

08;05.1

©1993

ФОКУСИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В СЕГНЕТОКЕРАМИКАХ С ПОМОЩЬЮ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*В.Н.Белый, Н.С.Казах, А.Г.Мащенко,
В.К.Павленко, Ф.М.Северин*

Для электрического управления акустическими пучками наиболее подходящими являются центросимметричные параэлектрики, обладающие сильной деформационной зависимостью диэлектрической проницаемости [1,2]. К ним относятся в первую очередь кубические сегнетоэлектрики BaTiO_3 , SrTiO_3 , KTaO_3 в парафазе, скандониобат свинца, а также изотропные керамики на их основе [3-6]. В центросимметричных параэлектриках относительные изменения скоростей упругих волн ($\Delta V/V \approx E^2$), обусловленные вынужденным пьезоэффектом и наведенной акустической анизотропией, могут достигать нескольких процентов при напряженностях $E \approx 1-10$ кВ/см [3-6]. Особый интерес представляют электроиндуцированные акустические эффекты в неоднородных электрических полях. Применение таких полей, как было впервые показано в [7], позволяет создать управляемые для фокусирования акустических пучков — электроакустические линзы (ЭАЛ).

В данной работе рассчитаны конструкции линз на основе сегнетокерамик с электрострикционным эффектом и приводятся результаты первого экспериментального наблюдения явления фокусирования ультразвуковых пучков в неоднородных электрических полях специальной конфигурации.

Возможные конструкции ЭАЛ, предназначенных для управляемого фокусирования продольно поляризованных УЗ волн, изображены схематически на рис. 1. Для создания неоднородного поля в звуковом проводе 1 используются гиперболические электроды 2 в виде цилиндров, направляющие которых параллельны оси Z , а образующими служат равнобочные гиперболы $xy = \pm R^2/2$ ($2R$ — расстояние между вершинами электродов).

При подключении электродов к источнику питания внутри звуковпровода устанавливается распределение потенциала вида

$$\varphi(x, y) = \frac{\varphi_0}{R^2} xy, \quad (1)$$

где φ_0 — разность потенциалов между электродами.

Возникающее электрическое поле с компонентами $E_x = -\varphi_0 y/R^2$, $E_y = -\varphi_0 x/R^2$ вызывает за счет эффекта электрострикции квадратичное изменение скорости акустических волн в сечении, перпендикулярном направлению распространения ультразвука. Для заданного направления распространения УЗ волн n и вектора ее поляризации u относительное изменение скорости

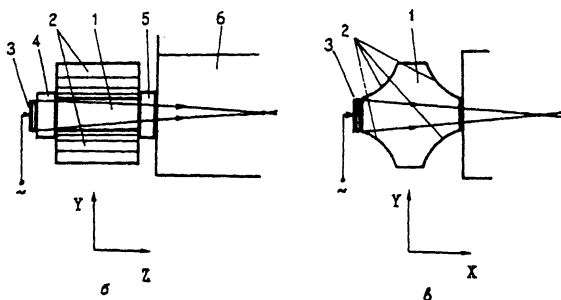
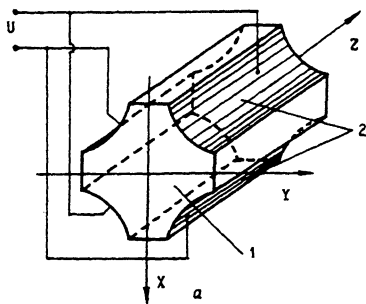


Рис. 1. Фокусирующий звукопровод (а) и его применение в качестве сферической (б) и цилиндрической (б') линзы.

1 — звукопровод, 2 — электроды, 3 — пьезопреобразователь, 4 и 5 — входной и выходной стеклянные буферы, б — кювета с водой.

$\Delta V/V = (V - V_0)/V_0$ выражается через компоненты тензора линейной g_{ijkl} и эффективной квадратичной d_{mnikl} электрострикции следующим образом [1,5]:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{2c_{ijkl} u_i n_j u_k u_l} \left[(g_{iklm} E_i n_k u_l n_m) (g_{pqrs} E_p n_q u_r n_s) - d_{mnikl} E_m E_n n_i u_j u_k n_l \right], \quad (2)$$

где V_0 — невозмущенная скорость ультразвука, ϵ — диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Пусть продольная УЗ волна распространяется вдоль оси Z (рис. 1, б). В этом случае, согласно (1) и (2), для относительного изменения скорости, обусловленного воздействием приложенного электрического поля, получаем следующее выражение:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\epsilon \epsilon_0 \varphi_0^2 d_{122}}{2c_{11} R^4} \rho^2, \quad (3)$$

где d_{122} — компонента тензора квадратичной электрострикции в матричной записи, $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ — расстояние от начала координат.

Из (3) следует, что распределение потенциала (1) вызывает в поперечном сечении звукопровода квадратичное по радиусу изменение скорости. При прохождении через такой звукопровод с поперечным градиентом скорости, акустические лучи изгибаются с сторону ее уменьшения. В рамках геометрической акустики [8] угол отклонения Θ акустических лучей после прохождения звукопровода длиной l определяется выражением:

$$\Theta = -\frac{1}{V_0} \int_0^l \frac{dV}{d\rho} dz = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \varphi_0^2 d_{122}}{c_{11} R^4} l \rho. \quad (4)$$

Из (4) следует, что в геометроакустическом приближении все ультразвуковые лучи пересекаются в точке на расстоянии $F_s = \rho/n\Theta$ от выходной грани звукопровода:

$$F_s = \frac{c_{11} R^4}{\varepsilon \varepsilon_0 \varphi_0^2 d_{122} n l}, \quad (5)$$

где $n = V_{ak}/V_0$ есть отношение скорости V_{ak} во внешней среде к скорости V_0 в материале звукопровода.

Таким образом, в поперечном сечении пучка из-за электрострикционного эффекта обеспечивается квадратичное распределение акустической скорости, необходимое для сферической фокусировки продольно поляризованного УЗ пучка. Величина фокусного расстояния линзы меняется путем изменения разности потенциалов, прикладываемой к электродам.

Рассмотрим теперь случай, когда продольная УЗ волна распространяется вдоль оси X (рис. 1,с). Тогда, в соответствии с (1) и (2), на выходе из звукопровода длиной l_1 акустические лучи собираются в линию, параллельную оси Z и отстоящую от выходной грани на расстоянии

$$F_c = \frac{c_{11} R^4}{\varepsilon \varepsilon_0 \varphi_0^2 (d_{111} - g_{11}^2) n l_1}, \quad (6)$$

т.е. осуществляется управляемое цилиндрическое фокусирование УЗ пучка.

Приведем оценки фокусных расстояний управляемой линзы, выполненной из сегнетокерамики титаната бария с окислами висмута и олова $\text{BaTiO}_3 (\text{Bi}, \text{Sb})$, для которой известен полный набор коэффициентов линейной и квадратичной электрострикции [1,3,4]. Значения необходимых параметров $\text{BaTiO}_3 (\text{Bi}, \text{Sb})$: $c_{11} = 16.9 \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $d_{122} = 1.1 \cdot 10^6$, $d_{111} = 3.1 \cdot 10^5$, $g_{11} = -9.4 \cdot 10^2$, $\varepsilon = 6.8 \cdot 10^3$, $\rho = 5.7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Если сферическая электроакустическая линза длиной $l = 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и апертурой $2R = 2.0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ помещена в воду, то при управляющем потенциале $\varphi_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ В}$ фокусное расстояние в соответствии с (5) составит $F_s = 10 \text{ см}$. При работе звукопровода в качестве управляемой цилиндрической линзы фокусное расстояние, согласно (6), вдвое больше: $F_c \cong 2F_s$.

Для экспериментального подтверждения возможности управляемого фокусирования УЗ пучков была создана сферическая линза, изображенная на рис. 1,б. Рабочее тело электроакустической линзы 1 изготавливалось из центросимметричной керамики на основе твердого раствора цирконата-ниобата свинца ($\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{1/3}\text{O}_3$) с размытым фазовым переходом и точкой Кюри вблизи комнатной температуры. Она имела геометрические размеры $22 \times 22 \times 50 \text{ мм}^3$ при рабочей апертуре 17 мм. На гиперболические поверхности 2 в виде прямых цилиндров методом вакуумного напыления наносились Zn-Cu электроды.

Пучок продольно поляризованных волн с частотой 10 МГц возбуждался пластиной 3 из пьезокерамики титаната бария диаметром 20 мм и вводился в ЭАЛ через стеклянный буфер 4. Для оптимизации процесса возбуждения УЗ пучка электрические импедансы пьезопреобразователя и ВЧ генератора согласовывались на частоте возбуждения по автотрансформаторной схеме. Пьезопреобразователь возбуждался генератором стабильного тока ГСТ-1, работающим в режиме амплитудной модуляции, что позволило поднять плотность мощности УЗ пучка до $\approx 50 \text{ Вт/см}^2$.

С целью исключения высоковольтного поверхностного пробоя ЭАЛ помещалась в кювету с маслом ПМС-10. После прохождения через линзу и стеклянный буфер 5 пучок распространялся в кювете с дистиллированной водой 6. Для регистрации и измерения амплитудного распределения по сечению УЗ пучка применялась автоматизированная система сканирования исследуемого поля пробным пьезоприемником. Система регистрации была реализована с использованием управляющей ЭВМ ДВК-3М в линии с крейт КАМАК. Электрический отклик пробного пьезоприемника усиливался резонансным усилителем с центральной частотой 10 МГц, полосой 1.5 МГц и коэффициентом усиления 35 дБ. Затем сигнал усиливался широкополосным ВЧ усилителем УЗ-33. После детектирования и низкочастотного усиления модулем 1101 он поступал на десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП, модуль 712). Оцифрованный сигнал через контроллер КАМАК вводился в ЭВМ для дальнейшей обработки и графического представления амплитудного распределения УЗ мощности по сечению пучка. Для уменьшения дисперсии измеряемой мощности отсчет АЦП усреднялся по 500 циклам генерация—прием. Двухкоординатное сканирование УЗ пучка осуществлялось двумя шаговыми двигателями ДШИ-200 в старт-стопном режиме с управлением от ЭВМ. Пространственное разрешение системы регистрации определялось размером пробного пьезоприемника $1 \times 1 \text{ мм}$. Время сканирования одного распределения с анализируемой площадью $30 \times 30 \text{ мм}$ определялось в основном скоростью перемещения пьезоприемника и составляло $\approx 20 \text{ мин}$.

На рис. 2 показан результат измерения распределения УЗ поля по сечению пучка на расстоянии 15 см от выходной грани ЭАЛ при значениях управляющего напряжения: 0 кВ (а), 3 кВ (б) и 5 кВ (в). По осям X, Y отложены пространственные координаты сечения пучка, а вдоль оси Z — амплитуда УЗ поля, нормированная на максимальное значение из трех измерений для различных управляющих напряжений. Мощность УЗ пучка в процессе измерения данных распределений поддерживалась постоянной. Прове-

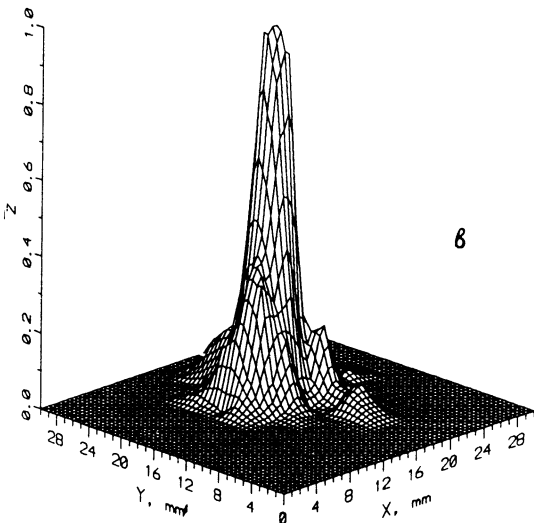
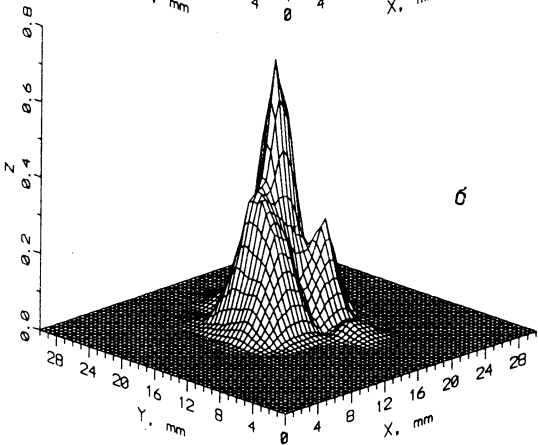
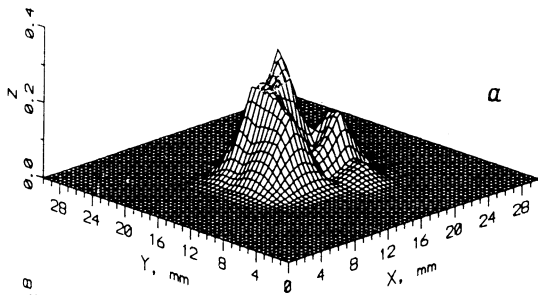


Рис. 2. Амплитудное распределение по сечению ультразвукового пучка на расстоянии 15 см от выходной грани линзы при управляющем напряжении: 0 (а), 3 (б) и 5 кВ (в).

денные исследования показывают, что имеется явная зависимость поперечного размера УЗ пучка от величины внешнего электрического напряжения. При этом сохраняется общая структура УЗ поля, определяемая диаграммой направленности пьезопреобразователя. С увеличением управляющего напряжения возрастает мощность УЗ поля в центральной части пучка и уменьшается его диаметр по поперечному сечению. При напряжениях более 5 кВ наблюдалось увеличение диаметра УЗ пучка, что свидетельствует о перемещении фокального пятна к выходной поверхности линзы и управляемом сферическом фокусировании. Для данного типа керамики и геометрических размеров ЭАЛ измеренное фокусное расстояние при напряжении 5 кВ составляет $F_s \approx 15$ см. Перспективы создания управляемых электроакустических линз для высокочастотных УЗ пучков связаны с получением новых высокоэффективных электрострикционных материалов.

Настоящая работа субсидирована Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь согласно контракту № Ф31-216.

Список литературы

- [1] Белый В.Н., Севрук Б.Б. // Кристаллография. 1983. Т. 28. Вып. 5. С. 925.
- [2] Auld B.A., Delval P., Laguna G. et al. // IEEE Ultrason. Symp., Williamsburg. Proc. Vol. 1. New York, 1986. P. 217.
- [3] Лехар С.И., Демиденко А.А., Здебский А.П. и др. // ДАН СССР. 1976. Т. 230. Вып. 5. С. 1089.
- [4] Жабитенко Н.К., Кучеров И.Я. // УФЖ. 1978. Т. 23. Вып. 2. С. 263.
- [5] Бражский Ю.А., Коробов А.И., Лямов В.Е. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 5. С. 1545.
- [6] Юшин Н.К., Дороговцев С.Н., Гулямов Г., Смирнов С.И. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 2. С. 515.
- [7] Белый В.Н., Казак Н.С. А.с. № 822922 СССР. МКИ В 06 3/04. СССР. 8 с.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М., 1954. С. 66.

Институт физики АН Беларуси
Минск

Поступило в Редакцию
3 июня 1993 г.