

05;08
©1995 г.

СКАНИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В СЕГНЕТОКЕРАМИКАХ С ПОМОЩЬЮ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

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

Институт физики им.Б.И.Степанова АН Беларуси,
220602, Минск, Беларусь
(Поступило в Редакцию 14 марта 1994 г.)

Экспериментально исследовано явление управляемого сканирования ультразвуковых пучков в электрострикционной сегнетокерамике при воздействии неоднородного электрического поля специальной конфигурации. Реализован новый тип управляемого устройства для сканирования акустических пучков — электроакустический дефлектор.

В центросимметричных параэлектриках и сегнетокерамиках относительные изменения скоростей упругих волн достигают нескольких процентов при напряженностях электрического поля $E \sim 1-10$ кВ/см [1]. Такие материалы, как показано в [2], можно использовать для управляемого фокусирования ультразвуковых (УЗ) пучков.

В данной работе приведены результаты первого экспериментального наблюдения явления сканирования ультразвуковых пучков в электрострикционной сегнетокерамике при воздействии неоднородного электрического поля, создаваемого электродами специальной конфигурации.

Одна из возможных конструкций градиентного электроакустического дефлектора [3], предназначенного для управляемого сканирования УЗ пучков, представлена схематически на рис. 1. Для создания неоднородного поля в звукопроводе 1 используется система двух электродов. Электрод 2 выполняется в форме двугранного угла 120° , электрод 3 — в виде цилиндрической поверхности, направляющая которой определяется уравнением в цилиндрических координатах r и γ

$$r = D \cos^{-2/3} \left(\frac{3}{2} \gamma \right), \quad (1)$$

где D — минимальное расстояние между ребром двугранного угла и цилиндрической поверхностью.

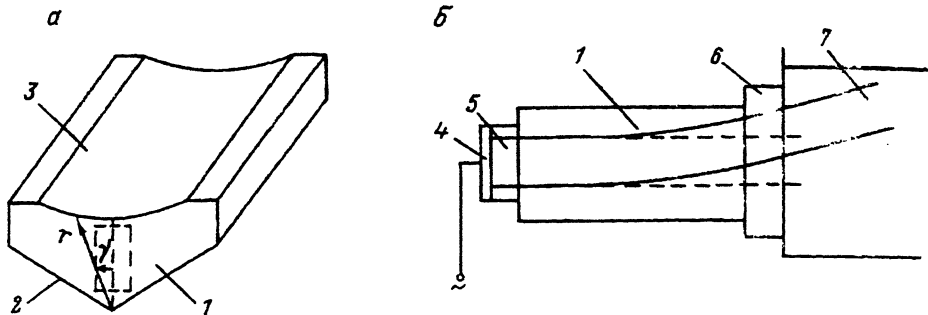


Рис. 1. Звукопровод для сканирования УЗ пучка (а) и его применение в качестве электроакустического дефлектора (б).

При подключении электродов к источнику питания внутри звукопровода устанавливается следующее распределение потенциала:

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{D^{3/2}} \left[r^{3/2} \cos\left(\frac{3}{2}\gamma\right) - \frac{1}{2}D^{3/2} \right], \quad (2)$$

где φ_0 — разность потенциалов между электродами.

При этом компоненты поля E_γ и E_r выражаются в виде

$$E_\gamma = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = \frac{3}{2} \frac{\varphi_0}{D^{3/2}} r^{1/2} \sin\left(\frac{3}{2}\gamma\right),$$

$$E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{3}{2} \frac{\varphi_0}{D^{3/2}} r^{1/2} \cos\left(\frac{3}{2}\gamma\right). \quad (3)$$

Отсюда для квадрата напряженности электрического поля получаем

$$E^2 = E_\gamma^2 + E_r^2 = \frac{9}{4} \frac{\varphi_0^2}{D^3} r. \quad (4)$$

Возникающее электрическое поле с компонентами E_r и E_γ (3) вызывает за счет эффекта электрострикции линейное изменение скорости в сечении, перпендикулярном направлению распространения ультразвука. Для заданного направления распространения волны n и вектора поляризации u относительное изменение скорости $\Delta V/V_0 = (V - V_0)/V_0$ выражается через компоненты тензоров модулей упругости c_{ijkl} , линейной g_{ijkl} и квадратичной d_{mnikl} электрострикции следующим образом [14]:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2c_{ijkl} u_i n_j u_k n_l} [(g_{ijkl} E_i n_j u_k n_l) (g_{pqrs} E_p n_q u_r n_s) - d_{mnikl} E_m E_n n_i u_j u_k n_l], \quad (5)$$

где V_0 — невозмущенная скорость ультразвука, ε — диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, ε_0 — проницаемость вакуума

Пусть продольная УЗ волна распространяется вдоль оси Z устройства (рис. 1,б). В этом случае, согласно (4) и (5), скорость продольной акустической волны является функцией полярной координаты r вида

$$V(r) = V_0 - \frac{9\varphi_0}{4D^3} V_0 \kappa r, \quad (6)$$

где $\kappa = \varepsilon \varepsilon_0 d_{122} / 2c_{11}$, c_{11} и d_{122} — компоненты тензоров модулей упругости и квадратичной электрострикции в матричной записи.

Из (6) следует, что распределение потенциала (2) вызывает в поперечном сечении звукопровода линейное по r изменение скорости. При прохождении через такой звукопровод, где создан поперечный градиент скорости, акустические лучи изгибаются в сторону уменьшения скорости. Угол отклонения $\Delta\theta'_a$ луча после прохождения звукопровода длиной l определяется выражением

$$\Delta\theta'_a = \frac{9}{4} \frac{\varphi_0^2}{D^3} \kappa l. \quad (7)$$

Из-за преломления на выходной грани звукопровода угол отклонения изменяется на величину $n = V_{ak}/V_0$, равную отношению скорости V_{ak} во внешней среде к скорости V_0 в материале звукопровода. С учетом этого окончательно для угла отклонения ультразвукового пучка получим формулу

$$\Delta\theta_a = \frac{9}{4} \frac{\varphi_0^2}{D^3} n \kappa l. \quad (8)$$

Таким образом, в поперечном сечении пучка из-за электрострикционного эффекта обеспечивается линейное распределение акустической скорости, необходимое для отклонения акустического пучка как целого. Поэтому пучок отклоняется при $d_{122} > 0$ в сторону цилиндрического электрода, а в случае $d_{122} < 0$ — к ребру двугранного угла. Величина угла отклонения дефлектора меняется путем изменения прикладываемой к электродам разности потенциалов.

Приведем оценку величины угла отклонения управляемого дефлектора, выполненного из сегнетокерамики титана бария с окислами висмута и олова $\text{BaTiO}_3(\text{Bi}, \text{Sb})$, для которой известен полный набор коэффициентов линейной и квадратичной электрострикции [1,5,6]. Значения необходимых параметров $\text{BaTiO}_3(\text{Bi}, \text{Sb})$ $c_{11} = 16.9 \cdot 10^{10}$ Н/м, $d_{122} = 1.1 \cdot 10^8$, $\rho = 5.7 \cdot 10^3$ кг/м³.

Для электроакустического дефлектора длиной $l = 40$ мм и $D = 19$ мм при управляющем потенциале $\varphi_0 = 5 \cdot 10^3$ В из (7) имеем для угла отклонения акустического пучка $\Delta\theta'_a \sim 5^\circ$. Если акустический дефлектор помещен в воду, то из-за преломления на выходной грани угол отклонения уменьшится в $V_0/V_{ak} = 5.4$ раз и в соответствии с (8) составит величину $\Delta\theta_a \sim 57'$.

Для экспериментального исследования управляемого отклонения ультразвуковых пучков с помощью неоднородного электрического поля был создан дефлектор в форме, показанной на рис. 1,а. Звукопровод l электроакустического дефлектора изготавливался из сегнетокерамики 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. Дефлектор имел геометрический размер $35 \times 20 \times 60$ мм при рабочей апертуре ~ 15 мм. На поверхность 2, выполненную в виде двугранного угла 120° , и цилиндрическую поверхность 3 наносились методом вакуумного напыления Zn-Cu электроды.

В работе использовались экспериментальная методика, аналогичная описанной в [2]. Электроакустический дефлектор помещался в кювету с изолирующей жидкостью для исключения высоковольтного поверхностного пробоя при прикладывании к электродам управляющего напряжения.

Пучок продольно поляризованных ультразвуковых волн с частотой 10 МГц возбуждался пластиной 4 (рис. 1,б) из пьезокерамики титаната бария диаметром 15 мм и вводился в градиентный звукопровод 1 через стеклянный буфер 5. Для оптимизации процесса получения ультразвукового пучка электрические импедансы пьезопреобразователя и высокочастотного генератора согласовывались на частоте возбуждения по автотрансформаторной схеме. Резонансный высокочастотный генератор ГСТ-1 выдавал на согласованную нагрузку импульсы длительностью 5 мкс со скважностью, определяемой системой регистрации и пиковой мощностью ~ 80 Вт.

После прохождения дефлектора ультразвуковой пучок через стеклянный буфер 6 вводился в кювету 7 с дистиллированной водой. Для регистрации и изменения амплитудного распределения по сечению пучка применялась автоматизированная система сканирования исследуемого ультразвукового поля пробным пьезоприемником. Система регистрации была реализована с использованием компьютера ДВК-3М в линии с крейтом КАМАК. Электрический отклик пробного пьезоприемника (размером 1×1 мм) последовательно усиливался резонансным усилителем (центральная частота 10 МГц, полоса 1.5 МГц, коэффициент усиления ~ 35 дБ) и широкополосным высокочастотным усилителем УЗ-33 (коэффициент усиления ~ 25 дБ). После детектирования сигнал поступал на низкочастотный усилитель (модуль 1101) для согласования со входом десятиразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП, модуль 712). Оцифрованный сигнал через контроллер КАМАК вводился в компьютер для дальнейшей обработки и графического представления амплитудного распределения мощности звука по сечению пучка. Для уменьшения дисперсии измерения отсчет АЦП усреднялся по 500 циклам генерация-прием. Двухкоординатное перемещение пробного точечного пьезоприемника осуществлялось двумя шаговыми двигателями в старт-стоп режиме с управлением от компьютера.

Экспериментально измерялось амплитудное распределение акустического поля по сечению пучка на различных расстояниях от выходной поверхности дефлектора при различных значениях управляющего напряжения.

Результат последовательного измерения распределения акустического поля по сечению пучка на расстоянии 55 см от дефлектора при управляющих напряжениях 0, 3 и 5 кВ представлен на рис. 2. По осям X, Y отложены пространственные координаты по сечению пучка, а по вертикальной оси — нормированная мощность ультразвука в отн.ед. Мощность акустического пучка в процессе измерения распределения

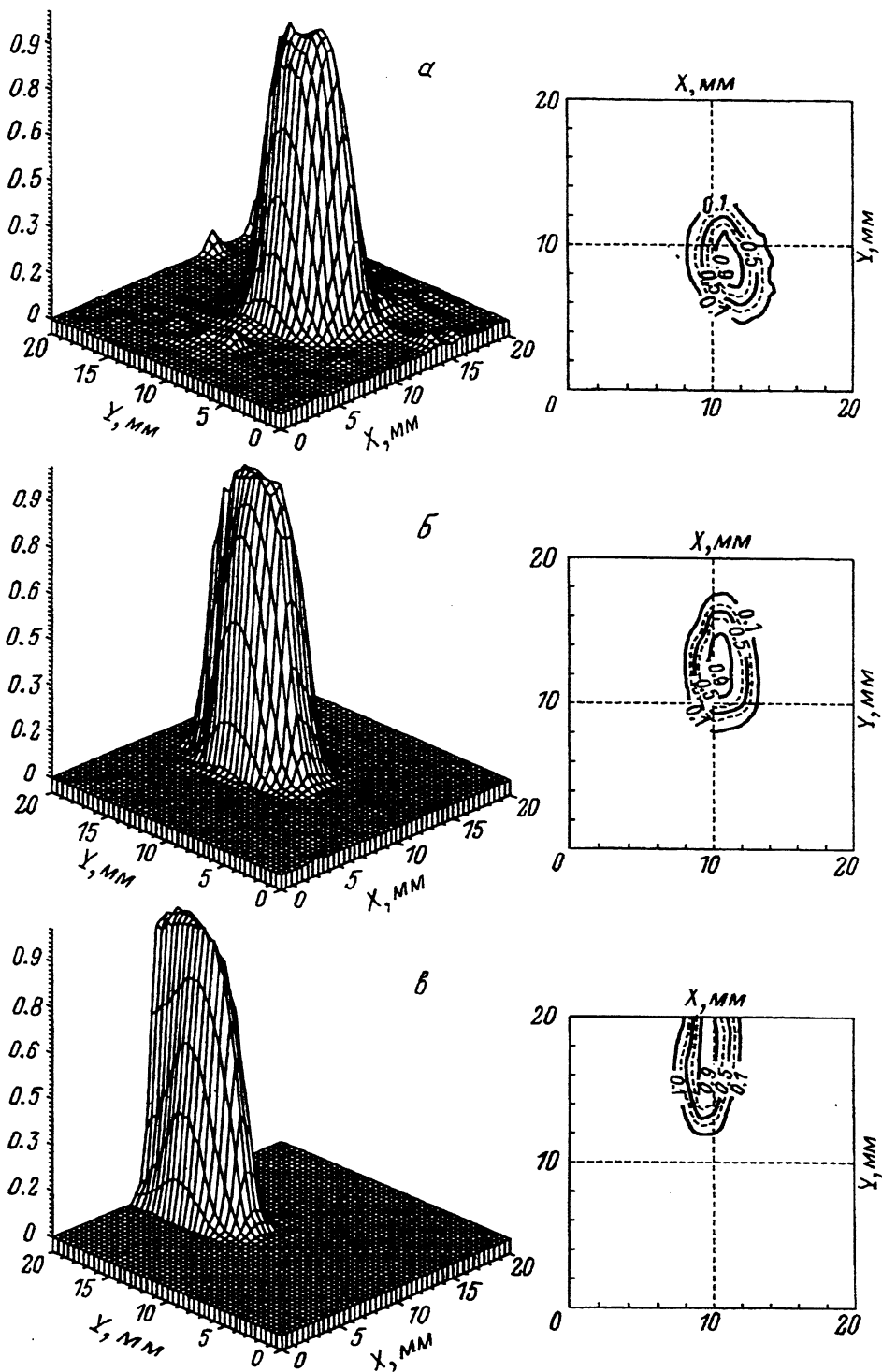


Рис. 2. Амплитудное распределение по сечению УЗ пучка на расстоянии 55 см от выходной грани дефлектора при управляющем напряжении 0 (*a*), 3 (*b*) и 5 кВ (*c*).

для фиксированного сечения поддерживалась постоянной. На рис. 2 приведен также вид сечений трехмерного амплитудного распределения акустического поля поверхностями равных интенсивностей.

На рис. 2 видна зависимость пространственного распределения ультразвукового пучка от величины внешнего управляющего напряжения. При этом общая структура акустического поля, определяемая диаграммой направленности пьезопреобразователя, сглаживается (рис. 2,б). Побочные лепестки диаграммы направленности уменьшаются, а центральный максимум становится более равномерным. При напряжении 5 кВ (рис. 2,в) мы имеем почти гладкое распределение акустического поля с одним центральным максимумом. Аналогичный вид трансформации ультразвукового пучка наблюдался и при исследовании управляемых сферических линз [2].

Из характера распределений УЗ поля видно, что с увеличением управляющего напряжения происходит смещение УЗ пучка в сторону цилиндрического электрода. Так, на расстоянии 55 см смещение по максимуму пучка составляет 8 мм при напряжении внешнего поля 5 кВ (рис. 2,в), что соответствует углу отклонения 53 угл.мин. Полученная экспериментально величина углового смещения УЗ пучка хорошо согласуется с численными оценками, проведенными по формуле (8). Все это свидетельствует об управляемом отклонении УЗ пучка во внешнем неоднородном электрическом поле и возможности создания градиентных электроакустических дефлекторов. Перспективы создания управляемых электроакустических дефлекторов для высокочастотных УЗ пучков связаны с получением новых высокоэффективных электрострикционных материалов.

Настоящая работа поддержана Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь.

Список литературы

- [1] Белый В.Н., Северук Б.Б. // Кристаллография. 1983. Т. 28. № 5. С. 925.
- [2] Белый В.Г., Казак Н.С., Мащенко А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 13. С. 55.
- [3] Гусак Н.А., Мащенко А.Г., Филиппов В.В. А.С. № 902863 СССР. МКИ В 06 3/14. Устройство для управления ультразвуковыми пучками. 2 с.
- [4] Бражкин Ю.А., Коробов А.И., Лямов В.Е. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 57. С. 1545.
- [5] Пекар С.И., Демиденко А.А., Здебский А.П. и др. // ДАН СССР. 1976. Т. 230. № 5. С. 1089.
- [6] Жабитенко Н.К., Кучеров И.Я. // УФЖ. 1978. Т. 23. № 2. С. 263.

