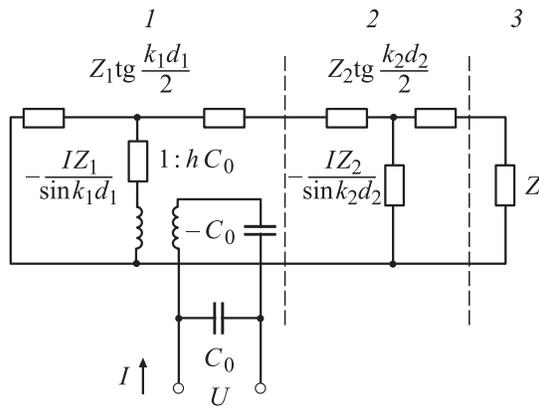


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема УЗП с МММ, нагруженного на исследуемую среду. h — коэффициент преобразования. I — пьезоэлемент, 2 — МММ-подложка, 3 — исследуемый объект (нагрузка).

Минимум $\text{Im } z_e$ определяет электрический резонанс УЗП (излучение), а максимум — механический резонанс УЗП (прием). В выражении величины $Z_2 = \rho_2 \cdot S_2(H)$ и $\beta_2 = \omega \cdot d_2 / (2S_2(H))$ оказываются зависящими от поля, и то же самое распространяется на Z_e и резонансные частоты. Численные расчеты выполнялись средствами программного пакета Matlab для продольных волн в структуре LiNbO_3 36°, Y-срезы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 32°, X-срезы и для поперечных волн в структуре LiNbO_3 36°, X-срезы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 32°, X-срезы в частотном диапазоне 1–10 МГц. При этом частота механического резонанса пьезоэлемента выбиралась 5 МГц, что соответствовало толщине пьезоэлектрического слоя $d_{1l} = 0.74$ мм, $d_{1t} = 0.48$ мм соответственно при рассмотрении продольной и поперечной волн. Толщина пластинки МММ, удовлетворяющая также условию полуволнового резонанса на этой же частоте, составляла соответственно $d_{2l} = 0.68$ мм и $d_{2t} = 0.42$ мм при $H = \infty$. На рис. 2 представлены частотные зависимости импеданса $|Z_e|$, исходя из которых могут быть оценены все выше указанные акустоэлектронные параметры УЗП с МММ. Откуда видно, что с приближением к точке ОФП ($H = 0$) происходит заметное смещение частоты резонанса УЗП с возникновением новых резонансов. Разработанное программное обеспечение позволяло вычислить все вышеуказанные акустоэлектронные параметры преобразователя.

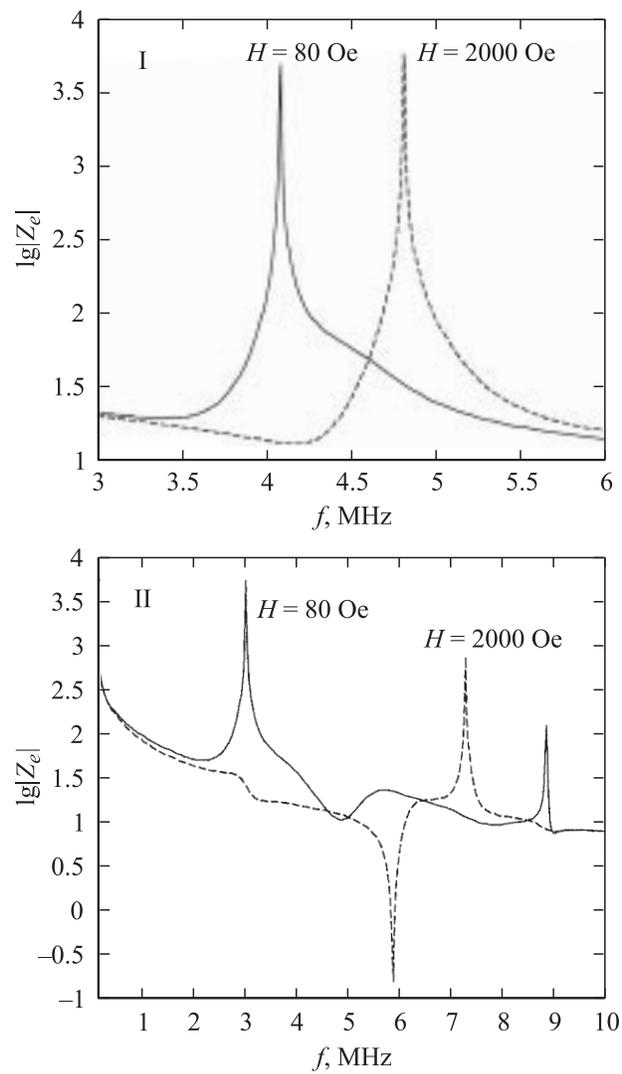


Рис. 2. Зависимость электрического импеданса $|Z_e|$ УЗП с ММ от частоты при различных значениях внешнего магнитного поля H . I — продольные волны, II — поперечные волны.

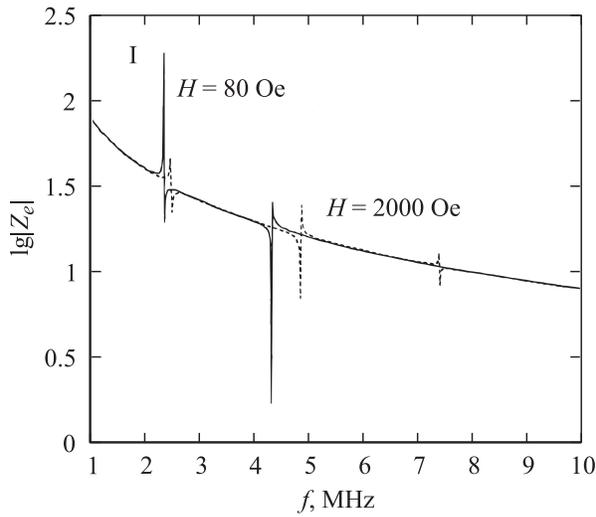


Рис. 3. Зависимость электрического импеданса $|Z_e|$ стабилизатора от частоты при различных значениях внешнего магнитного поля H (продольные волны).

2. Стабилизатор частоты. Если в выражении (2) величину акустического сопротивления Z положить равной нулю, то УЗП с МАМ будет представлять собой ненагруженный преобразователь. Высокая добротность $Q \geq 10^5$ кварцевых преобразователей как электромеханических резонаторов позволяет использовать их в качестве стабилизаторов частоты электрических сигналов в генераторах. Уход их резонансной частоты под действием внешних факторов — температуры, давления и т.д. от требуемого значения можно компенсировать изменением магнитного поля. Таким образом, предложенная схема УЗП с МАМ позволяет восстановить частоту внешним магнитным полем.

Выражение (2) получено в предположении, что поглощение звука в материалах преобразователя пренебрежимо мало. Для учета поглощения ультразвука в пьезоэлектрике и МАМ можно формально выполнить подстановки $k_1 \rightarrow k'_1 + ik''_1$, $k_2 \rightarrow k'_2 + ik''_2$ ($Q_1 = \pi k'_1/k''_1$), $Q_2 = \pi k'_2/k''_2$) в выражение для электрического импеданса составного преобразователя. Коэффициент поглощения ультразвука в МАМ определяется согласно соотношению $\alpha = k''_2/k'_1 = \alpha_0(1 - a\xi)^{-1/2}$ [3], где $a = 1$ и $a = t$ соответственно для поперечной и продольной волн.

На рис. 3 представлены результаты расчета частотной зависимости Z_e для преобразователя кварц-гематит при различных значениях магнитного поля H . С приближением к точке ОФП количество резонансов возрастает вследствие существования зависимости $\beta_2 = \frac{\omega d_2}{2s_2(H)}$, т.е. когда фазовая толщина пластинки МАМ возрастает. Таким образом, присоединением к пьезоэлементу высокодобротной пластинки МАМ, находящейся в магнитном поле, можно добиться управления резонансной частотой преобразователя, его полосой частот и другими акустоэлектронными параметрами.

3. Эксперимент. Предложенные УЗП с МАМ-слоем использовались в качестве излучателей для медицинского эхотомоскопа [5]. Отметим, что в задачах ультразвуковой томографии используются преимущественно продольные волны, для которых зависимость скорости в МАМ от поля существенно слабее [6]. Тем не менее и здесь

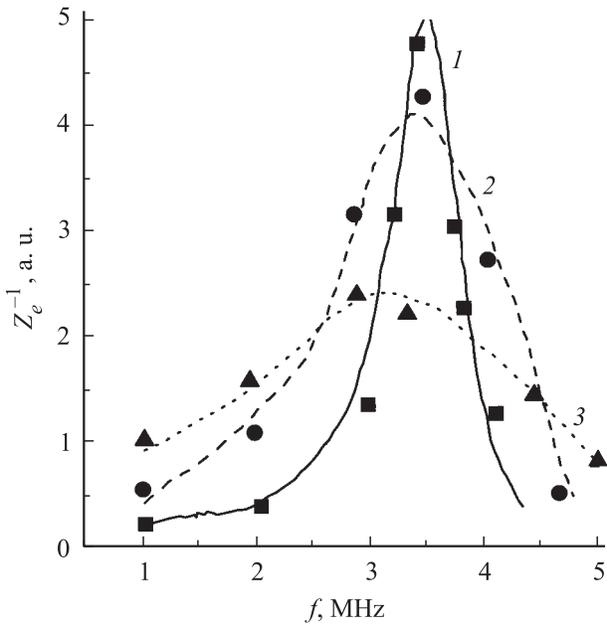


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя продольных волн, нагруженного на воду. 1 — $H = 2000$ Ое, 2 — $H = 500$ Ое, 3 — $H = 100$ Ое.

внешнее магнитное поле позволяет в широких пределах управлять характеристиками преобразователя [7]. На рис. 4 представлены АЧХ преобразователя в режиме приема для разных значений магнитного поля, которое позволило управлять резонансной частотой приема разработанного нами преобразователя до 20%, а его добротностью (и соответственно рабочей полосой частот) — до 70%.

Заключение. Расчет преобразователя может быть также выполнен на основании уравнений теории упругости и электростатики с учетом граничных условий [3]. Однако этот метод является громоздким, сложным при учете в составе преобразователя дополнительных слоев, так как требует решения системы всех граничных условий. Используемый нами метод эквивалентных цепей является более наглядным и эффективным, позволяющим автоматизировать расчет электрического импеданса и других акустоэлектронных характеристик многослойного преобразователя с использованием программной среды Matlab. Предложенное здесь программное обеспечение позволяет определять акустоэлектронные характеристики как преобразователей, так и стабилизаторов частоты для произвольных пьезоэлектриков, магнитоакустических материалов и исследуемых сред, а при необходимости может быть легко адаптировано для более сложных многослойных структур.

Авторы благодарны Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований и Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты Ф04Р-080, 04-02-81058, 03-02-174443) за финансовую поддержку выполненных исследований.

Список литературы

- [1] Балакирев М.К., Гилинский И.А. Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. 240 с.
- [2] Андриющак Е.А., Евтихийев Н.Н., Погожев С.А., Преображенский В.Л. // Акустический журнал. 1981. Т. 27. № 2. С. 170–178.
- [3] Туров Е.А., Шавров В.Г. // УФН. 1983. Т. 140. № 3. С. 429–462.
- [4] Кайно Г. Акустические волны. М.: Мир, 1990. 656 с.
- [5] Kuzavko Yu.A., Golovko V.V., Roth H. // Proceedings of Workshop on Design methodologies for signal processing. Zakopane, Poland, 1996. P. 131–135.
- [6] Кузавко Ю.А., Шавров В.Г. // Акустический журнал. 1993. Т. 39. № 6. С. 1088–1092.
- [7] Karpuik M.M., Kuzavko Yu.A. // Digests of 7th International conference on intermolecular and magnetic interactions in matter. Miedzyzdroje, Poland, 2003.