

08

Селекция мод пьезоэлектрического слоя в составном акустическом резонаторе на объемных акустических волнах

© Г.Д. Мансфельд

Институт радиотехники и электроники РАН

Поступило в Редакцию 18 апреля 1997 г.

Рассмотрен вопрос о селекции мод тонкого пьезоэлектрического слоя в составном слоистом акустическом резонаторе на объемных акустических волнах за счет трансформации импеданса с помощью набора четвертьволновых слоев. В зависимости от числа слоев возможно как резкое повышение, так и резкое уменьшение импеданса подложки, на которую наносится пьезоэлектрический слой. Таким образом достигается имитация "закрепленной" или "свободной" поверхности. В результате реализуется механически прочная резонаторная структура, работающая на собственных частотах тонкого пьезоэлектрического слоя. Проведено численное моделирование многослойных структур на основе чередующихся четвертьволновых слоев LiNbO_3 и LiTaO_3 . Показано, что при микронных толщинах слоев и достаточно большом их числе акустические свойства подложки не влияют на частотные характеристики и добротность колеблющегося тонкого пьезоэлектрического слоя в СВЧ диапазоне.

Альтернативной традиционным резонаторным элементам [1] (устройства на ПАВ, мембранные резонаторы) при работе в СВЧ диапазоне могут служить одночастотные резонаторы на ОАВ, работающие на собственных частотах тонких пьезоэлектрических пленок на механически прочных подложках. Возможность их создания открывает использование хорошо известной идеи трансформации импеданса подложки на границу с преобразователем с помощью четвертьволновых слоев [2], что позволяет имитировать соответственно механически "свободную" или "закрепленную" границу преобразователя с подложкой. При этом, благодаря возможности практически полной акустической изоляции слоя от подложки, требования к ней снижаются — необходимо создание лишь одной совершенно плоской поверхности, на которую наносится структура, проблемы обеспечения параллельности и контроля толщины подложки отпадают.

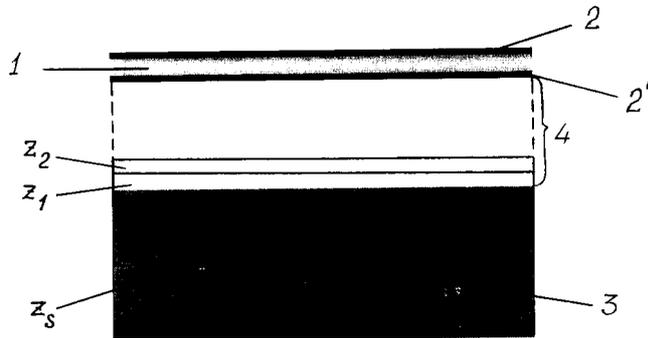


Рис. 1. Структура составного многослойного акустического резонатора.

В работе анализируются параметры многослойных резонаторных структур СВЧ диапазона на основе монокристаллических слоев LiNbO_3 и LiTaO_3 , создание которых стало в настоящее время технологически возможным.

На рис. 1 показана структура изучаемого составного резонатора. Между электроакустическим преобразователем — слой пьезоэлектрика 1 с металлическими электродами 2, 2' и подложкой 3 располагается многослойная система четвертьволновых слоев из материалов с чередующимися значениями отличных друг от друга материальных акустических импедансов Z_1 и Z_2 . Система из n четвертьволновых слоев предназначена для трансформации входного импеданса подложки Z_s до желаемых значений $Z_{in}^{(n)}$ на границе с преобразователем. Входной электрический импеданс Z_e составной структуры рассчитывается исходя из системы граничных условий, описывающих равенство нулю механических напряжений на свободных границах и непрерывность деформаций и механических напряжений на границе между слоями [3,4]

$$Z_e = \frac{1}{i\omega C_0} \left[1 + \frac{K^2}{1 + K^2} \cdot \frac{1}{bl} \cdot \frac{i(Z_m + Z_{m'})Z_0 \sin bl - 2Z_0^2(1 - \cos bl)}{(Z_0^2 + Z_m Z_{m'}) \sin bl - i(Z_m + Z_{m'})Z_0 \cos bl} \right]. \quad (1)$$

Здесь Z_m и $Z_{m'}$ — входные импедансы внешнего электрода и внутреннего металлического электрода, нагруженного на периодическую структуру слоев на подложке; K — константа электромеханической связи мате-

риала преобразователя; C_0 — электрическая емкость; b — комплексный волновой вектор, учитывающий затухание; Z_0 — акустический импеданс материала преобразователя; l — его толщина. Для расчета входных акустических импедансов всех слоев последовательно n раз используется формула

$$Z_{in}^{(i)} = Z_c^{(i)} \frac{Z_{in}^{(i-1)} \cos b_i l_i + i Z_c^{(i)} \sin b_i l_i}{Z_e^{(i)} \cos b_i l_i + i Z_{in}^{(i-1)} \sin b_i l_i}; \quad (2)$$

здесь $Z_l^{(i)}$ — материальный акустический импеданс i -го слоя, $Z_{in}^{(i-1)}$ — входной акустический импеданс $(i-1)$ слоя, b_i — комплексные волновые векторы для i -х слоев, l_i — их толщины, $Z_{in}^{(0)} = Z_s$, $i = 0, \dots, n$.

В качестве модели рассматривается структура, состоящая из подложки — пластины из ниобата лития с плоскопараллельными гранями, одна из которых свободна, а на поверхность другой последовательно нанесены n четвертьволновых слоев танталата и ниобата лития и слой преобразователя, также выполненного из ниобата лития. Металлические электроды мы считаем идеально проводящими слоями бесконечно малой толщины, так что $Z_{m'} = Z_{in}^{(n)}$. Значения скоростей и коэффициентов поглощения материалов взяты из [5].

На рис. 2 показана трансформация модуля электрического импеданса структуры в зависимости от частоты и числа слоев (n -четное). Толщина пьезоэлектрического преобразователя близка к половине длины волны на частоте ≈ 3 GHz. Рис. 2, *a* соответствует случаю, когда четвертьволновые слои отсутствуют ($n = 0$). Видны периодические по частоте резонансные пики (чередующиеся последовательные и параллельные резонансы). Такая зависимость характерна для многочастотной составной резонансной структуры [3], в которой частоты последующих резонансов отличаются друг от друга на частоту основного резонанса структуры (его условие — полный фазовый набег на толщине структуры равен πm , m — целое). Подложка — относительно толстая пластина с плоскопараллельными гранями, определяет относительную малость межмодовых расстояний. При небольшом числе четвертьволновых слоев ($n = 16$) интервал между последовательными и параллельными резонансными частотами увеличивается (рис. 2, *b*) и происходит полная перестройка резонансных кривых. При $n = 32$ резонансная кривая, как показано на рис. 2, *c*, имеет один основной минимум и один основной максимум, определяемые параллельным и последовательным резонансами

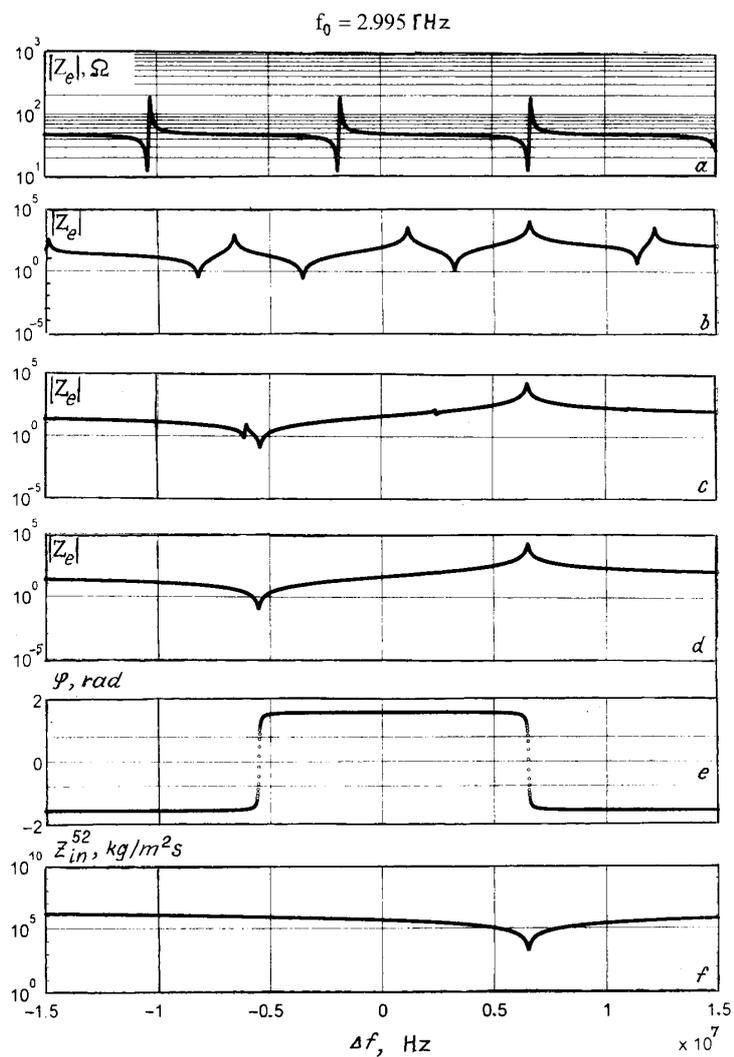


Рис. 2. Частотные зависимости модуля импеданса составного акустического резонатора при различном числе слоев вблизи частоты $f_0 = 2.995 \text{ GHz}$: a — $n = 0$, b — $n = 16$, c — $n = 32$, d — $n = 52$, e и f — частотные зависимости фазы (φ) электрического импеданса и модуля входного акустического импеданса многослойной структуры на границе с преобразователем при $n = 52$.

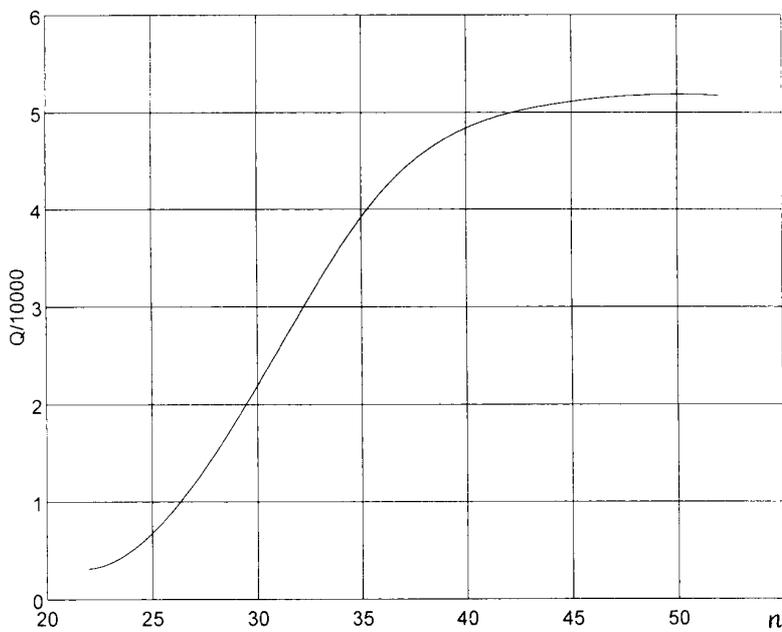


Рис. 3. Зависимость добротности резонатора от числа слоев.

собственно слоя преобразователя. Влияние подложки, которая теперь уже играет незначительную роль, проявляется в наличии небольших особенностей на резонансной кривой. При $n = 52$ влияние подложки практически исчезает. Приведенные на рис. 2, d, e частотные зависимости модуля и фазы Z_e практически соответствуют свободному полуволновому слою, так как акустическая нагрузка (рис. 1, $f, Z_{in}^{(52)} \approx 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) внутренней границы преобразователя мала по сравнению с импедансом собственно преобразователя ($Z_0 = 3.4 \cdot 10^7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$).

На рис. 3 показана зависимость добротности в точке параллельного резонанса от числа слоев. При ее вычислении границы полосы пропускания определялись из условия равенства фазы импеданса $\pm\pi/4$. Видно, что начиная с $n \approx 46$ влиянием подложки можно пренебречь. Данная структура будет работать и на гармониках собственной частоты полуволнового слоя. На рис. 4 показаны резонансные кривые Z_e и $Z_{in}^{(52)}$ на

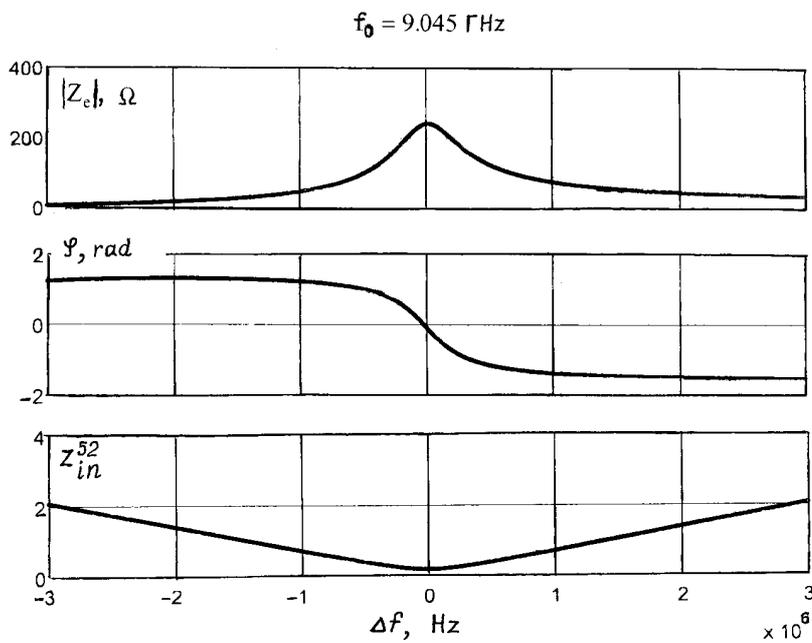


Рис. 4. Частотные зависимости модуля и фазы электрического импеданса структуры и входного акустического импеданса многослойной структуры на границе с преобразователем на 3-й гармонике параллельного резонанса ($f_0 = 9.045 \text{ GHz}$).

3-й гармонике (частота 9 GHz). Добротность на частоте параллельного резонанса равна $1.7 \cdot 10^4$.

Заметим, что при большом нечетном числе слоев импеданс на внутренней границе преобразователя, согласно (2), будет много больше импеданса собственного преобразователя. Для получения резонанса на той же частоте толщина этого слоя преобразователя должна быть близка к $\lambda/4$.

Таким образом, при достаточно большом числе слоев подложка может быть выполнена из любого материала и при этом существенного влияния на добротность резонанса и его электрические характеристики она оказывать не будет.

Список литературы

- [1] *Зеленка И.* Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах. М.: Мир, 1990. 584 с.
- [2] *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд. АН СССР, 1959. 502 с.
- [3] *Веретин В.С., Козорезов А.Г., Крутов Б.Н., Мансфельд Г.Д.* // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 401–404.
- [4] *Кайно Г.* Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990. 656 с.
- [5] *Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А.* Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1981. 184 с.