10. *Ю. И. Неронов, Г. М. Драбкин.* Исследование методом спинового эха водных растворов неэлектролитов. В сб.: Структура и роль воды в живом организме. Изд-во ЛГУ, 1966, 1, 132—138.
11. *П. Круус, Л. К. Кудряшова, И. Г. Михайлов, В. П. Романов.* Поглощение ультразвука в системе третичный бутиловый спирт — вода. Акуст. ж., 1973, *19*, 1, 114—117.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова
Физический факультет
Научно-исследовательский физический институт

Поступила
22 августа 1974 г.

УДК 534.24—16

ЯВЛЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА

Л. М. Лямшев, Н. С. Шевяхов

Пьезоэлектрические свойства материала оказывают на процесс отражения ультразвуковых волн кристаллом не менее существенное влияние, чем чисто упругие свойства. В частности, в работе [1] рассматривалось отражение плоской монохроматической сдвиговой волны с вектором смещения $U \| C_6(C_4)$ от свободной границы пьезоэлектрика класса $C_{6V}(C_{4V})$ и было показано, что вследствие пьезосвойств у границы кристалла в дополнение к отраженной сдвиговой волне возникают (по обе стороны от границы) неоднородные волны электрического поля. Эти волны циркулярно поляризованы в плоскости (001), совпадающей с плоскостью падения, и вызывают сдвиг по фазе в отраженной волне на величину

$$\varphi_R = \operatorname{arctg} \frac{2(1+\varepsilon)\mathcal{K}^2 k_x (k^2-k_x^2)^{-1/2}}{(1+\varepsilon)^2 - \mathcal{K}^4 k_x^2 (k^2-k_x^2)^{-1}}, \tag{1}$$

где $\mathcal{K}^2 = \frac{4\pi\beta^2}{\varepsilon\lambda}\left(1+\frac{4\pi\beta^2}{\varepsilon\lambda}\right)^{-1}$ – квадрат коэффициента электромеханической связи, $\beta=\beta_{x,xz}$, $\lambda=\lambda_{xzxz}$ и $\varepsilon=\varepsilon_{xx}$ – пьезоэлектрический, упругий и диэлектрический модуль кристалла, $k=\left[\rho\omega^2 \Big/ \left(\lambda+\frac{4\pi\beta^2}{\varepsilon}\right)\right]^{1/2}$ – волновое число сдвиговой волны, k_x – проекция волнового вектора падающей волны на границу, ρ – плотность кристалла, ω – частота.

В условиях эксперимента приходится иметь дело не с монохроматическими волнами, а с ограниченными ультразвуковыми пучками.

Как известно [2], характерной особенностью отражения ультразвуковых пучков является наличие смещения пучка вдоль границы при отражении. Величина смещения ультразвукового пучка, образованного монохроматическими волнами, зависимость от времени t в которых определяется множителем вида $\exp(-i\omega t)$, может быть найдена по формуле (см. [2])

$$\Delta = -\left(\frac{\partial\varphi_R}{\partial k_x}\right)_{k_x=k\sin\theta}, \tag{2}$$

где θ – угол падения пучка (см. фигуру, *а*).

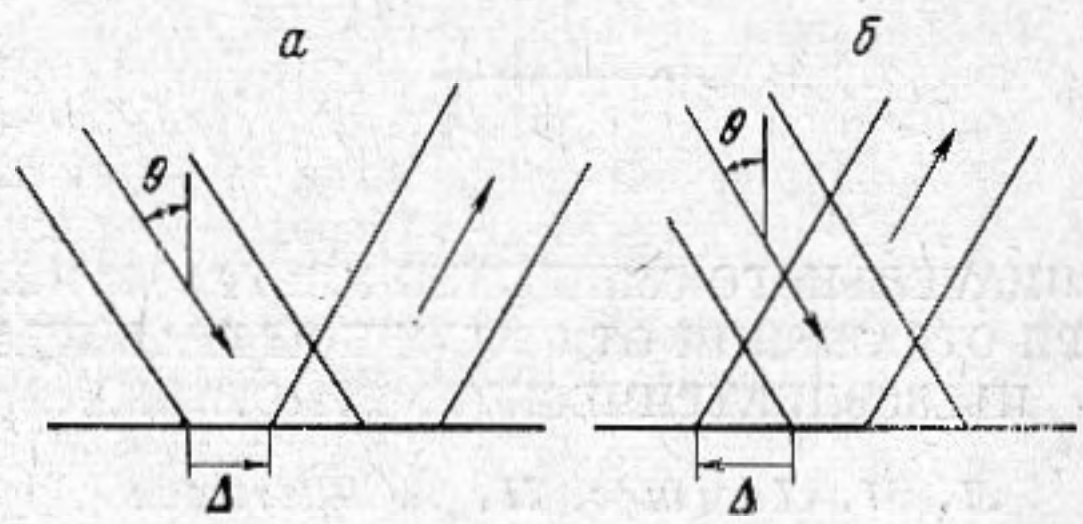
Подставляя (1) в (2), получаем после преобразований следующее выражение:

$$\Delta = -\frac{2\mathcal{K}^2(1+\varepsilon)^{-1}}{k\cos^3\theta}\left[1+\mathcal{K}^4\operatorname{tg}^2\theta/(1+\varepsilon)^2\right]^{-1}. \tag{3}$$

Формула (3) показывает, что в отличие от ранее изученных случаев отражения ультразвуковых пучков от границы жидкость – твердое тело, жидкость – упругий слой и жидкость – жидкость (см. [2–4]), которым соответствует картина смещения пучка, изображенная на фигуре *а*, смещение образованного сдвиговыми волнами пучка, отраженного от свободной границы пьезокристалла, происходит в противопо-

ложном направлении (см. фигуру, *б*). Подобный вид смещения пучков, который можно назвать отрицательным смещением, не был известен ранее в акустике. Однако следует отметить, что в оптике [5] уже указывалось на возможность отрицательного смещения при отражении *H*-поляризованного светового пучка от поглощаемого материала.

В рассматриваемом здесь случае отрицательное смещение обусловлено протеканием у границы кристалла сложных интерференционных явлений, сопровождающихся циклическим обращением части энергии между упругими волнами и неоднородными волнами электрического поля. При этом основная роль, по-видимому, принадле-



жит неоднородным волнам электрического поля, возникающим в самом кристалле. Этим, в частности, можно объяснить тот факт, что при отражении пучка от свободной металлизированной границы пьезокристалла* величина отрицательного смещения практически не изменяется. Она может быть вычислена по формуле (3), если произвести замену: $(1+\varepsilon)\to 1$.

Отрицательное смещение может иметь место и при более общих случаях ориентации плоскости падения сдвиговых волн, образующих пучок. Однако при этом необходимо иметь в виду, что в общем случае у границы кристалла будут возникать неоднородные волны не только электрического, но и упругого поля, взаимно конкурирующие друг с другом. Причем если доминирующая роль в процессе циклического обращения энергии между упругими волнами и неоднородными волнами смешанного упругоэлектрического поля будет принадлежать неоднородным волнам электрического поля, то $\Delta<0$. Наоборот, при доминирующем значении неоднородных волн упругого поля $\Delta>0$.

Величина отрицательного смещения невелика и примерно в $1/\mathscr{K}^2$ раз меньше ($\mathscr{K}^2\ll 1$) известного смещения ультразвукового пучка [3, 4]. Несмотря на это, полностью игнорировать рассматриваемое явление, по-видимому, нельзя, особенно в тех случаях, когда приходится иметь дело с многократно отраженными пучками. Можно также надеяться, что предсказываемое явление будет обнаружено экспериментально, например при изучении отражения ультразвукового пучка, испытывающего многократное отражение от границ пьезоэлектрика с достаточно высоким значением коэффициента электромеханической связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. Н. Любимов.* Особенности отражения упругих волн в гексагональных и тетрагональных пьезоэлектриках. Кристаллография, 1971, *16*, 3, 563—567.
2. *Л. М. Бреховских.* Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957.
3. *A. Schoch.* Der Schalldurchgang durch Platten. Acustica, 1952, *2*, 1, 1—17.
4. *A. Schoch.* Seitliche Versetzung eines total reflektierten Strahles bei Ultraschallwellen. Acustica, 1952, *2*, 1, 18—19.
5. *H. Lotsch.* Beam displacement at total reflection: the Goos-Hänchen effect. III. Optik, 1971, *32*, 4, 229—319.

Акустический институт
Академии наук СССР
Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарева

Поступила
30 сентября 1974 г.

* В этом случае неоднородные волны электрического поля возникают только в кристалле.