

01;08

## **Влияние металлизации на угол между фазовой скоростью и скоростью переноса энергии $SH_0$ -волн в тонких пьезоэлектрических пластинах**

© И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев, А.А. Теплых, С.Г. Джоши

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН,  
Россия  
Marquette University, EECE Dept., Milwaukee, WI 53201-1881, USA  
E-mail: iren@ire.san.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2006 г.

Теоретически исследована анизотропия угла между фазовой и групповой скоростью (PFA) для поперечно-горизонтальных ( $SH_0$ ) волн в тонких пластинах ниобата лития и ниобата калия. Исследовано также влияние электрических граничных условий на величину указанного угла. Обнаружены кристаллографические ориентации в ниобате лития и ниобате калия, при которых величина PFA исследуемых волн составляет 17 и 48° соответственно. Показано также, что металлизация поверхности пластины может приводить к изменению этого угла на 18 и 55° для пластин  $Y-X+25^\circ$  ниобата лития и ниобата калия соответственно.

PACS: 43.20.+g

**1. Введение.** Как известно, угол между направлением распространения волны и направлением переноса ее энергии (PFA) является важным параметром при разработке различных акустоэлектронных устройств [1]. Величина этого угла для различных типов поверхностных (ПАВ) и объемных (ОАВ) акустических волн в пьезоэлектрических материалах приведена во многих работах [2,3]. Следует также отметить, что в последнее время большой интерес исследователей вызывают поперечно-горизонтальные ( $SH_0$ ) волны в тонких по сравнению с длиной волны пьезоэлектрических пластинах [4,5]. Эти волны характеризуются более высоким по сравнению с ПАВ

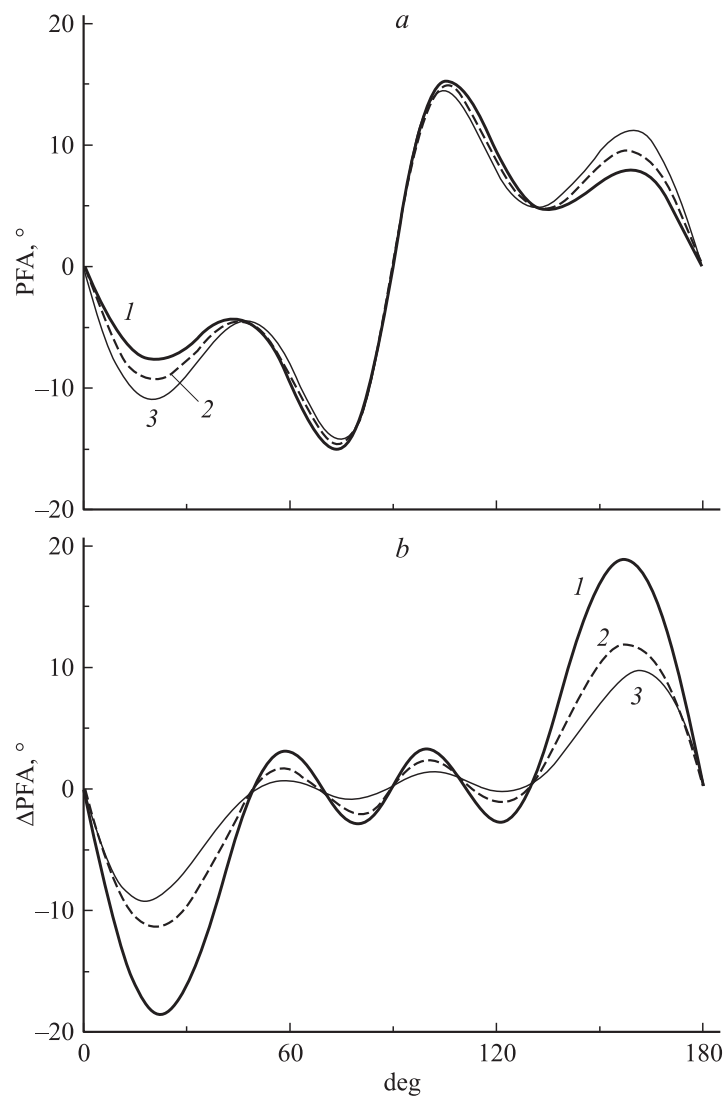
значением коэффициента электромеханической связи в одном и том же материале, что позволяет использовать их при создании различных высокочувствительных датчиков. Кроме того, было показано, что характеристики этих волн сильно зависят от электрических граничных условий на поверхности пластины [6]. Однако сведения о PFA для данных волн в настоящее время практически отсутствуют, а исследование влияния электрических граничных условий на этот угол вообще не проводилось. В связи с этим в данной работе было проведено теоретическое исследование анизотропии PFA  $\text{SH}_0$ -волн в тонких пьезоэлектрических пластинах ниобата лития и ниобата калия. Кроме того, было исследовано влияние металлизации на величину данного угла.

**2. Результаты теоретического анализа.** Для решения поставленной задачи были записаны уравнения движения, уравнение Лапласа, материальные уравнения для среды и соответствующие граничные условия [7]. Данная граничная задача решалась стандартным численным методом, описанным в [7]. В результате находились значения фазовой скорости, а также собственные значения и собственные вектора для восьми парциальных волн, из которых состоит акустическая волна в пьезоэлектрической пластине. Эти данные позволили вычислить распределение механических смещений  $u_i$  и электрического потенциала  $\Phi$  по толщине пластины.

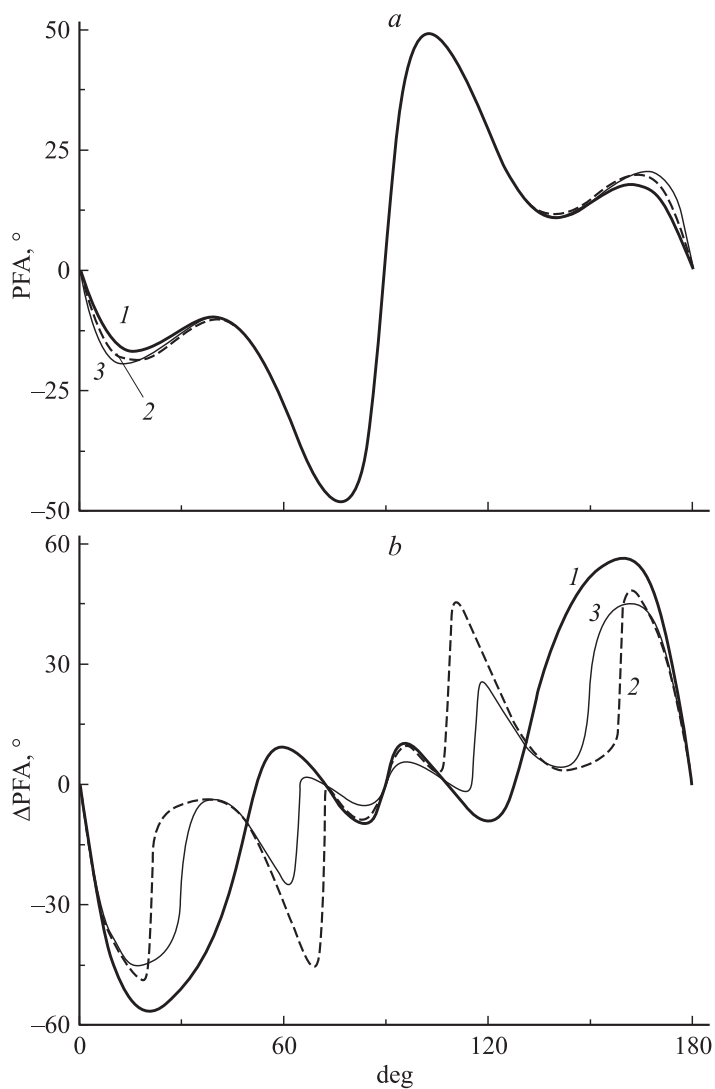
В соответствии с [7] величина PFA определялась как угол между фазовой и групповой скоростью или скоростью переноса энергии акустической волны. В нашем случае вектор фазовой скорости совпадает с направлением распространения волны, а направление переноса энергии определяется вектором Пойтинга  $P$ :

$$P_i = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_0^h (T_{ij}^* \partial u_j / \partial t) dx_3 + \int_{-\infty}^{+\infty} (\Phi^* \partial D_i / \partial t) dx_3 \right\}, \quad (1)$$

который в общем случае имеет три ненулевые компоненты. Здесь  $T_{ij}$  — тензор механических напряжений,  $D_i$  — электрическая индукция,  $t$  — время, \* означает комплексное сопряжение. В нашем случае волна бежит вдоль оси  $x_1$ , а нормаль к границе раздела сред соответствует оси  $x_3$ . Следует отметить, что поскольку поток мощности волны не



**Рис. 1.** Зависимость угла между фазовой и групповой скоростью (PFA) (*a*) и его изменения ( $\Delta PFA$ ) при металлизации поверхности пластины (*b*) от направления распространения  $SH_0$ -волны для  $Y$ -среза ниобата лития при различных значениях параметра  $hf = 500$  (1), 1500 (2) и 3000 м/с (3).



**Рис. 2.** Зависимость угла между фазовой и групповой скоростью (PFA) (a) и его изменения ( $\Delta PFA$ ) при металлизации поверхности пластины (b) от направления распространения  $SH_0$ -волны для Y-среза ниобата калия при различных значениях параметра  $hf = 500$  (1), 1500 (2) и 3000 м/с (3).

может пересекать границы пластины, то компонента  $P_3 \equiv 0$ . В связи с вышесказанным величина PFA определялась как

$$\text{PFA} = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{P_2}{P_1} \right). \quad (2)$$

В результате проведенных расчетов были получены зависимости PFA для поперечно-горизонтальных  $\text{SH}_0$ -волн в электрически открытых пластинах ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  и ниобата калия  $\text{KNbO}_3$  от направления распространения волны. Были рассмотрены основные кристаллографические срезы X, Y и Z указанных материалов при различных значениях параметра  $hf$  ( $h$  — толщина пластины,  $f$  — частота волны). Кроме того, были рассчитаны зависимости PFA от направления распространения волны в вышеуказанных срезах и материалах в случае одной электрически закороченной поверхности пластины. Наряду с данными расчетами проводился также расчет анизотропии коэффициента электромеханической связи указанных волн.

Анализ полученных зависимостей показал, что величина PFA  $\text{SH}_0$ -волн существенно зависит от материала, ориентации и толщины пластины. Было обнаружено, что для некоторых кристаллографических ориентаций величина PFA  $\text{SH}_0$ -волн может достигать значительных величин. Например, для  $Y-X + 75^\circ$  пластины ниобата лития и ниобата калия величина PFA исследуемых волн составляет  $-17$  и  $-48^\circ$  соответственно. Показано также, что максимальные значения PFA для ниобата калия значительно выше, чем для ниобата лития. С нашей точки зрения, это не связано с большей пьезоактивностью ниобата калия, а определяется в основном его механическими свойствами.

Кроме того, было обнаружено, что существуют такие кристаллографические ориентации, при которых PFA  $\text{SH}_0$ -волны равен нулю, хотя коэффициент электромеханической связи нулю не равен. Следовательно, можно сделать вывод, что величина PFA не зависит от коэффициента электромеханической связи волны.

Что касается влияния металлизации поверхности пластины на величину PFA, то было обнаружено, что существуют такие кристаллографические ориентации, при которых изменение PFA может достигать очень больших величин. Например, для  $\text{SH}_0$ -волны в пластинах  $Y-X + 25^\circ$  ниобата лития и ниобата калия изменение PFA

при металлизации одной поверхности пластины может достигать 18 и 55° соответственно. В качестве иллюстрации приведенных выше выводов на рис. 1 и 2 приведены анизотропия PFA (*a*) и анизотропия изменения PFA при металлизации поверхности пластины (*b*) SH<sub>0</sub>-волн для Y-среза ниобата лития и ниобата калия соответственно при различных значениях параметра  $hf = 500$  (1), 1500 (2) и 3000 м/с (3).

Полученные результаты могут быть использованы для создания различных устройств обработки сигналов, например акустоэлектронных затворов.

Таким образом, в работе была исследована анизотропия угла между фазовой и групповой скоростью поперечно-горизонтальных волн нулевого порядка в ниобате лития и ниобате калия для различных толщин пластины. Показано, что для некоторых кристаллографических ориентаций величина PFA SH<sub>0</sub>-волн может достигать значительных величин. Например, для Y–X + 75° пластины ниобата лития и ниобата калия величина PFA исследуемых волн составляет –17 и –48° соответственно. Показано также, что максимальные значения PFA для ниобата калия значительно выше, чем для ниобата лития. Кроме того, было обнаружено, что существуют такие кристаллографические ориентации, при которых изменение PFA при металлизации поверхности пластины может достигать очень больших величин. Например, для SH<sub>0</sub>-волны в пластинах Y–X + 25° ниобата лития и ниобата калия изменение PFA при металлизации одной поверхности пластины может достигать 18 и 55° соответственно.

Работа поддержана грантом NSF#ECS-0401350 (США), грантом РФФИ № 05-02-16947, Фондом содействия отечественной науке, грантом программы „Поддержка развития Высшей школы 2006–2008 гг.“ (РНП.2.1.1.8014) и контрактом ФЦНТП 02.442.11.7456.

## Список литературы

- [1] Мэттьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1981. 471 с. (*Matthews H. Surface wave filters. New York: John Wiley & Sons, 1976*).
- [2] *Slobodnik A.J., Conway E.D., Delmonico R.T. Microwave Acoustics Handbook. Bedford, AFCRL-TR-73-0597, 1973. 725 p.*

- [3] *Cinha M.P., Malocha D.* // IEEE Ultrason. Symp. 2000. P. 245–248.
- [4] *Бородина И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е.* // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 42–46.
- [5] *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П.* // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 603–608.
- [6] *Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Джоши С.Г.* // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 336–340.
- [7] *Поверхностные акустические волны* / Под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. Гл. 2. (Acoustic surface waves / Ed. by A.A. Olinier. Berlin: Springer-Verlag, 1978).