

УДК 534.22

СРЕЗЫ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В α -КВАРЦЕ

© 1999 г. А. С. Козлов, Е. А. Колосовский, Р. М. Тазиев

Институт физики полупроводников СО РАН
630090 Новосибирск-90, пр. акад. Лаврентьева, 13
e-mail: taziev@thermo.isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 30.12.97 г.

Влияние внешних статических сил на фазовую скорость поверхностной акустической волны (ПАВ) рассчитано для случая круглых тонких анизотропных пластин α -кварца (мембран). Локальная чувствительность фазовой скорости ПАВ к давлению и радиальному обжатию мембраны как функции анизотропии кварца представлена в виде зависимости чувствительности от двух независимых переменных: направления распространения ПАВ и угла среза пластин кварца. Проведено сравнение численных и экспериментальных значений чувствительности скорости ПАВ к внешнему давлению и радиальному обжатию кварцевых мембран. Как экспериментальные, так и численные результаты находятся в хорошем согласии друг с другом.

Для уменьшения чувствительности устройств на ПАВ к статическим внешним механическим и температурным воздействиям предложен ряд срезов α -кварца [1–3]. Одним из них является так называемый “STC-срез”, предложенный автором работы [4], другой срез, “TG-срез”, предложен в [5]. Устройства на ПАВ в этих срезах нечувствительны к всестороннему радиальному обжатию и имеют чувствительность к динамическим температурным изменениям на порядок меньше по величине, чем хорошо известный ST, X срез кварца [4, 5]. Однако для использования ПАВ-резонаторов в датчиках давления мембранного типа необходимо иметь ориентации с наибольшей чувствительностью к давлению и наименьшей чувствительностью к всестороннему радиальному обжатию мембран.

В настоящей работе мы получим и количественно проанализируем общее выражение, связывающее относительное изменение скорости ПАВ с внешним статическим давлением, приложенным к поверхности мембраны, и также со всесторонним и диаметриально-симметричным обжатием анизотропной мембраны. Относительное изменение скорости находится методом возмущений [1]. Все необходимые градиенты смещений, обусловленные внешними силами, будут получены аналитически для каждой точки мембраны. Таким образом, можно вычислить изменение частоты ПАВ-резонатора в любой локальной точке поверхности мембраны. Для произвольного направления распространения ПАВ, используя аналитическое выражение для относительного изменения частоты резонатора, мы оптимизируем располо-

жение двух резонаторов на ПАВ для достижения максимальной чувствительности датчика к прикладываемому к поверхности мембраны внешнему давлению.

Распространение ПАВ в предварительно-деформированной среде описывается уравнениями движения для малых динамических полей волны, накладываемых на основное поле деформации среды, в материальных координатах с осями a_j [8]:

$$\rho_0 \ddot{u}_j = P_{ij,i},$$

$$D_{i,i} = 0,$$

с граничными условиями на поверхности кристалла ($a_3 = 0$)

$$P_{3j} = 0,$$

$$D_3 - \epsilon_0/k/\phi = 0;$$

здесь

$$P_{ij} = (C_{ijkl} + \hat{C}_{ijkl})u_{k,l} + e_{kij}\phi_{,k},$$

$$D_i = e_{ikl}u_{k,l} - \epsilon_{ik}\phi_{,k},$$

$$\hat{C}_{ijkl} = T_{ik}\delta_{jl} + C_{ijklmn}E_{mn} + C_{ijnl}W_{l,n} + C_{inkl}W_{j,n},$$

где \hat{C}_{ijkl} – эффективные упругие константы, зависящие от величины предварительной деформации среды; C_{ijkl} , e_{ikl} , ϵ_{ik} – упругие постоянные второго порядка, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные среды соответственно; ρ_0 – плотность кристалла; T_{ij} , E_{ij} , $W_{i,j}$ – компоненты тензора напряжений, деформаций и градиента вектора смещения соответственно; ϕ , D_i , P_{ij} – электрический потенциал, компоненты вектора электричес-

кой индукции и тензора Пиола–Кирхгофа; C_{ijklmn} – нелинейные упругие константы третьего порядка, k – волновое число, везде $A_{i,j}$ – обозначение производной $\partial A_i / \partial a_j$.

Решение для поверхностной акустической волны, распространяющейся в произвольной анизотропной пьезоэлектрической среде, может быть представлено в форме

$$u_j = \sum_{m=1}^4 C^m A_j^m \exp(ip_m k a_3) \exp([ik(a_1 - V_0 t)],$$

$$\phi = \sum_{m=1}^4 C^m A_j^m \exp(ip_m k a_3) \exp([ik(a_1 - V_0 t)],$$

где C^m – парциальная амплитуда, A_j^m – парциальный вектор и p_m – парциальный показатель спадания вглубь среды вектора смещения u_j и электрического потенциала ϕ ПАВ, распространяющейся вдоль оси a_1 , а ось a_3 направлена вдоль нормали к поверхности кристалла.

Метод возмущений [9] приводит к относительно изменению скорости волны в деформированной среде

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\int u_{i,j}^* \hat{C}_{ijkl} u_{k,l} dv}{2\rho_0 \omega_0^2 \int u_i^* u_i dv}, \quad (1)$$

где подразумевается интегрирование по объему среды, V_0 и ω_0 – значения фазовой скорости и угловой частоты ПАВ в недеформированной среде, (*) – обозначает комплексное сопряжение.

Нагруженная внешним давлением мембрана. Рассмотрим тонкую круглую анизотропную кварцевую пластинку толщиной h и радиусом R , которая жестко фиксирована по периметру и ее поверхность однородно нагружена давлением величиной P . Поскольку пластинка тонкая, то деформация предполагается плоской. Пьезоэффектом пластины пренебрегаем, и тогда компоненты тензора плоской деформации поверхности мембраны, обусловленные однородным давлением P на одну из ее поверхностей, следующие [10]:

$$E_{11} = \frac{3}{8} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \frac{P}{C} \left\{ 1 - 3 \left(\frac{a_1}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_2}{R}\right)^2 \right\},$$

$$E_{22} = \frac{3}{8} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \frac{P}{C} \left\{ 1 - 3 \left(\frac{a_2}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2 \right\}, \quad (2)$$

$$E_{12} = -\frac{3}{4} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \frac{P}{C} \left(\frac{a_1 a_2}{R}\right);$$

здесь, E_{11} , E_{22} и E_{12} – компоненты тензора деформации, C – константа, состоящая из следующей комбинации упругих постоянных:

$$C = [3(A_{11} + A_{22}) + 2(A_{12} + 2A_{66})]/8,$$

где $A_{ij} = C_{ij} - C_{i3}C_{j3}/C_{33}$, $i, j = 1, 2, 6$.

Другие компоненты тензора деформации могут быть получены из условий свободной поверхности, т.е. нормальные к поверхности мембраны компоненты тензора напряжений $T_{3j} = 0$:

$$\begin{pmatrix} C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{33} \\ 2E_{23} \\ 2E_{13} \end{pmatrix} = \\ = - \begin{pmatrix} C_{31} & C_{32} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{56} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ 2E_{12} \end{pmatrix}.$$

Выражение (1) является функцией 9 компонентов градиента вектора смещения среды. Однако, предположения о плоской деформации и отсутствии вращения центра пластинки сводят выражение (1) к функции только от 3 компонент тензора напряжений: T_{11} , T_{12} , T_{22} .

В численных расчетах нами использованы материальные постоянные только α -кварца из работ [11, 12]. Для простоты предполагаем, что ПАВ-устройство имеет размеры достаточно малые, чтобы можно было пренебречь влиянием пространственной зависимости тензоров напряжений в мембране на фазовую скорость ПАВ. Тогда из (1) и (2) получим выражение для локального относительного изменения скорости ПАВ

$$\frac{1}{A} \frac{\Delta V}{V_0} = \gamma_0 + \gamma_1 \left(\frac{a_1}{R}\right)^2 + \gamma_2 \left(\frac{a_2}{R}\right)^2 + \gamma_3 \left(\frac{a_1 a_2}{R R}\right), \quad (3)$$

из которого можно вычислить смещение частоты ПАВ-резонатора в произвольной локальной точке мембраны. Здесь коэффициенты γ_i зависят только от материальных постоянных кристалла, как явно, так и неявно через параметры ПАВ, которые могут быть рассчитаны на ЭВМ для произвольного среза и направления распространения волны в кварце, нормализованный коэффициент $A = P(R/h)^2$ такой, что выражение (3) справедливо для произвольных размеров мембраны.

Для того, чтобы достичь максимального значения чувствительности ПАВ-резонатора, предварительно следует отыскать все локальные экстремумы функции (3). Легко можно показать, что один из них находится в центре мембраны с координатами $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ (см. рис. 1). Другие экстре-

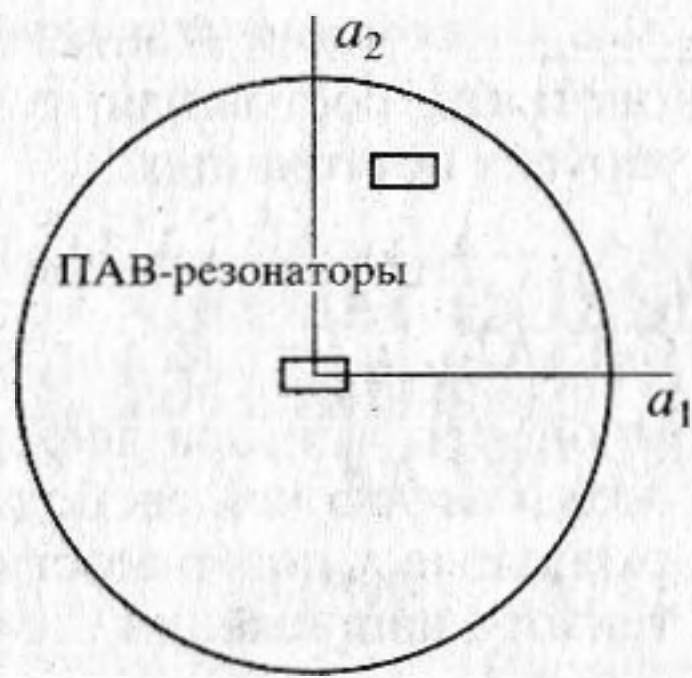


Рис. 1. Схемы кварцевой мембраны для одноканальной и двухканальной дифференциальной структуры сенсора с коллинеарными направлениями распространения ПАВ в резонаторах.

мальные координаты находятся на контурной линии мембраны и отыскиваются из выражения, дающего два других корня:

$$\operatorname{tg}^2 \theta + 2(\gamma_1 - \gamma_2)/\gamma_3 \operatorname{tg} \theta - 1 = 0;$$

здесь $a_1 = R \cos \theta$ и $a_2 = R \sin \theta$ описывают контурную линию мембраны. В итоге имеем три экстремальных значения. В случае ПАВ-датчика с одним ПАВ-резонатором (одноканальная схема) следует выбрать только одно максимальное значение. В случае двухканального дифференциального сенсора следует выбрать такие два значения, для которых абсолютная величина их разницы была максимальна, что позволит достичь максимальной чувствительности ПАВ-сенсора давления. Координаты этих экстремальных значений являются местом расположения ПАВ-резонаторов на поверхности мембраны. Двухканальная дифференциальная схема сенсора предпочтительнее одноканальной, поскольку она позволяет существенно уменьшить влияние изменения температуры на датчик давления на ПАВ.

Радиальное обжатие тонких анизотропных круглых пластинок. Компоненты тензора напряжений для этой задачи аналитически получены для

случая изотропной тонкой круглой пластины [10]. Однако для анизотропного случая данная задача решается с помощью метода конечных элементов либо методом теории функции комплексной переменной для двумерных систем таких как тонкая пластинка. Известно, что эта задача сводится к задаче отыскания двух аналитических функций F_1 и F_2 , которые могут быть представлены следующим образом [10]:

$$F_1(z_1) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m P_{1m}(z_1),$$

$$F_2(z_2) = \sum_{m=0}^{\infty} B_m P_{2m}(z_2), \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots;$$

здесь

$$P_{jm} = (\eta_j + Q_j)^m + (\eta_j - Q_j)^m, \quad j = 1, 2$$

$$\eta_j = \frac{z_j}{(1 - i\mu_j)R}, \quad Q_j = \left[\eta_j^2 - \frac{(1 + i\mu_j)}{(1 - i\mu_j)} \right]^{1/2},$$

где $z_1 = a_1 + \mu_1 a_2$ и $z_2 = a_1 + \mu_2 a_2$; здесь μ_1 и μ_2 — комплексные постоянные, зависящие только от упругих постоянных материала пластинки, R — радиус мембраны. Неизвестные A_m и B_m определяются из граничных условий на контурной граничной линии круглой пластинки:

$$2\operatorname{Re}[F_1(z_1) + F_2(z_2)] = -\int Y_n dt = f_1(t), \quad (4)$$

$$2\operatorname{Re}[\mu_1 F_1(z_1) + \mu_2 F_2(z_2)] = \int X_n dt = f_2(t),$$

где X_n, Y_n — проекции внешней нагружающей силы F обжатия мембраны на координатные оси a_1 и a_2 соответственно, t — параметр, пробегающий при одном обходе по контуру мембраны все значения от нуля до 2π .

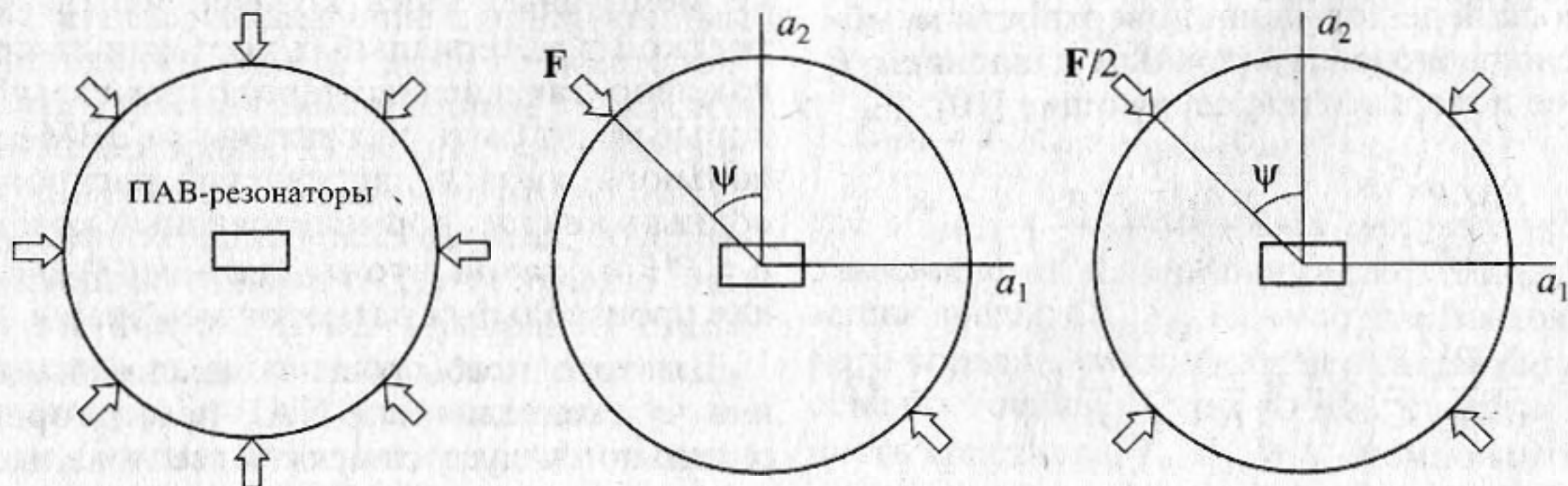


Рис. 2. Схемы всестороннего радиального обжатия круглой кварцевой пластинки, одной парой и двумя парами ортогональных диаметально-симметричных сил обжатия пластинки.

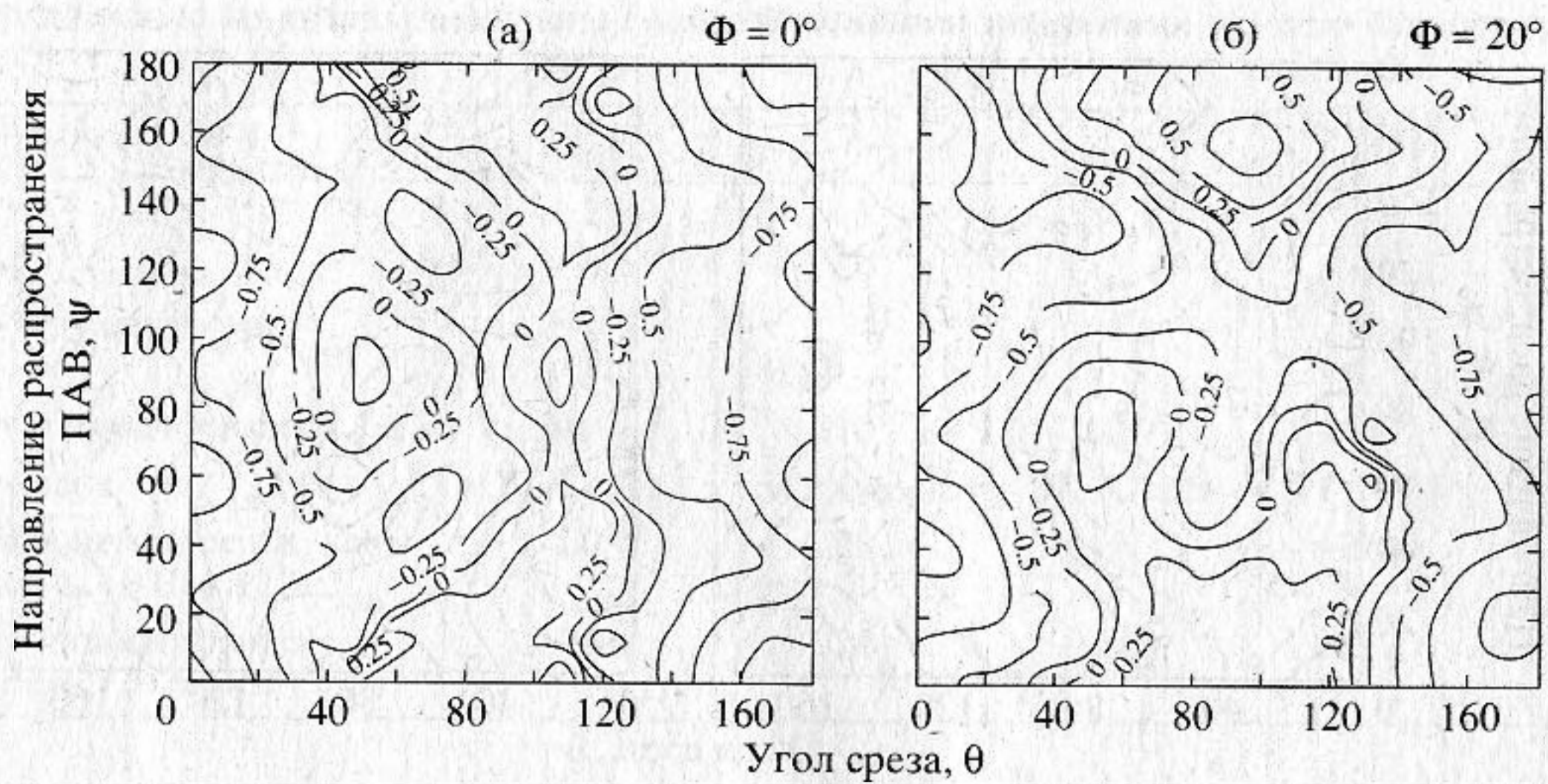


Рис. 3. а, б – контурные изолинии чувствительности к давлению для одноканального сенсора на ПАВ.

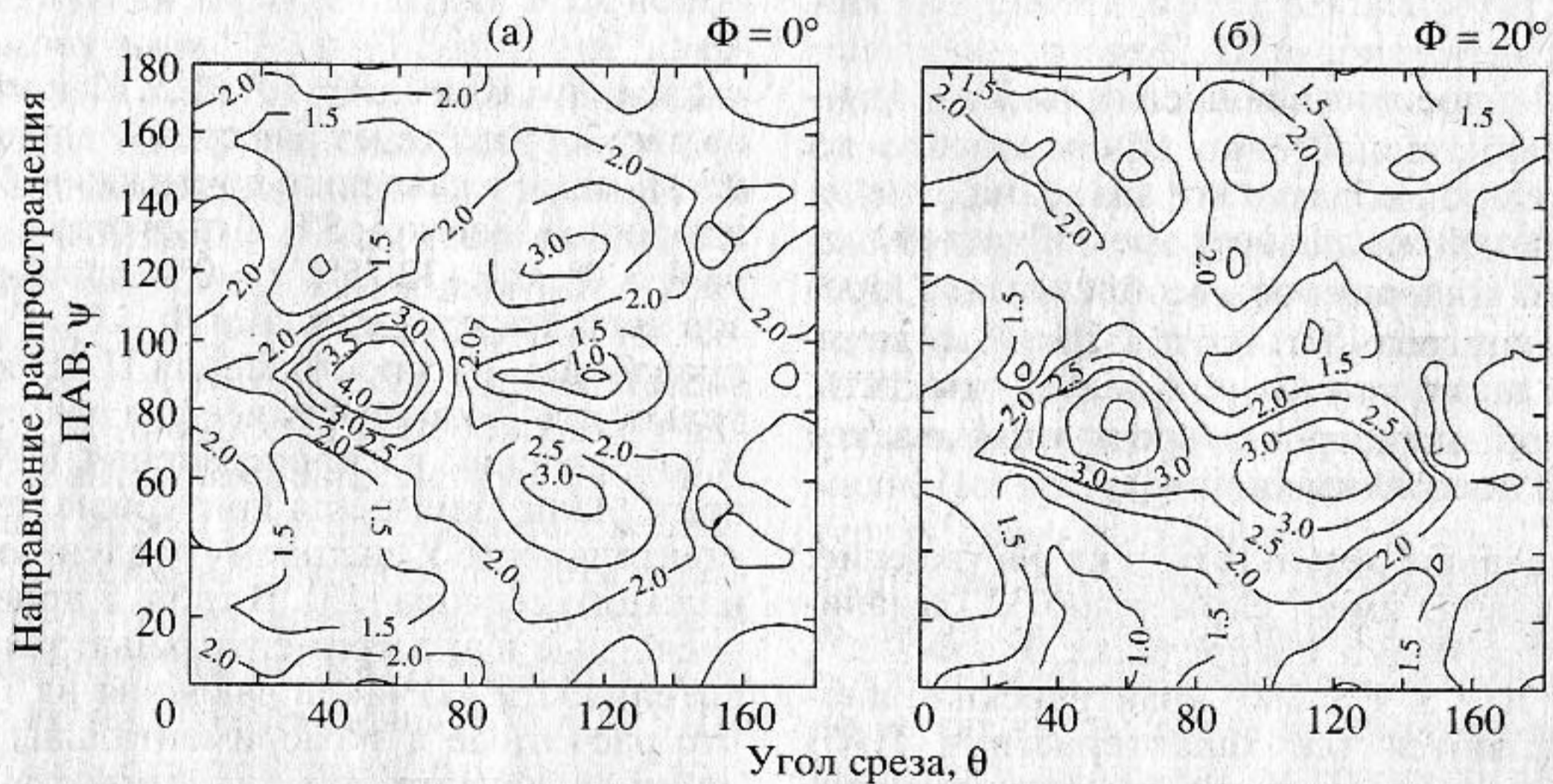


Рис. 4. а, б – контурные изолинии чувствительности к давлению для двухканального дифференциального сенсора на ПАВ.

Компоненты тензора напряжений выражаются через производные функций F_1 и F_2 :

$$T_{11} = 2\text{Re}[\mu_1^2 F_1'(z_1) + \mu_2^2 F_2'(z_2)],$$

$$T_{22} = 2\text{Re}[F_1'(z_1) + F_2'(z_2)],$$

$$T_{12} = -2\text{Re}[\mu_1 F_1'(z_1) + \mu_2 F_2'(z_2)].$$

Для всестороннего радиального обжатия анизотропной пластинки (см. рис. 2) компоненты тензора напряжений T_{ij} такие же, как и для изотропной пластинки: $T_{11} = T_{22} = F/(2Rh)$, $T_{12} = 0$.

Это рассмотрение было бы неполным, если не упомянуть следующее обстоятельство. Задача о радиальном обжатии анизотропной пластинки может быть решена в замкнутой форме, аналогичной для изотропного случая. Для этого следу-

ет воспользоваться формулой Шварца, которая восстанавливает аналитическую функцию внутри круга по ее вещественной части, заданной на контуре круга [14]. Окончательные выражения для функций F_1 и F_2 могут быть записаны в следующем виде:

$$F_1(z_1(\xi)) = F_1(\xi) = \frac{1}{4\pi(\mu_2 - \mu_1)} \int_0^{2\pi} [\mu_2 f_1(t) - f_2(t)] \frac{e^{it} + \xi}{e^{it} - \xi} dt,$$

$$F_2(z_2(\xi)) = F_2(\xi) = \frac{-1}{4\pi(\mu_2 - \mu_1)} \int_0^{2\pi} [\mu_1 f_1(t) - f_2(t)] \frac{e^{it} + \xi}{e^{it} - \xi} dt,$$

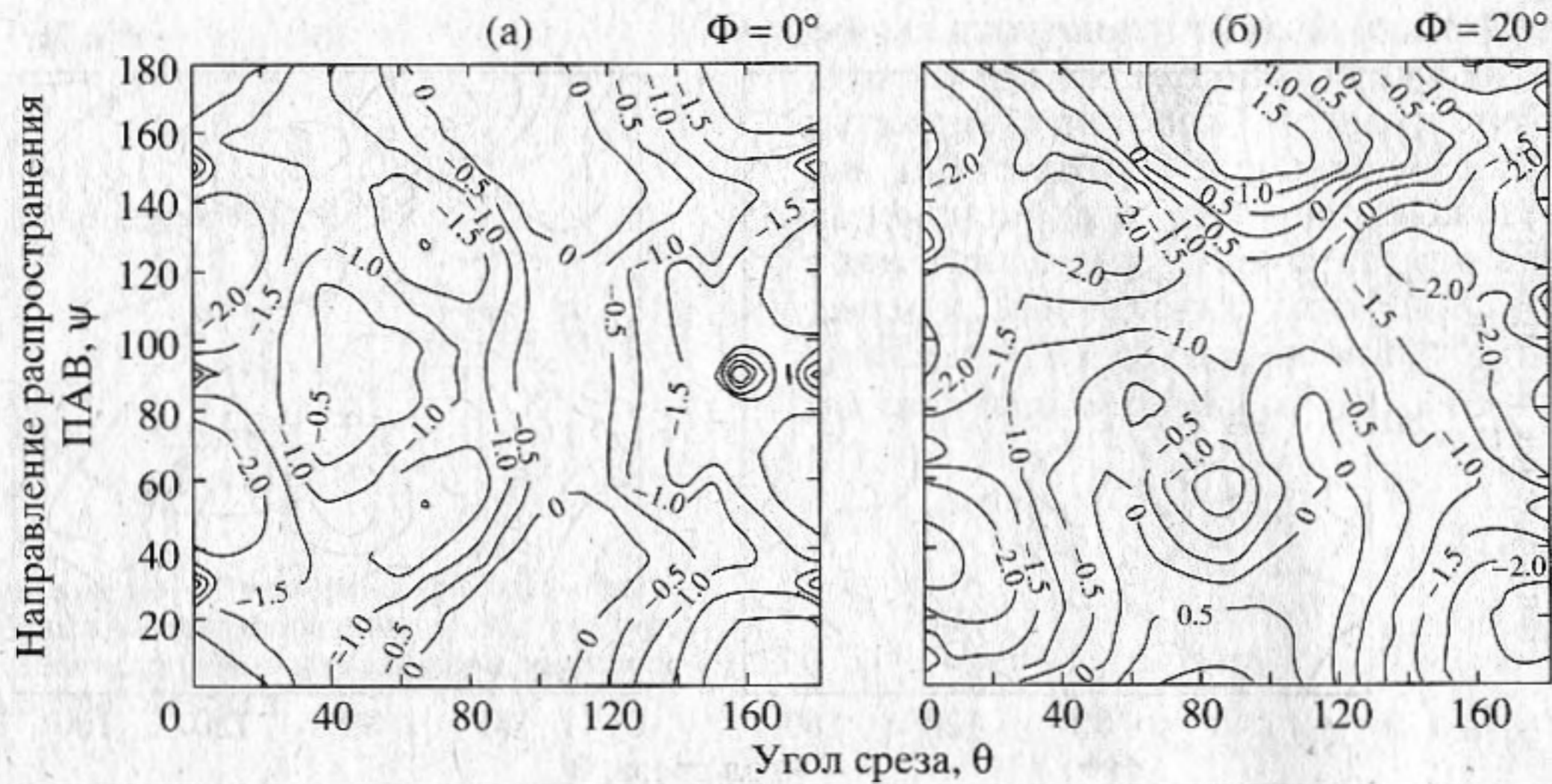


Рис. 5. а, б – контурные изолинии чувствительности ПАВ к всестороннему радиальному обжатию мембраны для двухканального дифференциального сенсора на ПАВ.

где $f_1(t)$ и $f_2(t)$ – проекции внешней силы \mathbf{F} из (4), t – параметр, пробегающий при одном обходе по контуру некоторой области все значения от нуля до 2π , одной и той же для всех трех областей z , z_1 и z_2 ; $z_j(\xi)$ – это конформное преобразование, преобразующее внутренность круга $|\xi| < 1$ во внутренность эллипса $z_j = a_1 + \mu_j a_2$. Следует отметить, что вся упругая анизотропия среды описывается только двумя постоянными μ_1 и μ_2 .

Количественные результаты и их обсуждение. Кристалл α -кварца имеет симметрию 32. Заданием углов Эйлера Φ , ϑ и Ψ в пределах: $0^\circ \leq \Phi \leq 30^\circ$, $0^\circ \leq \vartheta \leq 180^\circ$ и $0^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$ практически полностью определяются все характеристики ПАВ (“leaky” волны не рассматриваются) во всем кристалле α -кварца. На рис. 3, 4 представлены контурные карты изолинии экстремальных значений чувствительности ПАВ к давлению (3) для одноканального и двухканального сенсоров, соответственно, как функции трех углов Эйлера: среза подложки – Φ и ϑ и направления распространения волны – Ψ . Алгоритм поиска этих значений следующий: для каждого из дискретных значений углов Эйлера Φ , ϑ и Ψ рассчитываются на ЭВМ коэффициенты γ_j выражения (3) и затем, положения двух резонаторов выбираются таким образом, чтобы достичь максимальной чувствительности. При этом шаг за шагом нами полностью исследован весь набор срезов и направлений распространения ПАВ в кварце с дискретными значениями по углам Эйлера Φ , ϑ и Ψ через 10 градусов. Как выяснилось в ходе численных расчетов, такой величины шага по углам вполне достаточно, поскольку чувствительность оказалась достаточно гладкой функцией трех эйлеровых углов Φ , ϑ и Ψ . Для численных расчетов нами использованы следующие параметры кварцевой мембраны: $h =$

$= 1$ мм, $R = 10$ мм, $P = 10^6$ кПа. Как можно видеть из рис. 3, существует ряд срезов кварца с чувствительностью к давлению почти вдвое большей, чем в хорошо известном ST, X α -кварце с углами Эйлера $\Phi = 0^\circ$; $\vartheta = 132.75^\circ$; $\Psi = 0^\circ$. Одним из таких срезов является срез с углами $\Phi = 0^\circ$, $\vartheta = 140^\circ$ и направлением распространения ПАВ в 40° относительно оси X кварца. Ранее для некоторых срезов и направлений распространения ПАВ в кварце, нами были приведены контурные изолинии чувствительности к внешнему давлению для одноканального сенсора [13]. В табл. 1 приведены наши расчетные и экспериментальные значения чувствительности датчиков давления на ПАВ. Видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо совпадают, что свидетельствует в пользу корректности принятой нами модели для расчета датчиков давления на ПАВ.

На рис. 4 и 5 приведены контурные изолинии чувствительности ПАВ к внешнему давлению и к всестороннему радиальному обжатию мембраны. Сопоставляя их друг с другом, можно выбрать оптимальные срезы и направления распространения ПАВ в кварце с целью достижения максимальной чувствительности сенсора к внешнему давлению и минимальной чувствительности к радиальным внешним механическим воздействиям устройства, фиксирующего мембрану. Результат такого наложения представлен на рис. 6а, 6б, где жирная линия – это нулевая изолиния температурного коэффициента задержки первого порядка (ТКЗ1) ПАВ, а штриховая – изолиния с нулевой чувствительностью ПАВ к радиальному всестороннему обжатию мембраны. Авторы [4, 5] таким способом нашли хорошо известные срезы кварца: “TG-срез” и “STC-срез” (см. рис. 6а). Из рис. 6б видно, что существуют еще по крайней мере два среза, обладающие вышеупомянутыми свойствами при углах

Таблица 1. Сравнение между экспериментальными и численными значениями чувствительности для кварцевых мембран

Мембрана, №	1	2	3	4	5
Толщина, мм	2	2	1.1	0.38	0.25
Диаметр, мм	9	9	12	12.7	10
Расстояние между центрами резонаторов, мм	4	4	4.8		3.8
Центральная частота резонатора, МГц	310	310	360	130	105
Подложка, α -кварц	Y, X-срез	ST, X-срез	ST, X-срез	Y, X-срез	Y, X-срез
Экспериментальная относительная чувствительность, $(1/\text{Па}) \times 10^{-12}$	60	20.2	90	2700	1400
Теоретическая относительная чувствительность, $(1/\text{Па}) \times 10^{-12}$	75.4	24	100	2770	1300

Эйлера $\Phi = 20^\circ$, $\vartheta = 127.2^\circ$, $\Psi = 36.7^\circ$ и $\Phi = 20^\circ$, $\vartheta = 127.6^\circ$, $\Psi = 54^\circ$ (они обозначены буквами "А" и "В"). Сравнительная характеристика этих новых срезов с упомянутыми "TG и STC-срезами" кварца представлена в табл. 2. Эти срезы пригодны для возбуждения ПАВ, поскольку для них коэффициенты электромеханической связи ПАВ ($2\Delta V/V$) равны 0.098 и 0.094% соответственно. Углы отклонения потока энергии волны γ от волновой нормали для этих срезов равны 4.8° и -1.8° соответственно. Кроме того, в табл. 2 представлена также важная величина $d\gamma/d\Psi$, необходимая для определения длины распространения ПАВ, когда можно еще пренебречь дифракцией волны. Из рис. 6б для изолиний чувствительности к давлению видно, что значения чувствительности двухканального сенсора на ПАВ к внешнему давлению для этих двух срезов равны $3.56 \times 10^{-11}/\text{Па}$ и $2.1 \times 10^{-11}/\text{Па}$ соответственно, что больше ана-

логичных значений для одноканального сенсора в этих срезах приблизительно в 15 раз. Эти значения чувствительности реализуются при следующих положениях ПАВ резонаторов: для среза "В" один из них расположен с координатами центра резонатора $(0.2R; -0.98R)$, а другой – $(0.98R; 0.2R)$. Для среза "А" центры ПАВ-резонаторов расположены с координатами: $(0.469R; -0.883R)$ и $(0.883R; 0.469R)$ соответственно. Следует отметить, что срезы "А" и "В", так же как и "TG" и "STC"-срезы кварца, имеют ненулевые углы отклонения потока энергии волны от волновой нормали. Попытки "улучшения" среза "В" привели к успеху: нами был найден "ТК-срез" (см. табл. 2), имеющий следующие достоинства: кроме двух вышеупомянутых он имеет нулевой угол отклонения потока энергии волны от волновой нормали, а также высокую чувствительность ПАВ к внешнему давлению, которая составляет $3.45 \times$

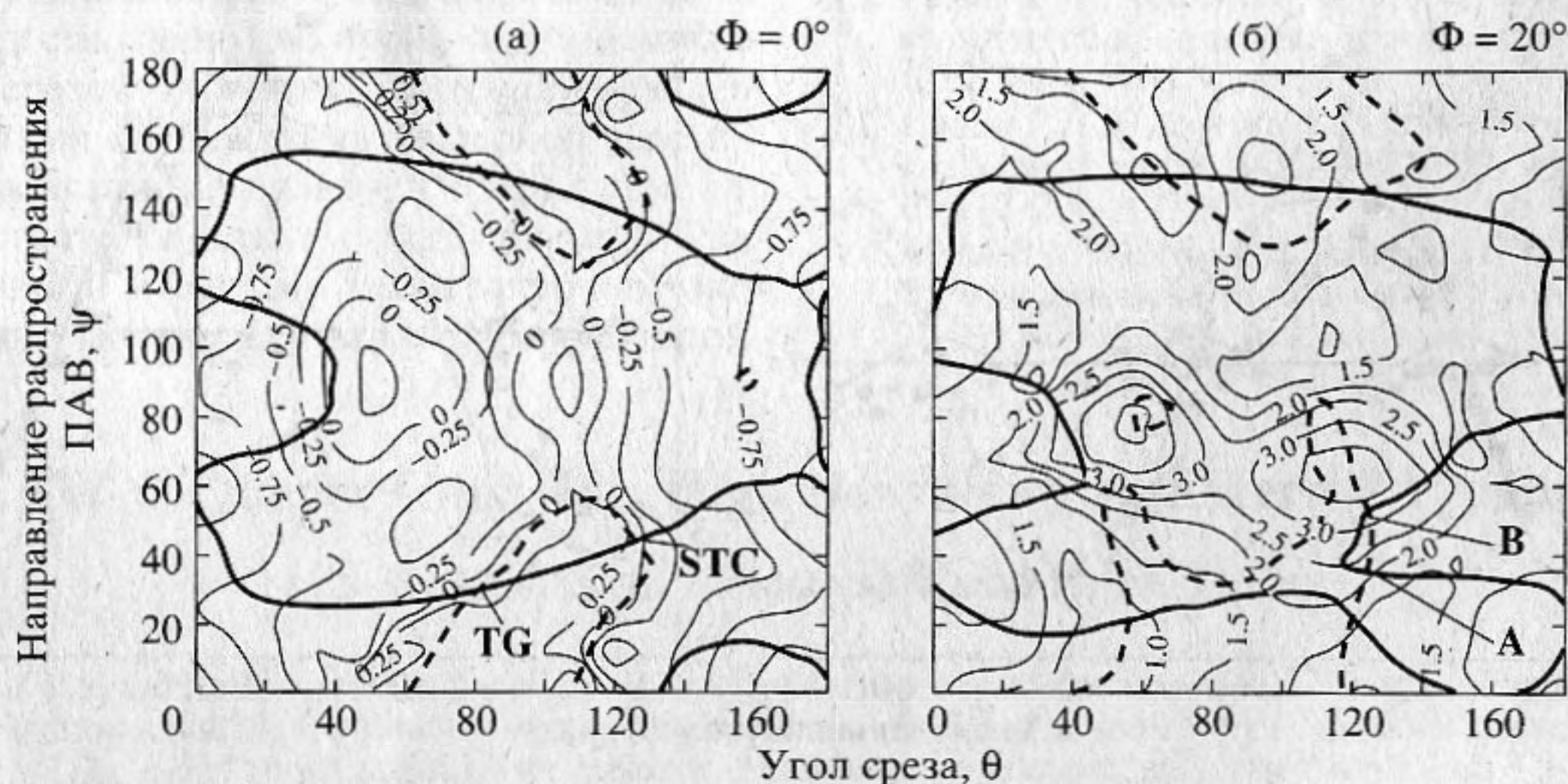


Рис. 6. а, б – контурные изолинии чувствительности к давлению для одноканального (ПАВ-резонатор в центре мембраны) и двухканального сенсора на ПАВ, соответственно. (Жирная линия – нулевая изолиния ТКЗ ПАВ, штриховая линия – изолиния нулевой чувствительности ПАВ к радиальному всестороннему обжатию мембраны.)

Таблица 2. Сравнительная характеристика срезов α -кварца, в которых ПАВ имеют нулевые ТКЗ1 и нечувствительны к всестороннему однородному обжатию по периметру круглой кварцевой мембраны

Ориентация: (Φ , θ , Ψ), углы Эйлера, град	Скорость, м/с	$\Delta V/V$, %	Угол γ , град.	$\partial\gamma/\partial\Psi$	ТКЗ2/ $10^{-8}/^{\circ}\text{C}^2$
(0° ; 131.8° ; 46.9°), STC-срез	3289	0.048	6°	1.09	1.69
(0° ; 80° ; 30°), TG-срез	3397	0.049	5.5°	-0.51	2.92
(20° ; 127.2° ; 36.7°), "А"-срез	3318	0.049	4.8°	-0.18	3.73
(20° ; 127.6° ; 54°), "В"-срез	3326	0.047	-1.8°	0.69	1.77
(15° ; 128.5° ; 52°), ТК-срез	3302	0.049	0°	0.87	1.65

* ТКЗ2 – температурный коэффициент задержки волны второго порядка.

$\times 10^{-11}/\text{Па}$. Это значение чувствительности реализуется при следующем расположении центров резонаторов на поверхности мембраны: ($0.162R$; $-0.987R$) и ($0.987R$; $0.162R$). Следует отметить, что все резонаторы расположены на граничной контурной линии мембраны и ни один из них не расположен в центре мембраны. И этому есть вполне объяснимая причина.

Относительное изменение скорости ПАВ в любой локальной точке мембраны, обусловленное приложенным к ее поверхности внешним давлением P или радиальным обжатием мембраны сосредоточенным источником силы F , может быть записано в одном и том же виде:

$$\Delta V/V_0 = \beta_{11}T_{11}(a_1, a_2) + \beta_{22}T_{22}(a_1, a_2) + \beta_{12}T_{12}(a_1, a_2). \quad (5)$$

Для всестороннего радиального однородного обжатия мембраны эта формула упрощается и не

зависит от координат a_1 и a_2 : $\Delta V/V_0 = \beta_{11}T_{11} + \beta_{22}T_{22}$, здесь, β_{ij} – коэффициенты, зависящие только от материальных констант пластинки. Сравнивая оба выражения, можно ожидать, что не существует срезов, в которых ПАВ обладали бы как максимальной чувствительностью к внешнему давлению, так и минимальной чувствительностью к радиальному обжатию мембраны. Скорее, в кварце существуют срезы и направления распространения волны со слабой чувствительностью как к давлению, так и к радиальному обжатию мембраны, и наоборот. Действительно, наши численные результаты, представленные на рис. 3 и 5, показывают, что для ПАВ-резонатора, расположенного в центре мембраны, слабая чувствительность к радиальному обжатию мембраны, как правило, сочетается со слабой чувствительностью к внешнему давлению мембраны. Точки, обозначенные символами "TG" и "STC" на рис. 6а, представляют хорошо известные "TG-срез" и "STC-срез"

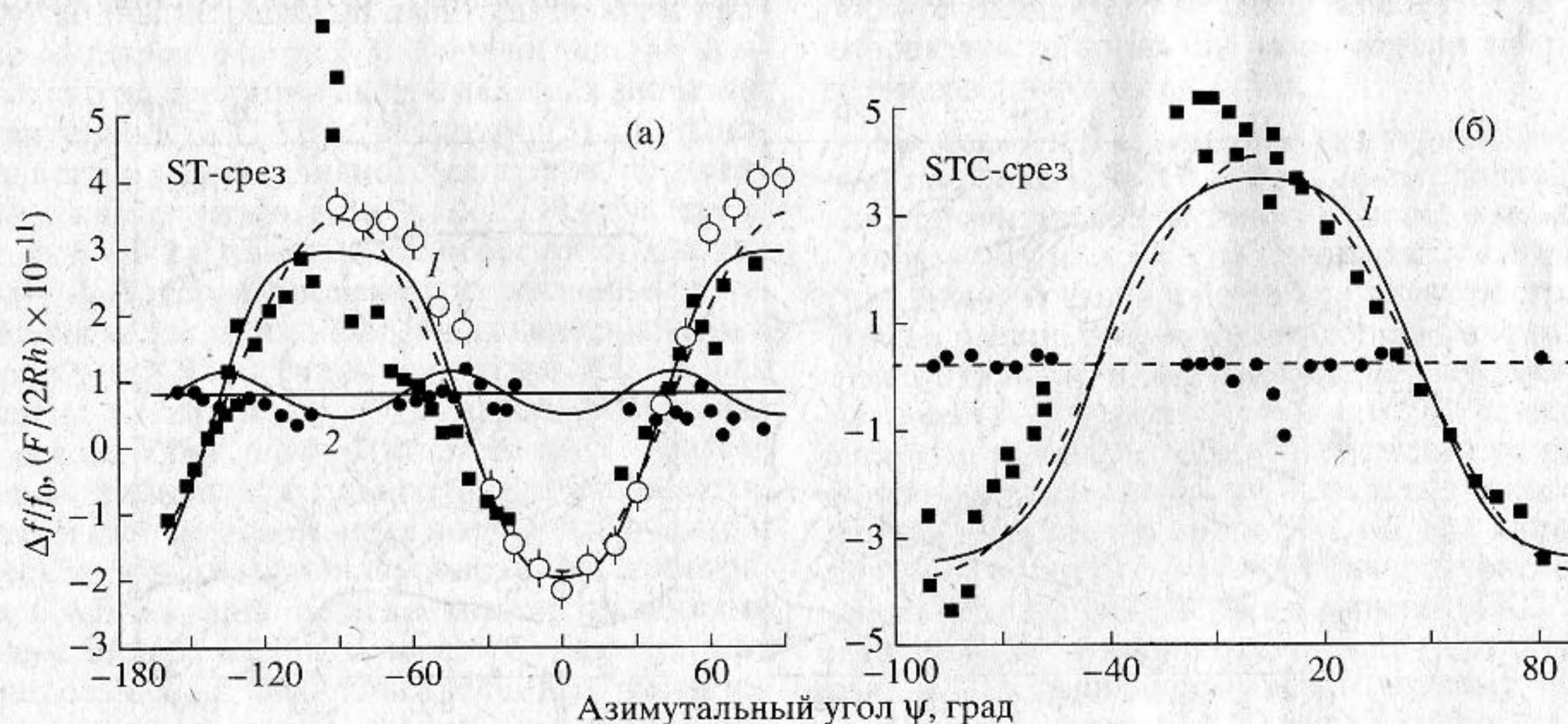


Рис. 7. а, б – зависимость коэффициента частота резонатора – сила обжатия от азимутального угла ψ для резонатора на ПАВ, расположенного в центре мембраны ST-среза и STC-среза кварца. \circ – экспериментальные данные из [15]; \blacksquare , \bullet – экспериментальные данные из [7] для одной и двух пар ортогональных диаметрально-симметричных пар сил обжатия пластинки, соответственно.

кварца, которые широко используются для приложений ПАВ-резонаторов с весьма малой чувствительностью к давлению и радиальному обжатию мембраны, что в конечном итоге позволяет минимизировать влияние различных внешних механических воздействий на стабильность частоты ПАВ-резонаторов.

На рис. 7а, 7б показана зависимость относительного ухода частоты ПАВ-резонатора от азимутального угла приложенных радиальных сил обжатия для ST-среза и STC-среза кварца. Кривые 1 и 2 соответствуют одной и двум парам диаметрально-симметричных сил обжатия мембраны амплитуды F и $F/2$, соответственно (см. рис. 2). Сплошные линии соответствуют результатам, полученным нами из выражения (5) для чисто анизотропной модели для тензора напряжений T_{ij} . Штриховые линии соответствуют результатам, полученным нами из (5) для изотропной модели тензора напряжений T_{ij} [15], но сами коэффициенты β_{ij} в (5) рассчитывались с учетом полной анизотропии α -кварца. Между этими двумя моделями наблюдается неплохое согласие. Хорошее согласие наблюдается между нашими количественными результатами и экспериментальными данными из [7, 15].

Простая полуаналитическая модель представлена для расчета локальной чувствительности ПАВ-резонатора в произвольной точке поверхности мембраны кварца к внешнему давлению и радиальному обжатию мембраны внешними силами. Это позволило достичь экстремальной чувствительности при соответствующем размещении ПАВ-резонаторов на поверхности мембраны для двухканального дифференциального сенсора давления. Теоретические расчеты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными для различных срезов кварца. Обнаружены численными расчетами срезы кварца с высокой чувствительностью к внешнему давлению и одновременно низкой чувствительностью к радиальному обжатию мембраны и нулевыми температурными коэффициентами ухода частоты ПАВ-резонаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sinha B.K., Tanski W.J., Lukaszek T., Ballato A. Influence of biasing stresses on the propagation of surface waves // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 2. P. 767–776.
2. Bigler E., Ballandras S. Stress sensitivity coefficients: A general approach for bulk, Rayleigh and surface transverse waves // IEEE Inter. Freq. Contr. Symp. Proc. 1996. P. 422–429.
3. Ballandras S., Bigler E. Experimental study of SAW quartz cuts with low sensitivity to dynamical thermal effects // Electron. Lett. 1991. V. 27. № 26. P. 1343–1345.
4. Sinha B.K. A stress and temperature compensated orientation and propagation direction for surface acoustic wave devices // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 1987. V. 34. № 1. P. 64–74.
5. Bigler E., Theobald G., Hauden D. SAW quartz cuts with low stress and temperature sensitivity // Electron. Lett. 1987. V. 23. № 10. P. 514–516.
6. Sinha B.K., Locke S. Acceleration and vibration sensitivity of SAW devices // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 1987. V. 34. № 1. P. 29–38.
7. Ballandras S., Bigler E. New results for the characterization of SAW sensitivity to mechanical stresses using Finite element analysis // Ultrason. Symp. Proc. 1991. V. 1. P. 425–429.
8. Tiersten H.F., Baumhauer J.C. Nonlinear electroelastic equations for small field superposed on a bias // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 54. № 4. P. 1017–1034.
9. Tiersten H.F., Sinha B.K. A perturbation analysis of the attenuation and dispersion of surface waves // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. № 1. P. 87–95.
10. Лехницкий С.Г. Решение задачи о плоской деформации для анизотропной упругой эллипсоидальной пластины // ДАН СССР. 1937. Т. 15. № 2. С. 527–530.
11. Bechmann R., Ballato A.D., Lukaszek T.J. Higher order temperature coefficients of the elastic stiffness and compliances of alpha-quartz // Proc. IRE. 1962. V. 50. № 6. P. 1812–1822.
12. Thurston R.N., McSkimmin H.J., Andreatch P. Third-order elastic constants of quartz // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. № 1. P. 267–275.
13. Taziev R.M., Kolosovsky E.A., Kozlov A.S. Deformation-sensitive cuts for surface acoustic waves in α -quartz // IEEE Inter. Freq. Contr. Symp. Proc. 1993. P. 660–664.
14. Савин Г.Н. Некоторые задачи теории упругой анизотропной среды // ДАН СССР. 1939. Т. 23. № 3. С. 217–220.
15. Sinha B.K., Tanski W.J. Influence of biasing stresses on the propagation of surface waves // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 3. P. 767–776.

SAW α -Quartz Cuts with High Sensitivity to External Pressure

A. S. Kozlov, E. A. Kolosovskii, and R. M. Taziev

Effect of external static forces on the phase velocity of surface acoustic waves (SAW) propagating in thin circular anisotropic plates (membranes) of α -quartz is calculated. The local sensitivity of the SAW phase velocity to pressure and radial compression of the membrane as a function of quartz anisotropy is presented in the form of the dependence of sensitivity on two independent variables: the direction of SAW propagation and the cut angle of the quartz plate. A comparison is performed between the calculated and experimental values of the sensitivity of SAW velocity to external pressure and radial compression of quartz membranes. Experimental and computational results are found to be in good agreement.