

Н. А. СПИРИДОНОВ, к. х. н. Л. Г. ГУСАКОВА,  
к. т. н. О. Г. КРЕМЕНЕВ, В. Н. СПИРИДОНОВ

Украина, г. Донецк, НТЦ «Реактивэлектрон»  
E-mail: Piezodon@km.ru

Дата поступления в редакцию  
12.12 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. НОВИКОВ  
(ЗАО "Авангард-Электроника", г. С.-Петербург)

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕМБРАННОГО ТИПА

*Приведены сведения о пьезокерамических материалах и технологии изготовления из них тонких пьезокерамических элементов для применения в электроакустических преобразователях мембранного типа.*

Проблема надежной генерации мощных звуковых сигналов актуальна при создании излучателей для разных сред и частот, акустических и механических датчиков, систем сигнализации и предупреждения (особенно при большом фоновом шуме). Генерация звуковых сигналов может осуществляться в пневматических или электрических (с электрическими источниками питания) излучателях. Для генерации акустических сигналов звуковыми излучателями с электрическим питанием известны два основных способа — механический и мембранный [1]. В настоящее время для создания акустических излучателей предпочтение отдается мембранному способу.

При мембранном способе звуковые колебания излучаются колеблющимися со звуковой частотой диффузором динамика или мембраной, изготовленной на основе тонкого пьезокерамического элемента. Использование динамических головок встречается все реже, что обусловлено следующими причинами: динамические головки достаточно дороги и потребляют большие токи, они имеют значительные габариты, нуждаются в дополнительном защитном корпусе, недостаточно надежны при эксплуатации в предельных режимах и сложных климатических условиях.

В отличие от динамических головок, пьезокерамический мембранный излучатель обладает рядом несомненных преимуществ. Основные из них — предельная дешевизна; низкое электропотребление, что позволяет использовать в автономных системах сигнализации с низковольтным элементом питания; малые габариты, простая, компактная и легкая конструкция, позволяющая достигать излучения сигнала с уровнем 100...115 дБ по отношению к нулевому уровню звукового давления; долгий срок службы и высокая надежность; возможность использования в широком диапазоне частот, включая ультразвуковые. В таких излучателях в качестве возбудителя звуковых колебаний используется пьезокерамический электроакустический преобразователь.

В настоящей статье рассмотрены электроакустические преобразователи мембранного типа на тонких пьезокерамических элементах.

Основным рабочим элементом пьезокерамического электроакустического преобразователя является тонкая пьезокерамическая пластина с металлическими электродами — пьезокерамический элемент (ПКЭ), который крепится на металлической мембране. При подаче на ПКЭ переменного электрического напряжения он, благодаря пьезоэффекту, вместе с мембраной изгибается в ту или другую сторону в зависимости от полярности приложенного напряжения, создавая звуковые колебания, и наоборот, при механическом воздействии ПКЭ на мембрану на электродах ПКЭ генерируется электрическое напряжение.

ПКЭ на металлической мембране помещается в корпус, который вместе с мембраной образует электроакустический преобразователь мембранного типа (ЭПМТ). Диаметр ПКЭ выбирают в пределах от 8 до 50 мм, а толщину — от 0,10 до 0,25 мм, в зависимости от назначения ЭПМТ [1]. Амплитудно-частотная характеристика ЭПМТ определяется электрофизическими параметрами ПКЭ, его геометрическими размерами, свойствами пьезоматериала, из которого он изготовлен, а также геометрическими размерами и материалом мембраны и конструкцией корпуса.

Условно ЭПМТ можно разделить на две группы — резонансного типа и широкополосные. Излучатели первой группы характеризуются узкой полосой излучения, высоким акустическим давлением и высоким кпд. Для их изготовления используются ПКЭ толщиной 0,18 мм и более. К устройствам этого типа относятся сирены и другие излучатели с акустическим давлением 100 дБ/м и более.

Широкополосные излучатели имеют более низкие значения акустического давления и кпд. К устройствам этого типа относятся телефонные и микрофонные капсулы для телефони, громкоговорители и другие устройства. Для изготовления широкополосных излучателей применяются ПКЭ толщиной 0,08—0,12 мм из пьезоматериалов с высоким значением пьезомодуля  $d_{31}$ .

Пьезокерамические ЭПМТ могут выполнять функцию приемника, излучателя, а также приемника и излучателя одновременно (обратимый преобразователь).

В НТЦ «Реактивэлектрон» разработана широкая номенклатура промышленных марок пьезокерамических материалов (ПКМ) на основе твердых раство-

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА: ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ**

Таблица 1

*Свойства промышленных марок пьезокерамических материалов, используемых для получения тонких ПКЭ*

Марка материала	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$\text{tg } \delta$	$K_p$	$d_{31}, 10^{12}$ Кл/Н	$g_{31}, 10^3$ В·м/Н	$Q_m$	$T_c, ^\circ\text{C}$
Материалы с высоким значением пьезомодуля $d_{31}$							
ЦТС <sub>Т</sub> БС-1 («Реактивэлектрон»)	4100±400	<0,02	0,62	>300	8,3	>40	170
ЦТС <sub>Т</sub> БС-3/1 («Реактивэлектрон»)	4400±400	≤0,05	0,65	>300	7,7	>20	150
ЦТС <sub>Т</sub> БС-3/2 («Реактивэлектрон»)	5500±500	≤0,05	0,63	>300	6,2	>20	150
ЦТС <sub>Т</sub> БС-3/3 («Реактивэлектрон»)	6000±500	≤0,05	0,65	>350	6,6	>20	150
* ПКР-7 (Россия)	3500	0,015	0,68	280	9,0	80	220
РС23 (Япония)	6100	0,03	0,63	315	5,8	72	140
PZT-5Н (США)	3400	0,02	0,65	274	9,1	65	193
Материалы с высокой пьезочувствительностью $g_{31}$							
ЦТС-46 («Реактивэлектрон»)	1100±200	≤0,03	0,60	>120	15—16	>50	340
ЦТСС <sub>Т</sub> -3 («Реактивэлектрон»)	1400	≤0,5	0,55	140	11,3	800	290
ЦТС <sub>Т</sub> БС-4 («Реактивэлектрон»)	1000	≤0,5	0,52	100	11,3	900	270
ЦТБС-6 («Реактивэлектрон»)	500±50	≤0,007	0,52	>70	15,8	>110	330
* ПКР-1 (Россия)	650	0,02	0,62	95	16,5	90	355
PZT-5А (США)	1700	0,02	0,60	171	11,4	75	365
Материалы с высокими значениями $d_{31}$ и $g_{31}$ одновременно							
ЦТСС <sub>Т</sub> -2М («Реактивэлектрон»)	3300±300	≤0,02	0,64	>250	8,6	>40	180
ЦТСС <sub>Т</sub> -9 («Реактивэлектрон»)	2200±200	≤0,02	0,65	>200	10,3	>60	265
* ПКР-89 (Россия)	1900	0,016	0,67	205	12,1	75	320
** ЦТСНВ-1 (Россия)	2200	0,019	0,54	205	10,5	70	240
Сегнетожесткие материалы							
ЦТСС <sub>Т</sub> -3 («Реактивэлектрон»)	1400±140	<0,006	0,55	>140	11,3	>800	290
ЦТС <sub>Т</sub> БС-6 («Реактивэлектрон»)	1400±150	<0,006	0,57	>120	9,7	>800	285
PZT-8 (США)	1000	0,004	0,50	93	10,5	1000	300
* ПКР-77 (Россия)	1350	0,003	0,62	140	11,7	1200	345

\*Пьезоматериал используется для получения пьезоэлементов по технологии горячего прессования [4].

\*\*Пьезоматериал используется для изготовления тонких ПКЭ по технологии шликерного литья [5].

ров цирконата–титана–свинца (ЦТС) и технология их получения [2]. Разработана также технология получения ПКЭ различной конфигурации, в том числе и для применения в составе ЭПМТ. Исследования показали, что в зависимости от назначения ЭПМТ пьезокерамические материалы можно условно разделить на несколько групп.

Первая группа — это ПКМ с максимальным значением пьезомодуля  $d_{31}$  для акустических излучателей с высоким акустическим давлением и низким уровнем возбуждающего электрического напряжения (телефонные капсулы и др.).

Вторая группа — это ПКМ с максимальной пьезочувствительностью  $g_{31}$  (приемник звуковых колебаний, микрофон).

Третья группа — это ПКМ с достаточно высокими значениями пьезомодуля  $d_{31}$  и пьезочувствительности  $g_{31}$  одновременно (для обратимого преобразователя).

Четвертая группа — это ПКМ для мощных акустических излучателей (сирены). К ним относятся сегнетожесткие пьезоматериалы, обладающие высокими значениями пьезомодуля  $d_{31}$ , механической добротности  $Q_m$  и предельно допустимой мощности.

Основные свойства указанных выше материалов, из которых изготавливают тонкие ПКЭ, приведены в табл. 1. Для сравнения в ней приведены зарубежные

аналоги. Аттестация свойств ПКМ осуществлялась в соответствии со стандартом [3].

В таблице приняты следующие обозначения:

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  — относительная диэлектрическая проницаемость поляризованной пьезокерамики;

$\text{tg } \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь;

$K_p$  — коэффициент электромеханической связи радиальной моды колебания;

$d_{31}$  — поперечный (радиальный) пьезомодуль;

$g_{31}$  — пьезочувствительность;

$Q_m$  — механическая добротность;

$T_c$  — точка Кюри.

Из таблицы видно, что промышленные марки ПКМ, разработанные в НТЦ «Реактивэлектрон», практически не уступают известным мировым аналогам.

Несмотря на широкую номенклатуру промышленных марок пьезоматериалов, разработанных в НТЦ «Реактивэлектрон», на сегодня они уже в значительной степени не удовлетворяют возрастающим требованиям разработчиков электронной аппаратуры и ультразвукового технологического оборудования. Во всех промышленно развитых странах идет новая волна исследований и разработок в области пьезоэлектрического материаловедения. Ведется поиск новых физических эффектов, на основе которых могут быть созданы уникальные материалы и приборы.

Некоторые излучатели, в которых используются разработки НТЦ «Реактивэлектрон»

Наименование продукции	Основные характеристики
Микрофон пьезокерамический МПК-105, 101	Чувствительность 30—50 мВ/Па, Ø22,5×7 мм
Звонок пьезокерамический ЗПК-4, -4М, -3	Звуковое давление ≥82; ≥88; ≥75 дБ/м
Сирена СП-1	Звуковое давление ≥102 дБ/м
Телефонный капсюль ТПК-101, -103	Ø48 мм; Ø32 мм
Отпугиватели грызунов	Промышленный, бытовой, с выносным блоком питания, автомобильный вариант
Отпугиватели собак	Универсальный, мини, стационарный для защиты периметра
Обнаружитель скрытой проводки	
Сигнализатор опасного напряжения	
Металлоискатель	

Авторами статьи разработан и применяется новый подход, основанный на использовании фазовых превращений — как в процессе получения новых материалов, так и в процессе формирования физических и эксплуатационных параметров изделий. В ходе проведенных исследований разработаны новые пьезоматериалы. Полученные параметры материалов не только значительно превосходят характеристики, приведенные в каталогах различных фирм, но и достигают значений, предсказанных на основе теоретических предпосылок. Эти материалы, по нашему мнению, могут стать основой аппаратуры нового поколения.

Пьезоматериалы, приведенные в табл. 1, спекаются методом горячего прессования [4] или — традиционным методом — на воздухе. Для изготовления из них тонких ПКЭ существуют хорошо отработанные технологические процессы алмазной резки и шлифовки спеченных керамических заготовок. Однако эти процессы не позволяют получать ПКЭ толщиной 0,08—0,12 мм, которые используются в широкополосных акустических преобразователях. Кроме того, при алмазной резке на поверхности керамических пластин возникают микротрещины, которые в процессе эксплуатации приводят ПКЭ к разрушению и выходу из строя электроакустического преобразователя. По этой причине ЭПМТ, в которых используются пьезокерамические элементы, полученные по технологии алмазной резки, имеют короткий срок эксплуатации.

Нами отработана технология получения тонких (от 0,08 мм) ПКЭ, в основе которой лежит метод шликерного литья [5], используемый в производстве многослойных керамических конденсаторов. Технологический процесс включает следующие этапы: изготовление композиционных («сырых») пленок методом шликерного литья; отделение пленки от лавсановой подложки; вырезание (вырубка) из «сырой» пленки заготовок заданной конфигурации и размеров; спекание заготовок; нанесение металлических электродов; поляризация ПКЭ; контроль электрофизических параметров тонких ПКЭ в соответствии с [3].

Композиционные пленки представляют собой матрицу из полимера, в которой равномерно распределен высокодисперсный пьезокерамический порошок. Такие пленки сочетают высокую механическую и электрическую прочность полимера-диэлектрика с

высокими диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами керамики и легко формуются в изделие любой формы.

Рассмотренные ЭПМТ на тонких ПКЭ из материалов НТЦ «Реактивэлектрон» изготавливаются и успешно применяются на ряде предприятий Украины в производстве пьезокерамических излучателей звукового и ультразвукового диапазонов. Некоторые виды такой продукции представлены в табл. 2.

Звуковым излучателям на основе ЭПМТ свойственны следующие положительные качества:

- невосприимчивость к радиочастотным шумам и дребзгу в контактах;
- низкое энергопотребление и очень долгий срок службы;
- возможность использования в широком диапазоне частот, в том числе в ультразвуковой части спектра;
- возможность использования в сложных эксплуатационных и климатических условиях с повышенной агрессивной пыле-, газо-, влаго-, взрывоопасной средой (например в шахтных условиях).

Рассмотренные пьезокерамические электроакустические преобразователи мембранного типа могут также быть рекомендованы для использования в мобильных системах охранной сигнализации, в том числе с низковольтным напряжением питания (6—15 В), в системах предупредительной сигнализации пуска шахтных конвейеров, механизмов, силовых агрегатов, в других предупреждающих сигнализаторах на производстве.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балахничев И. Н., Дрик А. В., Ровдо А. А. Экспериментальная электроника. Вып. 2.— М.: Салон-Р, 2000.
2. Климов В. В., Дидковская О. С., Савенкова Г. Е., Веневцев Ю. Н. Пьезокерамика донецкая // Сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные проблемы пьезоэлектроники». Т. 1.— Ростов.— 1995.— С. 59—65.
3. ОСТ 110444—87. Материалы пьезокерамические. Технические условия.
4. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., Дудкина С. Н. Высокоэффективные пьезокерамические материалы. Оптимизация поиска.— Ростов-на-Дону: Пайк, 1994.
5. Ротенберг Б. А. Керамические конденсаторные диэлектрики.— СПб: НИИ «Гириконд», 2000.