

07;08;09

## О влиянии непараллельности поверхностей пьезослоя на полосу частот электроакустического пьезопреобразователя

© В.В. Петров, С.А. Лапин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410071 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 19 мая 1997 г.)

Теоретически проанализирован вопрос о влиянии непараллельности поверхностей пьезопреобразователя на его импеданс и полосу частот. Принятая для анализа модель клиновидного пьезослоя представляет собой совокупность из  $n$  плоскопараллельных элементов, расположенных последовательно вдоль длины преобразователя со ступенчатым увеличением толщины пьезослоя. В результате проведенного анализа показана возможность значительного увеличения полосы рабочих частот пьезопреобразователя при уменьшении эффективности электроакустического преобразования. В ряде случаев, однако, уменьшение эффективности преобразования может быть применено для оптимизации акустического устройства, например при реализации пьезопреобразователя фильтрового типа, где электромагнитная энергия преобразуется в акустическую последовательно от одной ячейки фильтра к другой. Предложенный метод расширения полосы частот может быть полезен, например, при создании высокочастотных акустооптических брэгговских ячеек.

В работе [1] обсуждался метод расширения полосы частот брэгговских акустооптических (АО) ячеек посредством использования многоэлементного преобразователя с переменными параметрами: шагом решетки, длиной электродов, толщиной пьезоэлектрического слоя. В работе описана полученная частотная зависимость шага многоэлементной структуры, требуемая для "точной" автоподстройки звукового пучка под угол Брэгга в заданной полосе частот. При таком подходе снимается ограничение на длину АО взаимодействия, что предполагает возможность значительного увеличения дифракционной эффективности. Для согласования полосы частот пьезопреобразователя с полосой АО взаимодействия было предложено с изменением вдоль длины преобразователя шага структуры менять также толщину пьезослоя. При этом область максимально эффективного преобразования пьезоэлектрика соответствует области решетки, обеспечивающей возбуждение акустического пучка в направлении, соответствующем условию Брэгга. В настоящей работе рассматривается влияние непараллельности плоских граней преобразователя на полосу его рабочих частот.

На рис. 1 показана анализируемая модель клиновидного преобразователя, состоящего из пьезоэлектрического слоя 1, заключенного между металлическими электродами конечной толщины — надслоем 2, имеющем толщину

$p$ , и подслоем 3 толщиной  $g$ , находящемся в акустическом контакте с изотропным звукопроводом 4. Предполагается, что длина преобразователя  $L$  и его ширина  $b$  (в направлении, перпендикулярном клиновидному сечению; на рисунке не показана), значительно превышают его толщину  $h$ , так что модель можно считать одномерной, т.е. учитывать лишь одну составляющую электрического поля  $E$ , направленную перпендикулярно поверхности кристалла. Такое предположение позволяет также рассматривать клиновидный преобразователь как совокупность  $n$  плоскопараллельных элементов, расположенных последовательно вдоль длины  $L$ , со ступенчатым увеличением толщины пьезослоя от минимального значения  $h_1$ , до максимального  $h_2$ , и включенных электрически параллельно. Импеданс  $Z$  такого преобразователя может быть найден как обратная величина суммы комплексных проводимостей  $Y_i$  всех  $n$  элементов

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Y_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i + jX_i}} = R + jX, \quad (1)$$

здесь  $R$  и  $X$  — активная и реактивная составляющие импеданса преобразователя,  $Z_i$  — комплексный импеданс  $i$ -го элемента.

В работе [2] рассмотрен вопрос о нахождении импеданса излучения плоскопараллельного преобразователя. Частотные свойства преобразователя в основном определяются активной составляющей импеданса преобразования. Следуя результатам работы [2], запишем выражение для безразмерного активного сопротивления излучения  $R/X$  для  $i$ -го элемента

$$\frac{R_i}{X_i} = \frac{4k^2}{\beta h_i} F_{ai}, \quad (2)$$

где  $\beta = (2\pi f/\nu_2)$  — постоянная распространения в пьезоэлектрике,  $f$  — частота,  $\nu_2$  — скорость звука в

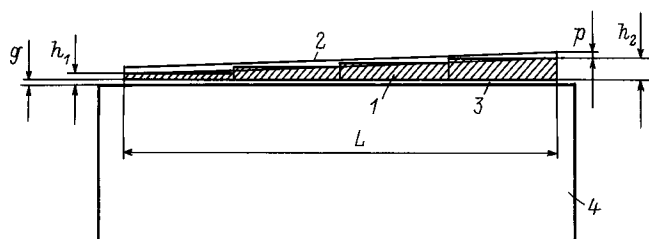


Рис. 1. Геометрия клиновидного преобразователя.

пьезоэлектрике,  $k$  — коэффициент электромеханической связи, функция  $F_{ai}$  определяется соотношением

$$F_{ai} = \frac{\sin^2\left(\frac{\beta h_i}{2}\right) \left[ \sin\left(\frac{\beta h_i}{2}\right) \cos(a_i \beta h_i) + \frac{Z_{01}}{Z_{02}} \sin(a_i \beta h_i) \cos\left(\frac{\beta h_i}{2}\right) \right]^2}{(Z_{02}/Z_{04})M_i^2 + (Z_{04}/Z_{02})N_i^2}, \quad (3)$$

где

$$M_i = (Z_{03}/Z_{02})A_i \sin(b_i \beta h_i) + B_i \cos(b_i \beta h_i),$$

$$N_i = A_i \cos(b_i \beta h_i) - (Z_{02}/Z_{03})B_i \sin(b_i \beta h_i),$$

$$A_i = \cos(\beta h_i) \cos(a_i \beta h_i) - (Z_{01}/Z_{02}) \sin(\beta h_i) \sin(a_i \beta h_i),$$

$$a_i = (\nu_2/\nu_1)(p/h_i),$$

$$B_i = \sin(\beta h_i) \cos(a_i \beta h_i) + (Z_{01}/Z_{02}) \cos(\beta h_i) \sin(a_i \beta h_i),$$

$$b_i = (\nu_2/\nu_3)(g/h_i),$$

$h_i$  — толщина  $i$ -го элемента;  $\nu_1, \nu_3$  — скорости звука, в надслое и подслое;  $Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, Z_{04}$  — акустические волновые сопротивления надслоя, пьезоэлектрика, подслоя и звукопровода.

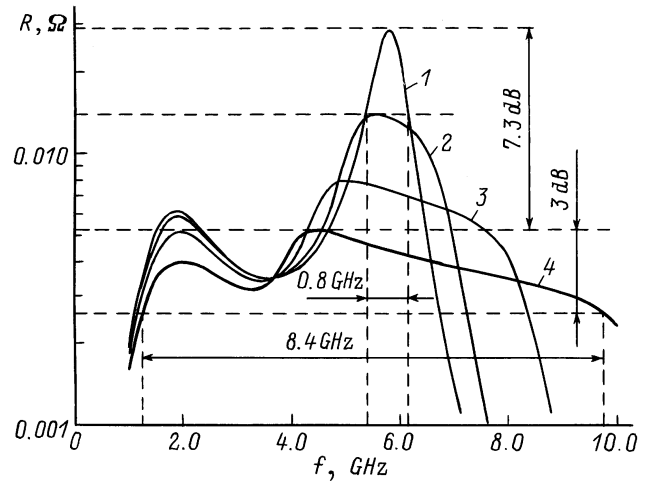
Реактивная составляющая импеданса преобразователя в основном определяется его емкостным сопротивлением:  $X_i = 1/(\omega C_i)$ , где  $\omega$  — круговая частота,  $C_i$  — электрическая емкость  $i$ -го элемента;  $C_i = \varepsilon_0 \varepsilon_r S_i / h_i$ , где  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_r$  — диэлектрические проницаемости, абсолютная для вакуума и относительная для пьезоэлектрика,  $S_i = bL/n$  — площадь  $i$ -го элемента преобразователя. Таким образом, выражение для активного сопротивления излучения  $i$ -го элемента преобразователя может быть записано в виде

$$R_i = \frac{4k^2 \nu_2 n h_i}{\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r b L} F_{ai}. \quad (4)$$

Используя формулы (1)–(4) можно рассчитать зависимость активной составляющей импеданса преобразователя  $R$  от частоты  $f$ .

На рис. 2 показаны зависимости  $R(f)$ , вычисленные для клиновидного (ступенчатого) преобразователя из ZnO с надслоем и подслоем из Al на кристалле  $Y_3Al_5O_{12}$  при разных значениях отношения  $h_1/h_2$ . Кривые 1–4 соответствуют отношениям  $h_1/h_2 = 1, 0.66, 0.43, 0.25$ . Отношения толщин надслоя и подслоя к толщине пьезоэлектрика выбраны соответственно  $p/h = 0.2, g/h = 0.2$ . При расчетах использовались следующие физические константы для ZnO,  $Y_3Al_5O_{12}$  и Al соответственно: скорость звука ( $10^3$  м/с) 6.1, 8.6, 6.32; акустические волновые сопротивления ( $10^6$  кг/м<sup>2</sup> · с) 34.4, 39.2, 17.1; диэлектрическая проницаемость и коэффициент электромеханической связи ZnO 8.84 и 0.28.

Приведенные зависимости демонстрируют возможность значительного расширения полосы частот пьезо-преобразователя использованием клиновидного (ступенчатого) пьезослоя. Так, сопоставление кривых 1 и 4 показывает, что при отношении толщин пьезоэлектрика



**Рис. 2.** Частотная зависимость сопротивления излучения для нескольких значений перепада толщин клиновидного преобразователя:  $h_1 = 0.5$  (1), 0.4 (2), 0.3 (3),  $0.2 \mu\text{m}$  (4);  $h_2 = 0.5$  (1), 0.6 (2), 0.7 (3),  $0.8 \mu\text{m}$  (4).

в начале и в конце преобразователя  $h_1/h_2 = 0.25$ , полоса частот по уровню 3 дБ, увеличивается с 0.8 до 8.4 ГГц, т.е. примерно в десять раз. Расширение полосы ведет к уменьшению сопротивления излучения, характеризующего эффективность преобразования. Однако в ряде случаев это обстоятельство может быть использовано для оптимизации акустического устройства. В частности, в задаче, обсуждаемой в работе [1], для расширения полосы частот акустооптического брэгговского дефлектора используется многоэлементный преобразователь фильтрового типа с переменными параметрами. В таком преобразователе трансформация электромагнитной энергии в акустическую происходит последовательно — от элемента к элементу. При этом для достижения наибольшей дифракционной эффективности требуется реализовать оптимальный коэффициент преобразования одной ячейки, который, как правило, отличается от своего максимального значения [3] и должен быть искусственно снижен.

Предложенный метод расширения полосы частот может быть использован при разработке высокочастотных акустооптических дефлекторов или для создания широкополосных (для приведенного расчета около 8 ГГц) линий задержки, а также других устройств обработки информации.

## Список литературы

- [1] Петров В.В. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 22. С. 11–15.
- [2] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // РиЭ. 1990. Т. 35. № 9. С. 1977–1987.
- [3] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 8. С. 732–741.