

К. ф.-м. н. М. Ю. ДВОЕШЕРСТОВ, к. ф.-м. н. В. И. ЧЕРЕДНИК

Россия, г. Нижний Новгород, НПО «ЭРКОН»,
ННГУ им. Н. И. Лобачевского
E-mail: Dvoesh1@mail.ru

Дата поступления в редакцию
05.05 2008 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД
(ДонГТУ, г. Алчевск)

ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОКРИСТАЛЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведены формулы для расчета температурных зависимостей основных характеристик распространения ПАВ в некоторых кристаллах, применяемых при проектировании акустоэлектронных устройств.

При проектировании акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), работающих при высокой температуре ($t > 100^\circ\text{C}$), необходимо изучить основные параметры ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах в таких условиях. К основным параметрам ПАВ относятся скорость (V), коэффициент электромеханической связи (K^2), угол потока энергии (pfa), параметр анизотропии (γ), температурный коэффициент задержки (tcd).

В качестве звукопровода для поверхностных акустических волн используется целый ряд пьезоэлектрических монокристаллов [1, 2]. Как известно [3], широко применяемые ниобат лития (LiNbO_3) и танталат лития (LiTaO_3) могут быть использованы до температуры 300°C , пьезокварц (α -quartz) — до 573°C , ортофосфат галлия (GaPO_4) — до 933°C , лангасит (LGS) — до 1470°C .

Целью данной работы является изучение свойств ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллических структурах при температурах более 100°C .

При проектировании устройств на ПАВ в общем случае существует задача расчета параметров и поиска оптимальных ориентаций ПАВ в пьезокристаллических материалах. Обычно в пьезокристаллическом материале оптимальными направлениями для ПАВ считаются те, в которых температурный коэффициент задержки tcd и угол потока энергии pfa ПАВ были бы минимальны, коэффициент электромеханической связи K^2 — максимален, параметр анизотропии $\gamma \approx -1$. В широко применяемых в акустоэлектронике пьезокристаллах оптимальные ориентации и параметры ПАВ при комнатной температуре ($20\text{--}25^\circ\text{C}$), в основном, известны. Например, для пьезокварца оптимальными ориентациями считаются ST - X -срез ($0^\circ; 132,75^\circ; 0^\circ$) и ST - $X+25$ -срез ($0^\circ; 132,75^\circ; 25^\circ$), для ниобата лития — YZ -срез ($0^\circ; 90^\circ; 90^\circ$) и 128 - YX -срез ($0^\circ; 38^\circ; 0^\circ$), для танталата лития — 112 - X -срез ($90^\circ; 90^\circ; 112^\circ$), для лангасита — ($0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$), для ортофосфата

галлия — ($0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$) и т. д. [4—6]. При температуре выше 100°C основные параметры ПАВ будут изменяться. Кроме этого, возникает задача поиска оптимальных ориентаций для ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах при высокой температуре.

Для расчета параметров ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах, в широком диапазоне температуры необходимо решить уравнения пьезоакустики [2, с. 15] с учетом того, что каждый пьезокристалл характеризуется своими материальными константами. Упругие константы описываются тензором 4-го ранга, который в сокращенной матричной нотации дает 6×6 матрицу C_{ij} ($i=1\text{--}6, j=1\text{--}6$), пьезоэлектрические константы описываются тензором 3-го ранга, дающего матрицу 3×6 e_{ij} ($i=1\text{--}3, j=1\text{--}6$), диэлектрические константы — тензором 2-го ранга ϵ_{ij} ($i=1\text{--}3, j=1\text{--}3$). Зависимость всех компонент материальных констант пьезокристалла от температуры можно записать в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} C_{ij}(t) &= C_{ij}(t_0)(1 + TC_{ij}^{(1)}(t-t_0) + TC_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots \\ &\dots + TC_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ e_{ij}(t) &= e_{ij}(t_0)(1 + Te_{ij}^{(1)}(t-t_0) + Te_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots \\ &\dots + Te_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ \epsilon_{ij}(t) &= \epsilon_{ij}(t_0)(1 + T\epsilon_{ij}^{(1)}(t-t_0) + T\epsilon_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots \\ &\dots + T\epsilon_{ij}^{(n)}(t-t_0)^n); \\ \rho(t) &= \rho(t_0)(1 + T\rho^{(1)}(t-t_0) + T\rho^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots + T\rho^{(n)}(t-t_0)^n). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $TC_{ij}^{(n)}$, $Te_{ij}^{(n)}$, $T\epsilon_{ij}^{(n)}$, $T\rho^{(n)}$ — температурный коэффициент константы упругости, пьезоконстанта, диэлектрическая константа, плотность кристалла соответственно n -го порядка, t_0 — комнатная температура.

Решая уравнения пьезоакустики методом Фарнелла–Джонса [2, с. 15] с учетом (1), можно рассчитать основные параметры ПАВ для рабочей температуры.

В частности, зная зависимость скорости V от температуры t , можно определить температурные характеристики ПАВ. Температурный коэффициент задержки 1-го порядка $tcd^{(1)}$ (обозначим его α_v) можно определить следующим образом. Продифференцируем время задержки ПАВ $\tau = l/V$ (l — длина пути распространения волны) по температуре:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dl}{dt} - \frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} = \frac{l}{V} \left(\frac{1}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \right) = \tau(\alpha_l - \alpha_v).$$

Тогда

$$tcd^{(1)} = \alpha_\tau = \frac{1}{\tau} \frac{d\tau}{dt} = \alpha_l - \alpha_v, \quad (2)$$

где $\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}$ — коэффициент линейного расширения кристалла вдоль направления распространения волны; $\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$ — температурный коэффициент скорости ПАВ.

Для расчета температурного коэффициента задержки 2-го порядка $tcd^{(2)}$ можно воспользоваться следующим выражением [1]:

$$tcd^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tau(t_0)} \frac{d^2\tau}{dt^2}, \quad (3)$$

где $\tau, \tau(t_0)$ — время задержки ПАВ при температурах t и t_0 , соответственно.

С другой стороны, $\tau = nT = n/f$ (T — период волны, n — количество периодов) и

$$\frac{d\tau}{dt} = - \frac{n}{f^2} \frac{df}{dt}.$$

Тогда из (2) получим:

$$\alpha_\tau = \frac{f}{n} \frac{d\tau}{dt} = - \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = -\alpha_f, \quad (4)$$

где α_f — температурный коэффициент частоты.

Далее приведем некоторые математические соотношения для того, чтобы получить удобное выражение для вычисления $tcd^{(2)}$.

Продифференцируем время задержки волны по температуре еще раз:

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V} \frac{dl}{dt} - \frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V} \frac{dl}{dt} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{l}{V^2} \frac{dV}{dt} \right),$$

проведем некоторые преобразования:

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{1}{V} \left[\frac{1}{l} \frac{d^2l}{dt^2} - \frac{1}{V} \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{2}{V^2} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 - \frac{2}{lV} \frac{dV}{dt} \frac{dl}{dt} \right];$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{l} \frac{d^2l}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{1}{V} \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{V^2} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 - \frac{1}{lV} \frac{dV}{dt} \frac{dl}{dt},$$

откуда получим

$$tcd^{(2)} = \alpha_\tau^{(2)} = \alpha_l^{(2)} - \alpha_v^{(2)} + \alpha_v^2 - \alpha_l \alpha_v = \alpha_l^{(2)} - \alpha_v^{(2)} - \alpha_\tau \alpha_v. \quad (5)$$

Другой вариант формулы для вычисления температурного коэффициента задержки второго порядка можно получить, дифференцируя (2):

$$\frac{d\alpha_\tau}{dt} = - \frac{1}{\tau^2} \frac{d\tau}{dt} \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{d\alpha_\tau}{dt} + \alpha_\tau^2,$$

и тогда

$$\alpha_\tau^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha_\tau}{dt} + \alpha_\tau^2 \right). \quad (6)$$

Вычислив производную $\frac{d\alpha_\tau}{dt}$ с учетом того, что

в соответствии с (2) $\alpha_\tau = \alpha_l - \alpha_v$, можно убедиться, что выражения (5) и (6) эквивалентны. (Вторым слагаемым в скобках в (6) обычно пренебрегают, т. к. оно мало по сравнению с первым.)

Используя приведенные формулы, проведем численный анализ характеристик ПАВ в широком интервале температуры.

На рис. 1 показаны расчетные зависимости скорости ПАВ от температуры для различных пьезокристаллов при их оптимальной ориентации (см. выше). Материальные константы для этих кристаллов взяты из работ [4—6]. Из рис. 1 видно, что с ростом температуры фазовая скорость волны, распространяющейся в кристаллах ниобата лития, кварца и лангасита, снижается, а в кристаллах ортофосфата галлия и танталата лития остается практически постоянной.

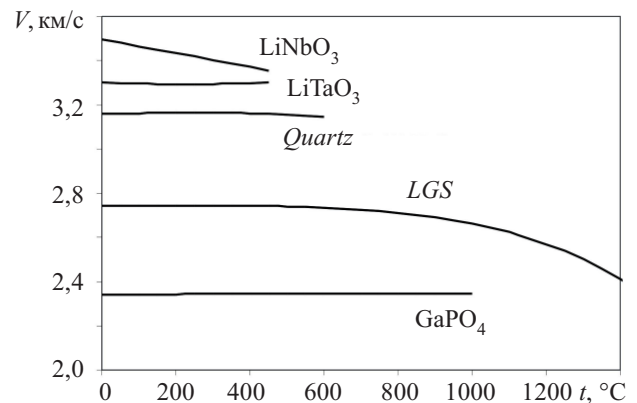


Рис. 1. Зависимости фазовой скорости ПАВ вдоль открытой поверхности от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента электромеханической связи ПАВ от температуры для тех же пьезокристаллов. Здесь видно, что с ростом температуры коэффициент электромеханической связи в кристаллах ниобата лития и танталата лития достаточно сильно снижается, в кварце и ортофосфате галлия остается практически неизменным, а в лангасите увеличивается при $t > 600^\circ\text{C}$.

Наиболее интересными для высокотемпературного применения являются пьезокристаллы лангасита и ортофосфата галлия [3].

Из рис. 1 и 2 видно, что с ростом температуры до 1400°C значение K^2 для LGS увеличивается до 2,2%, а скорость от 2,743 км/с при комнатной температуре

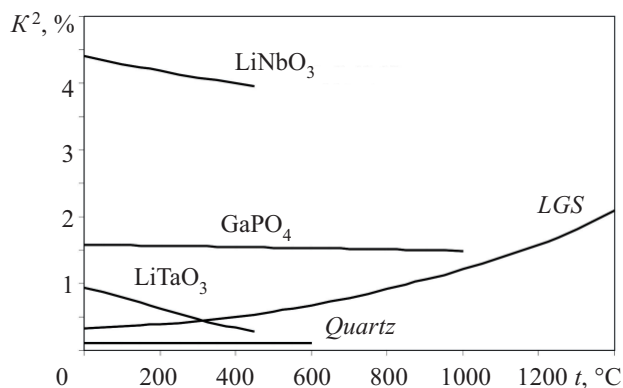


Рис. 2. Зависимости коэффициента электромеханической связи от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

уменьшается до 2,414 км/с. Как показывают расчеты, с ростом температуры угол потока энергии и параметр анизотропии *LGS* ухудшаются ($pf\alpha = -16^\circ$, $\gamma = -10$ при $t = 1400^\circ\text{C}$).

При увеличении температуры до 1000°C значение K^2 для *GaPO*₄ несколько уменьшается (до 1,48%), а скорость остается практически постоянной (2,344 км/с). Как показывают расчеты, с ростом температуры величины $pf\alpha$ и γ также не изменяются ($pf\alpha = 0^\circ$, $\gamma = 0,42$ при 1000°C).

Одной из важнейших характеристик ПАВ являются температурные свойства, которые характеризуются температурным коэффициентом задержки 1-го порядка *tcd*. Как известно [4], *ST-X*-пьезокварц, *LGS* ориентации ($0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$) и *GaPO*₄ ориентации ($0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$) термостабильны для ПАВ при комнатной температуре $t_k = 20\text{--}25^\circ\text{C}$. В ниобате лития и танталате лития вообще не существует термостабильных срезов для ПАВ.

На рис. 3 показаны результаты расчета *tcd* ПАВ, распространяющихся в рассмотренных выше кристаллах. Здесь видно, что при значениях температуры выше 300°C величина *tcd* ПАВ в пьезокварце и лангасите резко увеличивается, т. е. данные кристаллы не термостабильны при высоких температурах. В ниобате лития величина *tcd* с ростом t также остается высокой.

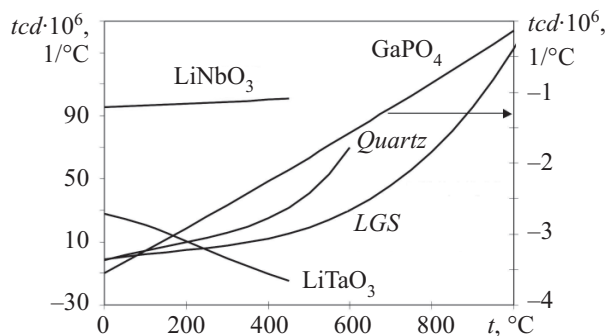


Рис. 3. Зависимости температурного коэффициента задержки от температуры для различных материалов при их оптимальной ориентации

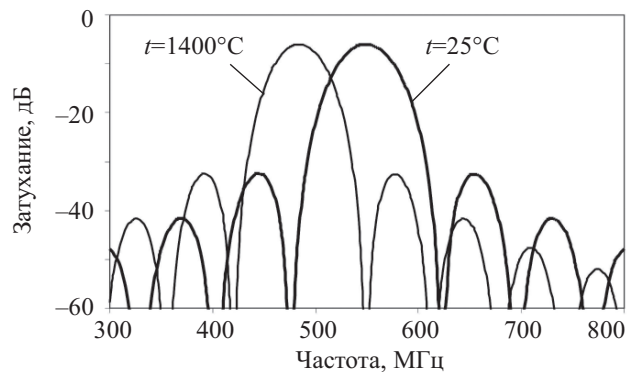


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика линии задержки на лангасите

Танталат лития, с точки зрения термостабильности для ПАВ, занимает промежуточное положение между кварцем и ниобатом лития. Известно, что минимальная величина *tcd* для 112-*X*-среза *LiTaO*₃ ($90^\circ; 90^\circ; 112^\circ$) составляет $28 \cdot 10^{-6}$ 1/°C. Из рис. 3 видно, что данный срез становится термостабильным для ПАВ при $t \approx 300^\circ\text{C}$.

Ортофосфат галлия *GaPO*₄ ориентации ($0^\circ; 110^\circ; 0^\circ$) остается термостабильным для ПАВ во всем исследованном диапазоне температуры — от комнатной до 1000°C .

На рис. 4 показано влияние температуры на эксплуатационные характеристики линии задержки на ПАВ в лангасите ($0^\circ; 140^\circ; 26^\circ$) для комнатной температуры и для $t = 1400^\circ\text{C}$. Число алюминиевых электродов каждого из двух идентичных встречно-штыревых преобразователей — 15, относительная толщина электродов $h/p = 0,01$, коэффициент металлизации $w/p = 0,5$ ($p = 2,49$ мкм — период, w — ширина, h — толщина электродов). Как видно из рисунка, центральная частота линии задержки уменьшается с 548 МГц при $t = 25^\circ\text{C}$ до 483 МГц при $t = 1400^\circ\text{C}$ из-за уменьшения скорости распространения волны с $2,74$ до $2,41$ км/с (см. рис. 1).

Приведенные в статье формулы позволяют рассчитать параметры ПАВ, распространяющихся в пьезокристаллах *Quartz*, *LiNbO*₃, *LiTaO*₃, *GaPO*₄, *LGS* при температурах выше 100°C . Предложены материалы и оптимальные ориентации ПАВ в них для создания акустоэлектронных устройств, работающих при высокой температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Двоешерстов М. Ю., Петров С. Г., Чередник В. И., Чириманов А. П. Новые оптимальные ориентации для ПАВ в пьезокристаллах лангасита, ланганита и лангата // ЖТФ.— 2002.— Том. 72, вып. 8.
2. Мэттьюс Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах.— М.: Радио и связь, 1981.
3. Hornsteiner J., Born E., Riha E. Surface acoustic wave sensor for high-temperature applications // IEEE Inter. Freq. Contr. Symp.— 1998.— P. 615—620.
4. Cowperthwaite J., Pereira da Cunha M. Optimal orientation function for SAW devices // Ibid.— 2003.— P. 881—887.
5. Kremp P. Quartz homeotypic Gallium-Orthophosphate — a new high tech piezoelectric material // IEEE Ultrason Symp.— 1994.— P. 949—954.
6. Visintini G., Ruppel C. Improved material constants for *LiNbO*₃ and *LiTaO*₃ // Ibid.— 1990.— P. 435.