

06;08

## Влияние тонкого слоя с произвольной проводимостью на характеристики акустических волн в ниобате калия

© Ю.В. Гуляев, И.Е. Кузнецова,  
Б.Д. Зайцев, С.Г. Джоши, И.А. Бородина

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН  
Marquette University, Milwaukee, WI 53201, USA

Поступило в Редакцию 10 декабря 1998 г.

Теоретически исследовано влияние тонкого слоя произвольной проводимости на характеристики акустических волн в ниобате калия. Показано, что проводимость тонкого слоя на поверхности кристалла или пластины ниобата калия существенно влияет на затухание и скорость как симметричных волн Лэмба и квазипоперечных волн, так и волн Гуляева–Блюстейна. Обнаружено, что путем изменения поверхностной проводимости можно добиться относительного изменения скорости до 50% для квазипоперечных волн. Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительной перспективности ниобата калия для создания акустоэлектронных устройств с управляемыми характеристиками.

В последнее время появились публикации, посвященные исследованию характеристик как поверхностных акустических волн (ПАВ) [1], так и волн в тонких пластинах ниобата калия ( $\text{KNbO}_3$ ) [2]. Этот новый акустических материал обладает очень высокими пьезоэлектрическими, электрооптическими и нелинейными оптическими коэффициентами [3]. В работе [1] показано, что в  $X$  направлении  $Y$ -среза кристалла  $\text{KNbO}_3$  квадрат коэффициента электромеханической связи  $K^2$  поверхностной волны имеет величину 53%, что примерно в 10 раз больше соответствующего параметра для  $\text{LiNbO}_3$ . Как известно [4], тонкий проводящий слой оказывает влияние на характеристики поверхностных акустических волн, причем его эффективность зависит от коэффициента электромеханической связи волны. При исследовании квазипоперечных волн ( $QSH$ ), симметричных ( $S_0$ ) и антисимметричных ( $A_0$ ) волн Лэмба, распространяющихся в тонких пластинах ниобата калия, авторами данной работы было обнаружено, что  $K^2$  может достигать величины 100, 60 и 20%

соответственно [2]. При таких больших значениях коэффициента электромеханической связи можно ожидать, что проводимость тонкого слоя на поверхности  $\text{KNbO}_3$  будет оказывать более существенное влияние на характеристики акустических волн, чем для других менее пьезоактивных кристаллов. Изучению именно этой проблемы и посвящена данная работа.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что волна с  $K^2 = 53\%$ , распространяющаяся в  $X$ -направлении  $Y$ -среза, является слабонеоднородной волной Гуляева–Блюстейна (ВГБ), а не волной Рэлея, как сообщалось в [1]. В настоящей работе проведен теоретический анализ влияния тонкого слоя произвольной проводимости на затухание и скорость ВГБ,  $QSH$ -волн и симметричных волн Лэмба в ниобате калия.

Для решения задачи использовались стандартные уравнения движения упругой среды и уравнение Лапласа:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} + e_{kij} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j \partial x_k}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{jk} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j \partial x_k} - e_{jlk} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} = 0, \quad (2)$$

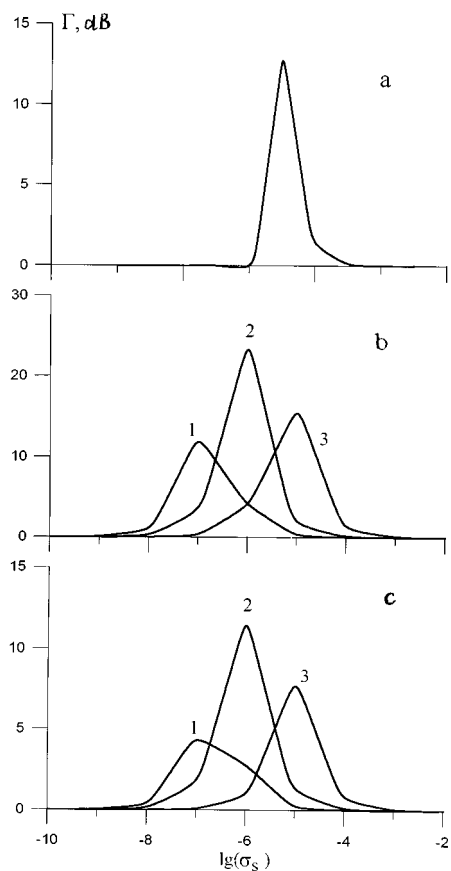
где  $u_i$  — смещение частиц в среде;  $x_j$  — пространственные координаты;  $t$  — время;  $\Phi$  — электрический потенциал;  $\rho$  — плотность среды;  $C_{ijkl}$ ,  $e_{kij}$ ,  $\varepsilon_{jk}$  — упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные среды соответственно.

Волна распространялась вдоль оси  $x_1$ , ось  $x_3$  была направлена в глубь среды. Необходимые для расчетов материальные константы ниобата калия были взяты из [3].

При анализе распространения ВГБ в полубесконечном кристалле с тонким слоем произвольной проводимости на поверхности механическим и электрическими граничными условиями являлись равенство нулю механических напряжений, непрерывность электрического потенциала и скачок нормальной компоненты индукции за счет поверхностного заряда  $\delta$  на свободной границе с вакуумом:

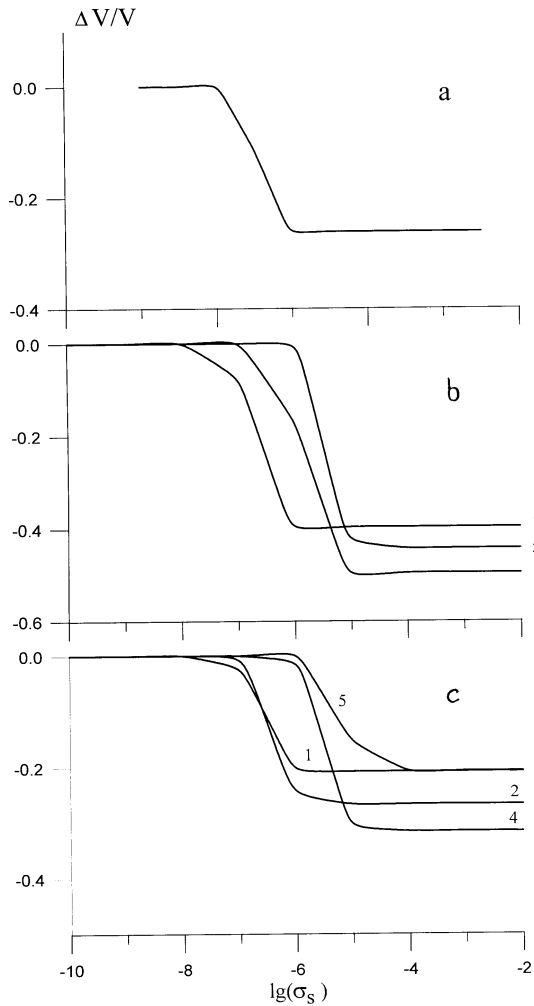
$$\delta = -\sigma_s i \omega \Phi / V^2,$$

где  $\sigma_s$  — поверхностная проводимость;  $i$  — мнимая единица;  $\omega$ ,  $V$  — частота и скорость акустической волны.



**Рис. 1.** Зависимость затухания акустических волн от поверхностной проводимости: *a* — волна Гуляева–Блюштейна ( $\phi = 0^\circ$ ,  $Y$  — срез), *b* — *QSH*-волна ( $\phi = 0^\circ$ ,  $Y$  — срез) и *c* —  $S_0$ -волна ( $\phi = 50^\circ$ ,  $Y$  — срез). 1 —  $h/\lambda = 0.01$ , 2 —  $h/\lambda = 0.05$ , 3 —  $h/\lambda = 0.5$ .

При анализе же распространения акустических волн в пластине к этим граничным условиям добавлялись условия для второй границы с вакуумом. Поскольку на этой границе отсутствует тонкий проводящий слой, то нормальная компонента индукции считалась непрерывной, а



**Рис. 2.** Зависимость относительного изменения скорости акустических волн от поверхностной проводимости: *a* — волна Гуляева–Блюстейна ( $\phi = 0^\circ$ ,  $Y$  — срез), *b* — *QSH*-волна ( $\phi = 0^\circ$ ,  $Y$  — срез) и *c* —  $S_0$ -волна ( $\phi = 50^\circ$ ,  $Y$  — срез). 1 —  $h/\lambda = 0.01$ , 2 —  $h/\lambda = 0.025$ , 3 —  $h/\lambda = 0.1$ , 4 —  $h/\lambda = 0.25$ , 5 —  $h/\lambda = 0.5$ .

остальные условия считались одинаковыми с условиями на первой границе. Записанная система уравнений совместно с граничными условиями решалась известным методом [5].

В результате проведенных расчетов были получены зависимости затухания волны Гуляева–Блюстейна (рис. 1, *a*), квазипоперечной волны (рис. 1, *b*) и симметричной волны Лэмба (рис. 1, *c*) от поверхностной проводимости тонкого слоя на границе для направлений, характеризующихся наибольшим коэффициентом электромеханической связи. Для *QSH*- и  $S_0$ -волн анализ проводился для разных толщин пластины ниобата калия  $h/\lambda$  ( $h$  — толщина пластины,  $\lambda$  — длина акустической волны).

Наблюдаемые на рисунке максимум поглощения связан с тем, что при малых значениях поверхностной проводимости слой не оказывает никакого влияния на акустическую волну и не вносит затухания, а при больших  $\sigma_s$  слой становится идеальным проводником.

На рис. 2 приведены зависимости относительного изменения скорости ВГБ (*a*), *QSH*-волны (*b*) и  $S_0$ -волны Лэмба (*c*) от величины проводимости тонкого слоя  $\sigma_s$  на поверхности ниобата калия.

Видно, что с увеличением проводимости скорость акустических волн уменьшается и при некоторой величине  $\sigma_s$  достигает насыщения. Причем максимальное значение изменения скорости соответствует коэффициенту электромеханической связи.

Таким образом, исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод о возможности создания акустоэлектронных устройств с управляемыми характеристиками. Причем при реализации устройств в низкочастотном диапазоне можно использовать волны в пластинах, а при переходе в высокочастотный могут быть использованы поверхностные акустические волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы" по проекту 696.3 и поддержана грантом NSF.

## Список литературы

- [1] *Yamanouchi K., Odagawa H., Kojima T., Matsunura T.* // *Electronic Letters*. 1997. V. 33. N 3. P. 193.
- [2] *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S., Borodina I.A.* // *Electronic Letters*. 1998. V. 34. N 23.

- [3] *Zgonik M., Schlessesser R., Biaggio I. et al. // Appl. Phys. 1993. V. 74. N 2. P. 1287–1297.*
- [4] *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Нефедов И.С. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. N 4. С. 60–64.*
- [5] *Балакирев М.К., Гилинский И.А. Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. 237 с.*