

01;05;08;11;12

Новые оптимальные ориентации для поверхностных акустических волн в пьезокристаллах лангасита, ланганита и лангатата

© М.Ю. Двоешерстов, С.Г. Петров, В.И. Чередник, А.П. Чириманов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия
e-mail: dvoesh@rf.unn.runnet.ru

(Поступило в Редакцию 11 декабря 2001 г.)

Проведен численный анализ пространственных областей и поиск оптимальных ориентаций для поверхностных акустических волн в пьезокристаллах лангасита, ланганита, лангатата. Предложена функция цели для поиска оптимальных ориентаций в пьезокристаллах. Найдены новые пространственные области и конкретные направления в данных кристаллах, в которых технические характеристики поверхностных акустических волн оптимальны.

Введение

Пьезокристаллы семейства лангаситов (LGS — $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), ланганитов (LGN — $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$), лангататов (LGT — $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$) тригональной симметрии (класс 3:2) являются перспективными материалами для использования их в качестве рабочих подложек в акустоэлектронных устройствах на ПАВ (поверхностные акустические волны). В настоящий момент в данных пьезокристаллах найдены пространственные области, в которых параметры распространяющихся ПАВ оптимальны. В частности, в работах [1–3] приведены области и параметры ПАВ, имеющие высокий коэффициент электромеханической связи (K^2), нулевой угол потока энергии (УПЭ), оптимальный параметр анизотропии (γ), нулевой температурный коэффициент задержки ПАВ 1-го порядка ($\alpha_T^{(1)}$) [4].

Любая пространственная ориентация в кристалле может быть описана с помощью трех углов Эйлера (ϕ, θ, Ψ) [4]. Приведенные в работах [1–3] оптимальные для ПАВ пространственные области следующие: для кристалла LGS $-15^\circ < \psi < +10^\circ$, $120^\circ < \theta < 165^\circ$, $20^\circ < \Psi < 45^\circ$; для кристаллов LGN и LGT $-5^\circ < \phi < +5^\circ$, $130^\circ < \theta < 150^\circ$, $15^\circ < \Psi < 35^\circ$. При этом найденные пространственные области термостабильны для ПАВ ($\alpha_T^{(1)} < 10^{-6}/\text{C}$) только в области комнатной температуры ($t_0 = 25^\circ\text{C}$).

Цель настоящей работы заключалась в поиске новых оптимальных для ПАВ термостабильных ориентаций в LGS, LGN, LGT в широком интервале рабочих температур $-60 < t < +60^\circ\text{C}$. С математической точки зрения это означает, что величина $\alpha_T^{(1)} \approx 0$, а температурный коэффициент задержки ПАВ 2-го порядка ($\alpha_T^{(2)}$, $10^{-9}/\text{C}^2$) при этом должен быть как можно меньше.

Поиск оптимальных для ПАВ ориентаций может быть осуществлен только путем численного эксперимента. При этом точность расчета оптимальной ориентации зависит от правильного выбора материальных констант пьезокристалла (тензор упругих C_{ijkl} , пьезоэлектриче-

ских p_{ijk} , диэлектрических ϵ_{ij} констант, тензор коэффициентов линейного расширения β_{ij} , плотность ρ кристалла при различных температурах t), которые характеризуют свойства кристалла и являются исходными данными в поставленной задаче. Известно, что материальные константы рассматриваемых пьезокристаллов приводятся в литературе в нескольких вариантах [5–8]. Использование различных исходных данных незначительно изменяют следующие параметры ПАВ: скорость V , K^2 , УПЭ, γ , однако расчетные величины температурного коэффициента задержки ПАВ как 1-го, так и 2-го порядков существенно изменяются [9]. Это связано с тем, что в литературе [5–8] прежде всего значительно отличаются по величине температурные материальные константы (TC_{ijkl} , TP_{ijk} , $T\epsilon_{ij}$, $T\rho$) в кристаллах LGS, LGN, LGT. Расчет параметров ПАВ в исследуемых пространственных областях в настоящей работе проведен при использовании тех же исходных данных, что и в работах [1–3]. При этом в пьезокристаллах LGS, LGN, LGT анализ параметров ПАВ производился в интервале углов Эйлера: $\phi = 0 — 30^\circ$, $\theta = 0 — 180^\circ$, $\Psi = 0 — 180^\circ$. Поиск новых, оптимальных ориентаций осуществлялся по методике, описанной в [10]. В результате численного эксперимента были найдены термостабильные для ПАВ ориентации в данных кристаллах в широком диапазоне рабочих температур. При этом остальные параметры ПАВ также оставались оптимальными.

Методика поиска оптимальных ориентаций

Поиск пространственных ориентаций, соответствующих оптимальному значению какого-либо параметра ПАВ или их линейной комбинации, может быть наиболее эффективно выполнен методом глобальной оптимизации [10–12]. Требуется только, чтобы решения для ПАВ существовали всюду в области поиска [12]. При этом непосредственный расчет фазовой скорости ПАВ

осуществлялся по известным методикам Фарнелла–Джонса [4] и Адлера [13].

Применяя процедуру поиска глобального экстремума функции многих переменных [12], необходимо сначала записать эту функцию в виде так называемой функции цели (ФЦ), анализ которой позволит определить оптимальную для ПАВ ориентацию в пьезокристалле. Функцию цели можно представить в виде линейной комбинации основных параметров волны (K^2 , УПЭ, $\alpha_\tau^{(1)}$, $\alpha_\tau^{(2)}$ и т.д.) с индивидуальными экспертными коэффициентами a_i , позволяющими варьировать вклад каждого слагаемого в ФЦ

$$\text{ФЦ}(\phi, \theta, \psi) = \min\{a_1 \cdot \text{УПЭ} + a_2 \alpha_\tau^{(1)} + a_3 \alpha_\tau^{(2)} + a_4(\gamma + 1) + \dots\}. \quad (1)$$

Поиск ориентаций в кристалле, для которых все характеристики волны одновременно принимали бы оптимальные значения, весьма проблематичен, так как нет никаких гарантий, что в пьезокристалле имеется такое оптимальное направление. Проще находить оптимум того параметра, который важен для конкретного технического применения, или некий компромисс между несколькими параметрами. Например, занулив в (1) все экспертные коэффициенты, кроме коэффициентов при $\alpha_\tau^{(1)}$, $\alpha_\tau^{(2)}$, можно искать термостабильное направление для ПАВ в кристалле в широком интервале температур, перебирая при этом в цикле все три угла Эйлера (ϕ, θ, Ψ) в пределах от 0 до 360°C с заранее выбранным шагом. Или, занулив в ФЦ все экспертные коэффициенты, кроме коэффициентов при УПЭ и $\alpha_\tau^{(1)}$, $\alpha_\tau^{(2)}$, можно найти термостабильное направление для ПАВ, имеющее также малую величину УПЭ, и т.д. При этом, естественно, время поиска оптимальной ориентации в кристалле пропорционально количеству выбранных оптимизируемых параметров (скорость V , K^2 , УПЭ, $\alpha_\tau^{(1)}$, $\alpha_\tau^{(2)}$, γ и т.д.) ПАВ. Три угла Эйлера (ϕ, θ, Ψ) в (1) являются параметрами, которые необходимо перебирать с минимальным шагом в цикле, чтобы найти минимум ФЦ. При этом будет найдена оптимальная ориентация для ПАВ, определяемая найденными углами Эйлера — (ϕ_0, θ_0, Ψ_0). Величину шага изменения углов Эйлера также необходимо выбирать оптимальной. При больших шагах можно не найти (пропустить при поиске) желаемую оптимальную ориентацию в кристалле, а при малых шагах резко повышается время расчета оптимального направления. В настоящей работе поиск оптимальных ориентаций в кристаллах LGS, LGN, LGT осуществляется с шагом изменения углов Эйлера, равным 2°.

При поиске оптимальной ориентации (ϕ_0, θ_0, Ψ_0) прежде всего необходимо найти собственно фазовую скорость волны на открытой V_0 и закороченной V_M поверхности кристалла для каждой текущей ориентации (ϕ, θ, Ψ). В свою очередь остальные параметры ПАВ (K^2 , УПЭ, $\alpha_\tau^{(1)}$, $\alpha_\tau^{(2)}$, γ) можно вычислить, зная V_0 и V_M ПАВ в окрестности выбранного направления $\pm \Delta\Psi$ и в

интервале выбранной температуры $\pm \Delta t$. В соответствии с методикой Фарнелла–Джонса фазовая скорость ПАВ также является параметром в алгоритме поиска, поэтому метод глобальной оптимизации [12] применяется также и для поиска истинной скорости ПАВ в данном направлении кристалла.

Таким образом, при каждом конкретном наборе углов Эйлера (ϕ, θ, Ψ) сначала отыскивается минимум функции граничных условий $F(V)$ [12], которая представлена либо в виде определителя граничных условий (методика Фарнелла–Джонса), либо в виде функции эффективной диэлектрической проницаемости (методика Адлера), а затем отыскивается минимум функции (1).

Основные параметры ПАВ

Как известно, фазовую скорость V поверхностной акустической волны, распространяющейся в каком-либо направлении пьезокристалла, можно определить, решив систему связанных уравнений теории упругости для анизотропной пьезоэлектрической среды [4]. Далее можно вычислить все остальные технические параметры ПАВ. При этом коэффициент электромеханической связи ПАВ рассчитывается по следующей формуле [4]

$$K^2 = \frac{2(V_0 - V_M)}{V_0}, \quad (2)$$

где V_0 и V_M — фазовые скорости ПАВ на открытой и электрически закороченной (металлизированной) поверхности пьезокристалла.

Параметр анизотропии γ , характеризующий в параболическом приближении зависимость скорости ПАВ от угла Ψ ($V(\Psi) \approx V(0)(1 + \gamma \frac{\Psi^2}{2})$), т.е. дифракционные потери волны, обусловленные анизотропией кристалла, может быть вычислен по формуле [4]

$$\gamma = \frac{d(\text{УПЭ})}{d\Psi}, \quad (3)$$

где УПЭ угол отклонения потока энергии волны от волновой нормали, который равен [4]

$$\text{УПЭ} = \arctg \frac{1}{V} \frac{dV}{d\Psi}. \quad (4)$$

В оптимальном направлении кристалла значение УПЭ должно быть близко к нулю, а значение параметра анизотропии $\gamma = -1$ [4].

Одной из важнейших характеристик ПАВ является чувствительность к изменению внешней температуры t . Температурные свойства ПАВ в заданной ориентации описываются температурными коэффициентами времени задержки 1-го, 2-го и т.д. порядков, которые соответственно равны

$$\alpha_\tau^{(1)} = \frac{1}{\tau} \frac{d\tau}{dt} = \beta^{(1)} - \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \beta^{(1)} - \alpha_V^{(1)}, \quad (5)$$

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

Здесь $\tau = l/V$ — время задержки, l — длина пути распространения ПАВ, $\beta^{(1)} = 1/l \cdot dl/dt$ — коэффициент линейного расширения 1-го порядка в направлении распространения волны, $\alpha_V^{(1)}$ — температурный коэффициент скорости ПАВ 1-го порядка.

Из (5) видно, что величину $\alpha_\tau^{(1)}$ вычислить достаточно просто, зная величину β и фазовую скорость волны в интервале температур $\pm \Delta t$. Далее приведем некоторые математические соотношения для того, чтобы получить конкретное выражение для вычисления $\alpha_\tau^{(2)}$. Продифференцируем время задержки волны τ по температуре t еще раз

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

отсюда температурный коэффициент задержки ПАВ 2-го порядка равен

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

или

$$\begin{aligned} \alpha_\tau^{(2)} &= \beta^{(2)} - \alpha_V^{(2)} + \alpha_V^{(2)} - \beta^{(1)} \\ \alpha_V &= \beta_l^{(2)} - \alpha_V^{(2)} - \alpha_\tau^{(1)} \alpha_V^{(1)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\beta^{(2)}$, $\alpha_V^{(2)}$ — коэффициент линейного расширения и температурный коэффициент скорости 2-го порядка.

С другой стороны,

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

отсюда

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

тогда

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

Поскольку $\alpha_\tau^{(1)} \sim 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и $\alpha_\tau^{(2)} \sim 10^{-9}/^\circ\text{C}^2$, то всегда $\alpha_\tau^{(1)^2} \ll \alpha_\tau^{(2)}$ и мы можем использовать для конкретных вычислений более простое выражение для $\alpha_\tau^{(2)}$

$$\alpha_\tau^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{d\alpha_\tau^{(1)}}{dt}. \quad (8)$$

Аналогично можно показать, что температурный коэффициент частоты $\alpha_f^{(2)}$ 2-го порядка ПАВ можно вычислить по формуле

$$\alpha_f^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{1}{f} \frac{d^2f}{dt^2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\tau} \frac{d^2\tau}{dt^2} + \alpha_\tau^{(1)^2} = -\alpha_\tau^{(2)} + \alpha_\tau^{(1)^2}. \quad (9)$$

Известно, что зависимость материальных констант пьезокристалла в сокращенном матричном виде

$C_{ij}, e_{ij}, \varepsilon_{ij}, \rho$ от температуры t определяется следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} C_{ij}(t) &= C_{ij}(t_0) (1 + TC_{ij}^{(1)}(t-t_0) + TC_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots), \\ e_{ij}(t) &= e_{ij}(t_0) (1 + Te_{ij}^{(1)}(t-t_0) + Te_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots), \\ \varepsilon_{ij}(t) &= \varepsilon_{ij}(t_0) (1 + T\varepsilon_{ij}^{(1)}(t-t_0) + T\varepsilon_{ij}^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots), \\ \rho(t) &= \rho(t_0) (1 + T\rho^{(1)}(t-t_0) + T\rho^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots), \end{aligned} \quad (10)$$

где $TC_{ij}^{(1)}, Te_{ij}^{(1)}, T\varepsilon_{ij}^{(1)}, TC_{ij}^{(2)}, Te_{ij}^{(2)}, T\varepsilon_{ij}^{(2)}, T\rho^{(1)}, T\rho^{(2)}$ — температурные коэффициенты упругих, пьезоэлектрических, диэлектрических констант кристалла соответственно 1-го и 2-го порядков; $t_0 = 25^\circ\text{C}$ — комнатная температура; температурный коэффициент плотности $T\rho^{(1)}$ можно рассчитать по формуле [4] $T\rho^{(1)} = -(2\beta_{11}^{(1)} + \beta_{33}^{(1)})$, где $\beta_{11}^{(1)}, \beta_{33}^{(1)}$ — коэффициенты линейного расширения 1-го порядка в направлении X_1 и X_3 соответственно.

Для оценки термостабильности ПАВ в широком интервале температур обычно вводится величина относительного изменения времени задержки $\Delta\tau/\tau_0$ (либо частоты $\Delta f/f_0$) в выбранном направлении пьезокристалла

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} = \alpha_\tau^{(1)}(t-t_0) + \alpha_\tau^{(2)}(t-t_0)^2 + \dots \quad (11)$$

При этом также можно показать, что $\Delta\tau/\tau_0 = -\Delta f/f_0$.

При расчете $\alpha_\tau^{(1)}$ ПАВ вблизи комнатной температуры t_0 обычно учитывают значения температурных упругих, пьезоэлектрических, диэлектрических констант, плотности и коэффициента термического расширения только 1-го порядка [4]. Однако, как видно из (10), при рабочей температуре t , значительно отличающейся от комнатной температуры t_0 сомножитель $(t-t_0)$ может иметь весьма высокое значение. Кроме того, температурные материальные константы 2-го порядка также могут иметь весьма большие значения. Отсюда следует, что для более точного расчета $\alpha_\tau^{(1)}$ ПАВ в широком интервале рабочих температур необходимо учитывать значения температурных материальных констант кристалла как 1-го, так и 2-го порядков. Далее проведем некоторые математические вычисления и покажем, каким образом можно более точно вычислить величину $\Delta\tau/\tau_0$. Из выражения (5) следует, что $(d\tau)/\tau = \alpha_\tau dt$. Проинтегрируем это выражение от t_0 до t

$$\ln \frac{\tau}{\tau_0} = \int_{t_0}^t \alpha_\tau dt$$

или

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \exp^{\int_{t_0}^t \alpha_\tau dt},$$

отсюда

$$\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} = \exp^{\int_{t_0}^t \alpha_\tau dt} - 1.$$

В практических случаях всегда имеем $\int_{t_0}^t \alpha_\tau dt \ll 1$,
отсюда можно записать

$$\exp^{\int_{t_0}^t \alpha_\tau dt} \approx 1 + \int_{t_0}^t \alpha_\tau dt,$$

поэтому

$$\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} = \int_{t_0}^t \alpha_\tau dt. \quad (12)$$

Полученное выражение (12) более общее, чем выражение (11), поскольку в него автоматически входят значения всех порядков α_τ , а не только 1-го и 2-го порядка. Вычисляя $\Delta\tau/\tau$ по формуле (12), нам достаточно знать только зависимость $\alpha_\tau(t)$, которая вычисляется при всех значениях температурных материальных констант 1-го, 2-го и т.д. порядков (10).

Таким образом, используя приведенные выше формулы, можно произвести численный расчет основных параметров ПАВ в широком интервале рабочих температур в любом направлении пьезокристалла.

Численный эксперимент

По методике, описанной выше, были проанализированы различные пространственные области в пьезокристаллах LGS, LGN, LGT с точки зрения оптимальности в этих областях параметров ПАВ. При поиске конкретной оптимальной термостабильной для ПАВ ориентации в данных пьезокристаллах сначала было рассчитано и построено семейство изолиний, характеризующих параметры ПАВ в пространстве двух углов Эйлера θ и Ψ при фиксированном угле ϕ . В качестве примера, на рис. 1–3, *a, b* показаны рассчитанные изолинии (линии равной величины $\alpha_\tau^{(1)}$ и линии равной величины УПЭ) в интервале углов Эйлера $\phi = 10^\circ$, $0 < \theta < 180^\circ$, $0 < \Psi < 180^\circ$ для кристаллов LGS, LGN и LGT соответственно.

Как видно из рис. 1, *a, b*, кроме ранее запатентованной области (область 2) [1] в кристалле LGS в интервале углов Эйлера $\phi = 10^\circ$, $20 < \theta < 40^\circ$, $70 < \Psi < 85^\circ$ (область 1) также имеются изолинии нулевого значения $\alpha_\tau^{(1)}$ ПАВ (рис. 1, *a*). В этой же области 1 проходят изолинии нулевой величины УПЭ (см. рис. 1, *b*). При этом в данной области величина K^2 имеет достаточно высокие значения: 0.1–0.2%. Далее, в области 1 осуществлялся поиск конкретной ориентации в кристалле LGS, имеющей одновременно нулевые значения $\alpha_\tau^{(1)}$ и УПЭ ПАВ. При этом в функции цели (1) все экспертные коэффициенты a_i соответственно занулялись, кроме коэффициентов a_1 и a_2 . В результате расчета в области 1 была найдена конкретная ориентация в кристалле LGS (10, 21.3, 78.9°), имеющая следующие характеристики ПАВ: $V = 2.935$ km/s, $K^2 = 0.2\%$, УПЭ = 0.1%,

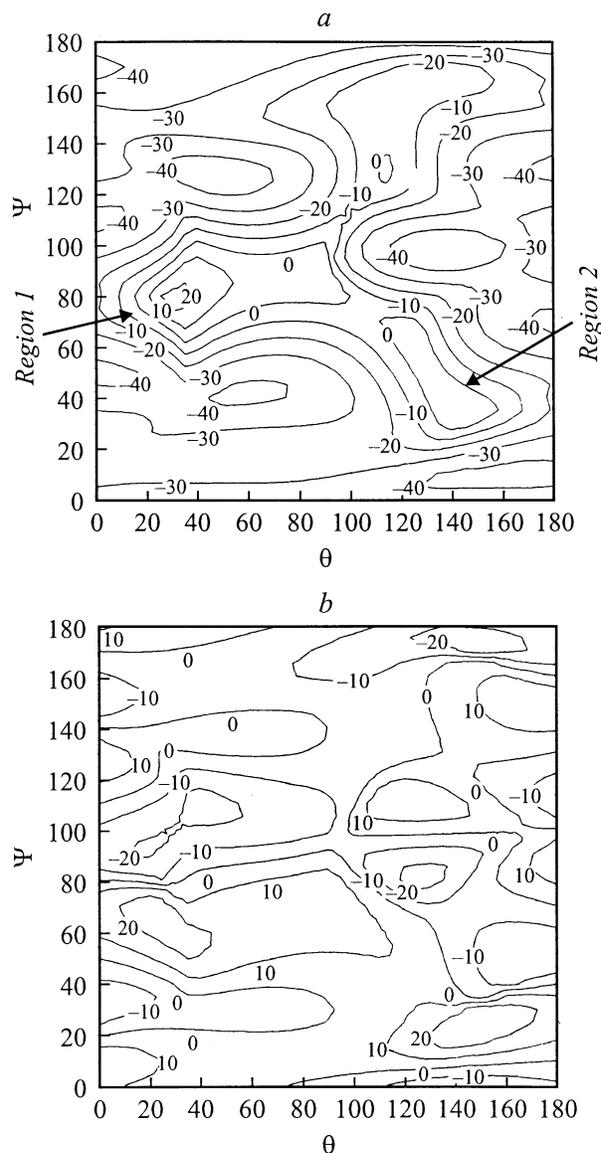


Рис. 1. Изолинии равной величины $\alpha_\tau \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (*a*) и УПЭ (*b*) в кристалле LGS (10° , θ , Ψ).

$\alpha_\tau^{(1)} = -0.07 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $\alpha_\tau^{(2)} = 95.6 \cdot 10^{-9} \text{ 1/C}^2$. Для сравнения приведем рассчитанные характеристики ПАВ в области 2 в кристалле LGS ориентации (0, 141, 25°): $V_0 = 2.743$ km/s, $K^2 = 0.35\%$, УПЭ = -0.8° , $\alpha_\tau^{(1)} = -1.75 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $\alpha_\tau^{(2)} = 76.1 \cdot 10^{-9} \text{ 1/C}^2$.

В кристалле LGN, как видно из рис. 2, *a, b*, в интервале углов Эйлера $\phi = 10^\circ$, $15 < \theta < 25^\circ$, $70 < \Psi < 85^\circ$ также имеются изолинии нулевого значения $\alpha_\tau^{(1)}$ ПАВ (рис. 2, *a*) и нулевого значения УПЭ (рис. 2, *b*). Величина коэффициента электро-механической связи в данной области углов $K^2 \approx 0.1\text{--}0.3\%$. Численный поиск конкретной ориентации в этой области углов Эйлера в кристалле LGN, имеющей одновременно нулевые значения $\alpha_\tau^{(1)}$ и УПЭ ПАВ, дал следующие значения углов: $\phi = 10^\circ$, $\theta = 19.2^\circ$, $\Psi = 79.4^\circ$. При этом рассчитанные парамет-

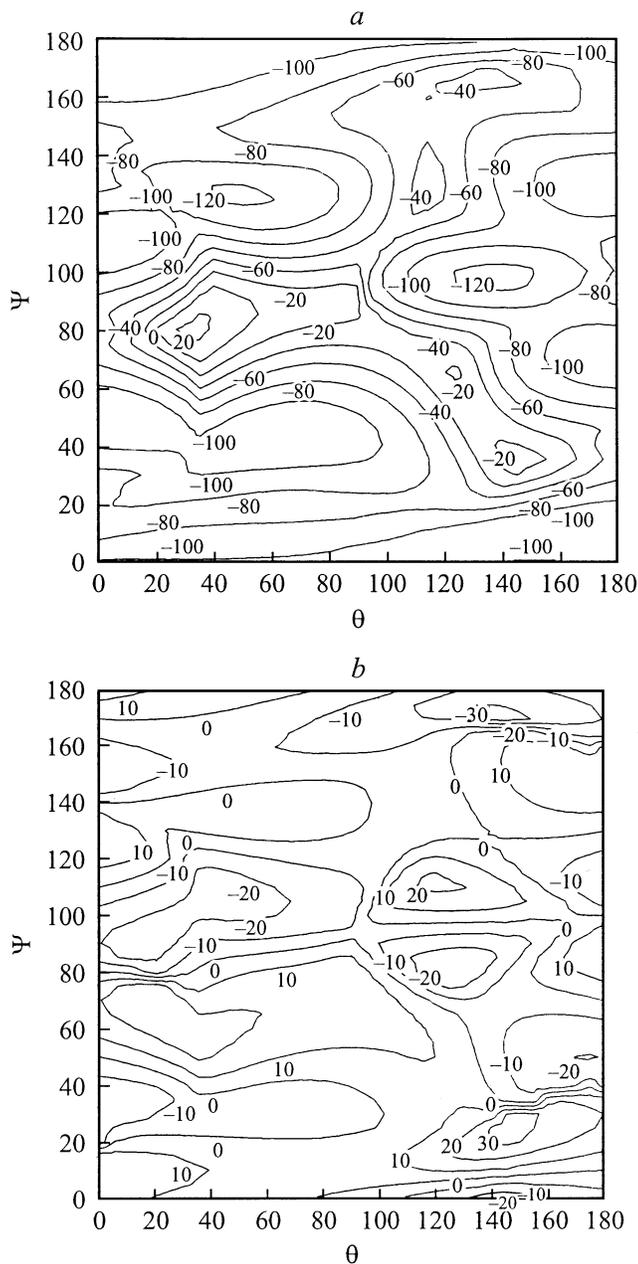


Рис. 2. Изолинии равной величины $\alpha_\tau \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (a) и УПЭ (b) в кристалле LGN (10° , θ , Ψ).

ры ПАВ следующие: $V_M = 2.799 \text{ km/s}$, $V_0 = 2.804 \text{ km/s}$, $K^2 = 0.278\%$, $\text{УПЭ} = -0.28^\circ$, $\alpha_\tau^{(1)} = -0.26 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $\alpha_\tau^{(2)} = -264 \cdot 10^{-9} \text{ 1/C}^2$.

Как видно из рис. 3, a, b, в интервале углов Эйлера $\phi = 10^\circ$, $5^\circ < \theta < 20^\circ$, $70^\circ < \Psi < 85^\circ$ в кристалле LGT также имеются изолинии нулевого значения $\alpha_\tau^{(1)}$ ПАВ (рис. 3, a) и нулевого значения УПЭ (рис. 3, b). Углы Эйлера, определяющие новую оптимальную ориентацию для ПАВ в кристалле LGT, были найдены следующие: $\phi = 10^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $\Psi = 79.5^\circ$. В данном направлении параметры ПАВ имеют следу-

ющие значения: $V_M = 2.609 \text{ km/s}$, $V_0 = 2.612 \text{ km/s}$, $K^2 = 0.267\%$, $\text{УПЭ} = 0.9^\circ$, $\alpha_\tau^{(1)} = -0.239 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $\alpha_\tau^{(2)} = 576 \cdot 10^{-9} \text{ 1/C}^2$. Численный поиск направления в интервале углов $\phi = 10^\circ$, $5^\circ < \theta < 20^\circ$, $70^\circ < \Psi < 85^\circ$ в кристалле LGT, имеющего одновременно высокий K^2 и нулевой $\alpha_\tau^{(1)}$, для ПАВ дал отрицательный результат. Более того, заметим, что в кристалле LGT абсолютные значения $\alpha_\tau^{(2)}$ в термостабильных направлениях ($\alpha_\tau^{(1)} \approx 0$) в несколько раз больше, чем в кристаллах LGS, LGN. Это означает, что найденные направления в кристалле термостабильны для ПАВ в узком интервале рабочих температур (в области комнатной температуры $t_0 = 25^\circ\text{C}$).

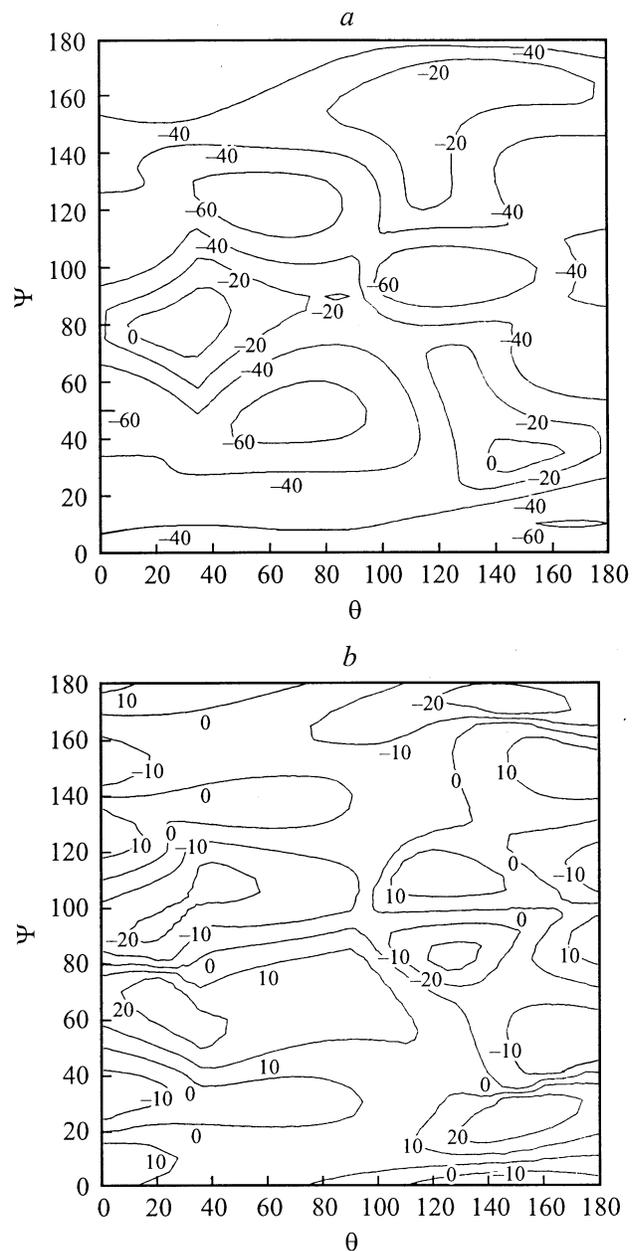


Рис. 3. Изолинии равной величины $\alpha_\tau \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (a) и УПЭ (b) в кристалле LGT (10° , θ , Ψ).

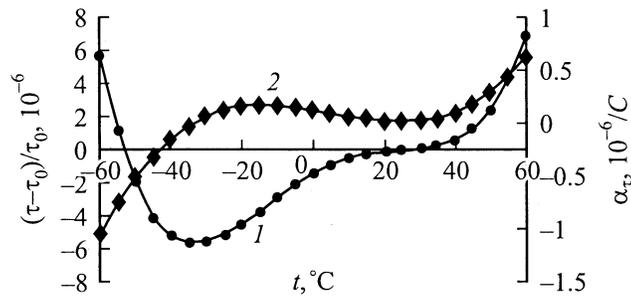


Рис. 4. Зависимости $\Delta\tau/\tau_0$ (1) и α_τ (2) от температуры в кристалле LGN ориентации (10, 23.48, 1°).

Численные расчеты показали, что такие же оптимальные пространственные области в рассмотренных кристаллах имеются не только при фиксированном $\phi = 10^\circ$, но и в интервале 1-го угла Эйлера $0 < \phi < 30^\circ$. В качестве примера приводим найденные термостабильные ориентации в кристалле LGT: 1) $\phi = 0^\circ$, $\theta = 9.85^\circ$, $\Psi = 89.8^\circ$ — УПЭ = 0.75° , $\alpha_\tau^{(1)} = -0.27 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $K^2 = 0.26\%$; 2) $\phi = 20^\circ$, $\theta = 10.6^\circ$, $\Psi = 69.5^\circ$ — УПЭ = -0.54° , $\alpha_\tau^{(1)} = -0.06 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $K^2 = 0.33\%$; 3) $\phi = 30^\circ$, $\theta = 11.5^\circ$, $\Psi = 59^\circ$ — УПЭ = -0.58° , $\alpha_\tau^{(1)} = -0.17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $K^2 = 0.39\%$.

При поиске термостабильного направления в широком интервале температур в пьезокристалле LGN (при этом в функции цели (1) все экспертные коэффициенты a_i соответственно занулялись, кроме коэффициентов a_2 и a_3) была найдена ориентация в кристалле LGN $\phi = 10^\circ$, $\theta = 23.48^\circ$, $\Psi = 86.1^\circ$, имеющая практически нулевое значение $\alpha_\tau^{(2)}$. При этом параметры ПАВ $V_M = 2.767 \text{ km/s}$, $V_0 = 2.771 \text{ km/s}$, $K^2 = 0.295\%$, УПЭ = -18° , $\alpha_\tau^{(1)} = 0.012 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$, $\alpha_\tau^{(2)} = 0.105 \cdot 10^{-9} \text{ 1/C}^2$, $\gamma = -0.64$. На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости $\Delta\tau/\tau_0$ (кривая 1) и $\alpha_\tau^{(1)}$ (кривая 2) ПАВ в интервале рабочих температур от -60°C до $+60^\circ\text{C}$ для данной ориентации в кристалле LGN. Как видно из рис. 4, данное направление обладает термостабильными свойствами для ПАВ в широком интервале рабочих температур t . Однако, к сожалению, при этом угол потока энергии ПАВ имеет весьма большое значение, что говорит об очень сильной анизотропии кристалла в данном направлении.

Заключение

Предложена функция цели для поиска оптимальных ориентаций для ПАВ в пьезокристаллах. Найдены новые пространственные области в пьезокристаллах LGS, LGN, LGT, в которых ПАВ имеют оптимальные технические характеристики. Так, в кристалле LGS новая оптимальная для ПАВ пространственная область заключена в интервале углов Эйлера $0 < \phi < 30^\circ$, $20 < \theta < 40^\circ$, $70 < \Psi < 85^\circ$, в кристалле LGN — $0 < \phi < 30^\circ$,

$15 < \theta < 25^\circ$, $70 < \Psi < 85^\circ$, в кристалле LGT — $0 < \phi < 30^\circ$, $5 < \theta < 20^\circ$, $70 < \Psi < 85^\circ$. В кристалле LGN найдена термостабильная ориентация в широком интервале рабочих температур.

Список литературы

- [1] Naumenko N.F. High Frequency SAW Device. International Patent. PCN/US 96/17906. H03H 9/17.9/02. WO 97/25776. 17.07.1997.
- [2] Naumenko N.F. Optimal Cut for SAW Devices on Langanite. International Patent. PCT/US905325. H01L 41/08. 18.05.1999.
- [3] Naumenko N.F. An Optimal Cut for SAW Devices on Langatate. International Patent. PCT/US99/05871. H03H 9/02. WO 99/48200. 23.09.1999.
- [4] Олинер А. Поверхностные акустические волны. М.: Мир, 1981. 500 С.
- [5] Bungo A., Jian C., Yamaguchi K., Sawada Y. // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1999. P. 1–4.
- [6] Sato T., Murota M., Shimizu Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 2914–2917.
- [7] Sakharov S., Senushencov P., Medvedev A., Pisarevsky Yu. // Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. 1995. P. 647–652.
- [8] Malocha D.C., Cunha M.P., Adler E. // Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. 2000. P. 200–205.
- [9] Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П., Петров С.Г. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 4. С. 89–93.
- [10] Dvoesherstov M.Yu., Cherednik V.I., Chirimanov A.P., Petrov S.G. // SPIE. 1999. Vol. 3900. P. 283–289.
- [11] Уайлд Д.Дж. Методы поиска экстремума. М.: Наука, 1967. 350 с.
- [12] Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П. Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 9. С. 801–813.
- [13] Adler E.L. // Trans. on UFFC. 1994. Vol. 41. N 6. P. 876–881.