

# Краткие сообщения

06;08

## Аномальный резистоакустический эффект в структуре пьезоэлектрик–проводящая жидкость

© Б.Д. Зайцев,<sup>1</sup> И.Е. Кузнецова,<sup>1</sup> С.Г. Джоши<sup>2</sup><sup>1</sup> Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН, 410019 Саратов, Россия<sup>2</sup> Marquette University, Milwaukee, WI 53201-1881, USA  
e-mail: zaitsev@ire.san.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2000 г.)

Теоретически предсказано существование аномального резистоакустического эффекта при распространении поверхностной акустической волны Гуляева–Блюстейна в структуре пьезоэлектрик–проводящая жидкость. Обнаружено, что с ростом проводимости жидкости скорость волны увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается. Величина положительного изменения скорости волны растет с уменьшением диэлектрической проницаемости жидкости  $\varepsilon^{lq}$  и может достигать 6% для ниобата калия при  $\varepsilon^{lq} = 2.5$ . Показано, что существует критическое значение локализации волны, при превышении которого аномальный резистоакустический эффект в такой структуре исчезает.

Как известно [1], нормальный резистоакустический эффект заключается в том, что при увеличении проводимости тонкого поверхностного слоя, нанесенного на пьезоэлектрик, скорость поверхностных акустических волн монотонно уменьшается и величина максимального изменения скорости  $(\Delta v/v)$  однозначно связана с коэффициентом электромеханической связи волны. Что касается внесенного затухания как функции проводимости, то оно имеет характерный максимум и обращается в нуль, когда слой близок к идеальному диэлектрику или проводнику. Аналогичные зависимости наблюдались в структуре пьезоэлектрик–проводящая жидкость [2]. Однако недавно было теоретически предсказано [3], что в случае слабонеоднородных акустических волн, таких как волна Гуляева–Блюстейна и волна Лява, существует интервал проводимости тонкого поверхностного слоя, в котором скорость этих волн вначале увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается. Этот эффект, названный аномальным резистоакустическим эффектом, может существовать во всех пьезоэлектриках, причем величина максимального положительного изменения скорости растет с увеличением коэффициента электромеханической связи материала. Было установлено, что аномальный резистоакустический эффект существует, если глубина локализации поверхностной волны превышает некоторое критическое значение [3]. Поэтому указанный эффект не наблюдается для сильно локализованной поверхностной волны Рэлея [1,3]. Что касается внесенного затухания, то его поведение ничем не отличается от случая нормального резистоакустического эффекта. Интервал проводимостей, соответствующий значительному положительному изменению скорости, оказался столь узким, что в нашей работе [4], посвященной исследованию влияния тонких

проводящих слоев на характеристики акустических волн в ниобате калия, мы его попросту не заметили.

По всей видимости, аномальный эффект может существовать и в других ситуациях с проводящими слоями, влияющими на глубину локализации слабонеоднородных волн, распространяющихся в пьезоэлектриках. С этой точки зрения особый интерес представляют поверхностные акустические волны, распространяющиеся вдоль границы пьезоэлектрик–проводящая жидкость, теоретическому изучению которых и посвящена настоящая работа.

Проанализируем распространение акустической волны в структуре пьезоэлектрик–проводящая жидкость. Направим ось  $x_3$  в глубь пьезокристалла, который занимает полупространство  $x_3 > 0$ , а жидкость в этом случае пусть находится в области  $x_3 < 0$ . Запишем уравнения движения для пьезоэлектрической среды и жидкости

$$\rho^s \frac{\partial^2 u_i^p}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}^p}{\partial x_j}, \quad \rho^{lq} \frac{\partial^2 u_i^{lq}}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}^{lq}}{\partial x_j}, \quad (1), (2)$$

где  $u_i^p, u_i^{lq}$  — смещение частиц;  $x_j$  — пространственные координаты;  $t$  — время;  $T_{ij}^p, T_{ij}^{lq}$  — механическое напряжение;  $\rho^p, \rho^{lq}$  — плотность; индексы  $p$  и  $lq$  относятся к пьезоэлектрической среде и жидкости соответственно.

Запишем уравнение Лапласа для пьезоэлектрической среды, а также уравнение Пуассона и сохранения электрического заряда для проводящей жидкости

$$\operatorname{div} \mathbf{D}^p = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{D}^{lq} = \delta^{lq}, \quad \frac{\partial J_i^{lq}}{\partial x_i} + \frac{\partial \delta^{lq}}{\partial t} = 0. \quad (3)-(5)$$

Здесь  $\mathbf{D}^p, \mathbf{D}^{lq}$  — электрическая индукция;  $\delta^{lq}$  — плотность объемного заряда;  $J_i^{lq}$  —  $i$ -я компонента плотности

электрического тока. И наконец, запишем материальные уравнения для анизотропной пьезоэлектрической среды

$$T_{ij}^p = C_{ijkl}^p \frac{\partial^2 u_l^p}{\partial x_k^2} + e_{kij}^p \frac{\partial \Phi^p}{\partial x_k}, \quad (6)$$

$$D_j^p = -\varepsilon_{jk}^p \frac{\partial \Phi^p}{\partial x_k} + e_{jlk}^p \frac{\partial u_l^p}{\partial x_k} \quad (7)$$

и для изотропной жидкости

$$T_{ij}^{lp} = C_{ijkl}^{lq} \frac{\partial^2 u_l^{lq}}{\partial x_k^2}, \quad (8)$$

$$D_j^{lq} = -\varepsilon^{lq} \frac{\partial \Phi^{lq}}{\partial x_j}, \quad (9)$$

$$J_i^{lq} = -\sigma^{lq} \frac{\partial \Phi^{lq}}{\partial x_i} + d^{lq} \frac{\partial \delta^{lq}}{\partial x_i}, \quad (10)$$

где  $\Phi^p$ ,  $\Phi^{lq}$  — электрический потенциал;  $C_{ijkl}^p$ ,  $C_{ijkl}^{lq}$  — упругие постоянные;  $e_{kij}^p$  — пьезоконстанты;  $\varepsilon_{jk}^p$ ,  $\varepsilon^{lq}$  — диэлектрическая проницаемость;  $\sigma^{lq}$  — объемная проводимость;  $d^{lq}$  — коэффициент диффузии.

Механические граничные условия на границе раздела в предположении отсутствия вязкости жидкости, учитывающие непрерывность только нормальных компонент смещения и механического напряжения, были записаны в следующей форме:

$$u_3^p = u_3^{lq}, \quad T_{13}^p = T_{23}^p = 0, \quad T_{33}^p = T_{33}^{lq}. \quad (11)$$

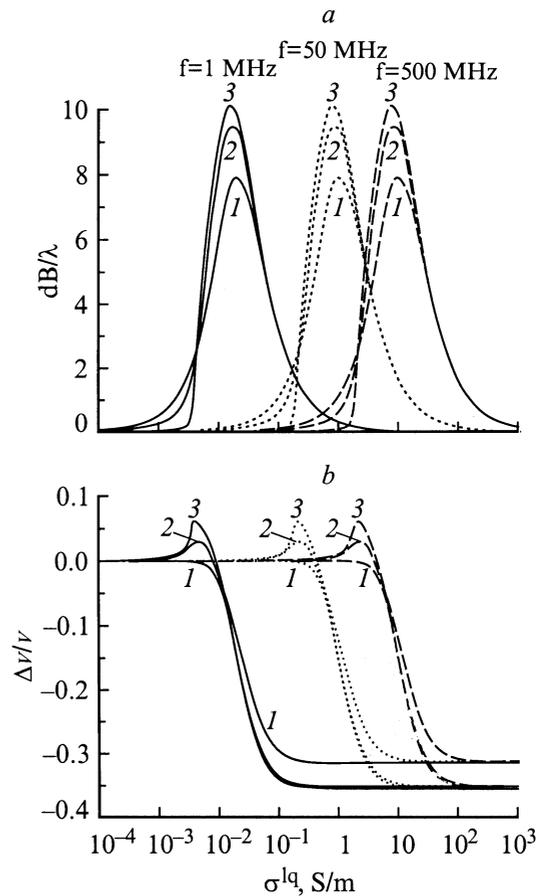
Соответствующие электрические граничные условия в предположении отсутствия поверхностного заряда и нормальной компоненты тока проводимости на границе раздела имели следующий вид:

$$\Phi^p = \Phi^{lq} = \Phi_0, \quad D_3^p = D_3^{lq}, \quad J_3^{lq} = 0, \quad (12)$$

где  $\Phi_0$  — потенциал в плоскости  $x_3 = 0$ .

Для решения указанных уравнений совместно с граничными условиями использовался метод, аналогичный описанному в [5]. В качестве пьезоэлектрика был выбран ниобат калия, который обладает сильным пьезоэффектом [6]. Необходимые для расчета материальные константы были взяты из [7]. Анализ показал, что для волны Рэлея при изменении упругих и электрических свойств жидкости в широких пределах всегда наблюдается нормальный резистоакустический эффект. Аномальный резистоакустический эффект был обнаружен в случае волны Гуляева–Блюстейна, которая распространяется вдоль оси  $X$  на  $Y$ -срезе ниобата калия [8]. В этом случае упругие свойства жидкости не влияют на характеристики волны. Поэтому было исследовано влияние диэлектрической проницаемости и проводимости жидкости на скорость и затухание волны Гуляева–Блюстейна.

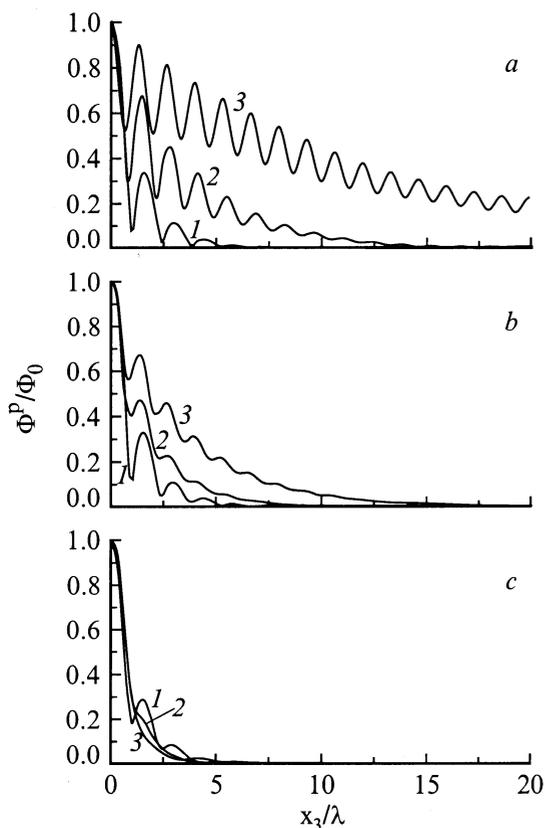
На рис. 1 представлены зависимости затухания (а) и относительного изменения скорости (b) волны Гуляева–Блюстейна от проводимости жидкости для различных



**Рис. 1.** Зависимости затухания (а) и относительного изменения скорости (b) волны Гуляева–Блюстейна от проводимости жидкости для  $\varepsilon^{lq} = 80$  (1), 20 (2), 2,5 (3) и для частот 1 (сплошная кривая), 50 (пунктир), 500 МГц (штриховая кривая).

значений ее диэлектрической проницаемости  $\varepsilon^{lq}$  и частоты акустической волны. Из рис. 1, а видно, что затухание волны ведет себя традиционным образом и с уменьшением диэлектрической проницаемости жидкости оно возрастает. Это связано с увеличением эффективного коэффициента электромеханической связи при уменьшении диэлектрической проницаемости жидкости [9]. Что касается скорости акустической волны (рис. 1, b), то с ростом проводимости она увеличивается, достигая максимума, а затем падает, т. е. наблюдается ярко выраженный аномальный резистоакустический эффект. Видно, что с уменьшением диэлектрической проницаемости максимальная величина положительного изменения скорости  $(\Delta v/v)_{\max}^+$  увеличивается и может достигать 6% при  $\varepsilon^{lq} = 2.5$ . Следует также отметить, что с увеличением частоты акустической волны область проводимости  $\sigma^{lq}$ , в которой наблюдается аномальный резистоакустический эффект, смещается в сторону больших значений проводимости жидкости.

На рис. 2 представлены зависимости нормированной амплитуды электрического потенциала в ниобате калия



**Рис. 2.** Зависимости нормированной амплитуды электрического потенциала волны Гуляева–Блюстейна в ниобате калия от координаты  $x_3$ , для нормированной на длину волны для  $\varepsilon^{lq} = 80$  (1),  $\varepsilon^{lq} = 20$  (2),  $\varepsilon^{lq} = 2.5$  (3) и для  $\sigma^{lq} = \sigma_1$  (a),  $\sigma^{lq} = \sigma_{\max}^{lq}$  (b),  $\sigma^{lq} = \sigma_2$  (c).

от координаты  $x_3$ , нормированной на длину волны при различных значениях диэлектрической проницаемости и проводимости жидкости для частот 1 МГц. Изменение потенциала с глубиной было рассчитано для проводимостей жидкости  $\sigma_1$  (a),  $\sigma_{\max}$  (b) и  $\sigma_2$  (c) соответствующих следующим значениям относительного изменения скорости  $(\Delta v/v)_{\max}^+/2$ ,  $(\Delta v/v)_{\max}^+$  и  $-(\Delta v/v)_{\max}^+$  соответственно. При этом для  $\sigma_2$  резистоакустический эффект становится нормальным. Таким образом, рис. 2 показывает, что, как и в случае структуры с тонким проводящим слоем [3], существует критическое значение локализации волны, при превышении которого аномальный резистоакустический эффект исчезает. При этом глубина проникновения волны увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости жидкости. Следует также отметить, что зависимость амплитуды потенциала от координаты  $x_3$  имеет осциллирующий характер, что находится в хорошем соответствии с работой [8]. С ростом проводимости жидкости амплитуда пульсаций уменьшается.

Таким образом, в работе показано, что в случае распространения слабонеоднородных волн в пьезокристалле, граничащем с проводящей жидкостью, возможно су-

ществование аномального резистоакустического эффекта. Этот эффект является фундаментальным свойством слабонеоднородных поверхностных акустических волн и может служить критерием, позволяющим на практике распознавать волны указанного типа.

Материалы статьи получены при поддержке гранта РФФИ (№ 01-02-16266) и гранта National Science Foundation (USA).

## Список литературы

- [1] *Wixforth A., Scriba J., Wassermeier M. et al.* // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 40. N 11. P. 7874–7887.
- [2] *Furukawa S., Obaba M., Nomura T.* // IEEE Ultrasonic Symp. 1996. P. 599–602.
- [3] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G.* // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 86. N 12. P. 6868–6874.
- [4] *Гуляев Ю.В., Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д. и др.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 8. С. 21–26.
- [5] *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Нефедов И.С.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 4. С. 60–64.
- [6] *Yamanouchi K., Odagawa H., Kojimi T. et al.* // Electron. Lett. 1997. Vol. 33. N 3. P. 193–194.
- [7] *Zgonik M., Schlessler R., Biaggio I. et al.* // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. N 2. P. 1287–1297.
- [8] *Nakamura K., Oshiki M.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. N 22. P. 3203–3205.
- [9] *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.