

ции Коши  $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$ , то  $\lambda = 1 + \varepsilon$  и  $L_{11} = \varepsilon + \frac{\varepsilon^2}{2}$ .

Пусть в простейшем случае ( $E$  — модуль Юнга)

$$f = \frac{EL_{11}^2}{2}, \quad \text{тогда} \quad \frac{\partial f}{\partial L_{11}} = EL_{11} \text{ и}$$

$$\tau_{11}^0 = \frac{\rho}{\rho_0} E \left( \varepsilon + \frac{5}{2} \varepsilon^2 + 2\varepsilon^3 + \frac{\varepsilon^4}{2} \right) = E \varepsilon M(\varepsilon).$$

Множитель  $M = \frac{\rho}{\rho_0} \left( 1 + \frac{5}{2} \varepsilon + 2\varepsilon^2 + \frac{\varepsilon^3}{2} \right)$  в явном виде учитывает вклад геометрической нелинейности в напряжение деформированного отрезка.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости.— М.-Л.: Гостехиздат, 1948.
2. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980, 512 с.

3. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. — М.: Мир, 1965, 456с.
4. Гольденблат И.И. Нелинейные проблемы теории упругости. — М.: Наука, 1969, 336 с.
5. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика.— М.: Наука, 1971, 415 с.
6. Немцов В.Б. К статистической теории нелинейной упругости. ДАН БССР, 1975, Т. 19, С.883-886.
7. Немцов В.Б. Статистическая теория упругости деформируемых тел. В сб. «Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механики». Минск.: «Технопринт», 2001, С. 372-375.
8. Немцов В.Б. Неравновесная статистическая механика систем с ориентационным порядком.— Минск.: «Тэхналогія», 1997, 280 с.
9. Бленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. М.: Мир, 1972, 184 с.

## СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ КУБИЧЕСКОЙ СИМГОНИИ

Колешко В.М., Баркалин В.В., Польшкова Е.В.

*The transition to micro— and nano-sized structures results in broadening the list of materials used in MEMS developing. In the presented work on the unified basis the properties of surface acoustic waves in more than 60 isotropic cubic materials with different functional properties (metals, dielectrics, semiconductors, piezoelectrics, magnetostrictive stuffs, superconductors) are studied. Semiconducting materials GaAs, Si, InSb are interesting from the point of view of developing integral sensory microsystems including sensing, executive and processor units. The single-crystal strontium titanate SrTiO<sub>3</sub> is characterized by high acoustic nonlinearity and is perspective for low-noise devices with superconducting metallization of SAW structures. Iron itrium granatum Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>15</sub> (IIG) has a low elastic anisotropy. The strong magnetostriction, appropriate IIG, allows to use it in devices, based on interaction of SAW with spin waves.*

*On the basis of research of algebraic properties of a SAW phase velocity as function of effective material constants the new approach to definition of sensitivity coefficients of SAW phase velocity to quasistatic volumetric effects on waveguide was developed, founded on the introducing of a tensor  $W$  of partial derivatives of a SAW phase velocity on elastic modules of in crystallophysical coordinate system. Generally  $W$  has no more than 15 independent components, which can be defined experimentally or theoretically from partial sensitivity coefficients of SAW phase velocity to components of deformations, mechanical stresses, temperature and orientation dependencies of SAW phase velocity. This approach allows to compare properties of a number of materials and to state the task of designing of a material with the preset properties under its atomic or molecular characteristics. This approach is suitable for study of SAW in microscopic objects such as grain borders, doubles and microcracks.*

*In case of a bicomponent SAW mode the analytical expressions for a non-zero components of  $W$  are established and the coefficients of deformation and temperature sensitivity for a number of cubic crystals are determined. Is shown, that the values a component  $W$  are determined by a factor of an anisotropy of*

a material  $\eta = \frac{2C_{55}}{C_{11} - C_{12}}$  and parameter  $a = \frac{C_{11}}{C_{55}}$ . At  $h > 2,5$  determining is the relation to a factor of an anisotropy. The introducing of the indicated tensor allows to link value of sensitivity of a SAW phase velocity directly to the characteristics of interatomic forces in a crystal. The indicated connection explicitly is discussed.

Is investigated orientation relations of a phase velocity and factors of deformation sensitivity at longitudinal and lateral deformations for base planes of Si, InSb, GaAs, IIG, SrTiO<sub>3</sub>. These crystals can be arranged on values of a SAW phase velocity values as  $V_{\text{InSb}} < V_{\text{GaAs}} < V_{\text{IIG}} < V_{\text{SrTiO}_3} < V_{\text{Si}}$  for all investigated SAW directions. The indicated orderliness has no a place for orientation dependencies of strain effect.

Переход к микро- и нано-размерным структурам приводит к расширению списка материалов, которые можно использовать при разработке новых типов МЭМС, включающих элементы, традиционно относящиеся к функциональной электронике. Это относится и к использованию «умных» материалов в акустоэлектронике. В данной работе мы рассмотрим с этой точки зрения деформационную чувствительность фазовой скорости ПАВ в звукопроводах из материалов кубической сингонии и изотропных. Этот класс материалов, характеризующийся достаточно широким спектром функциональных свойств (полупроводниковые, пьезоэлектрические, магнитострикционные, сверхпроводящие), в то же время наиболее прост для анализа, а материальные константы этих сред достаточно изучены.

Полупроводниковые материалы (GaAs, Si, InSb) особенно интересны с точки зрения разработки интегральных сенсорных микросхем, включающих чувствительные и процессорные элементы. Пьезоэлектрические свойства кристаллов А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> позволяют не использовать специальных пьезоактивных слоев для возбуждения ПАВ. Кроме указанных выше трех материалов, исследована деформационная чувствительность фазовой скорости ПАВ в монокристаллических титанате стронция SrTiO<sub>3</sub> и железотриграванате Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>15</sub> (ЖИГ). Первый характеризуется высокой акустической нелинейностью, а второй — очень низкой анизотропией упругих свойств. Сильная магнитострикция, свойственная ЖИГ, позволяет использовать его в приборах, основанных на взаимодействиях ПАВ со спиновыми волнами. В то же время титанат стронция перспективен для разработки малощумящих ПАВ-устройств, поскольку может служить в качестве подложки при получении высококачественных пленок высокотемпературных сверхпроводников, которые могут быть использованы в качестве металлизации ПАВ-структур. Очевидно, что во всех этих применениях знание деформационной чувствительности ПАВ-структур весьма существенно. Поэтому основной задачей данной работы является именно исследование тензоэффекта в ПАВ-структурах.

Акустическое поле ПАВ представляет собой периодическое коллективное движение атомов сре-

ды, которое в случае поляризующихся сред сопровождается появлением осциллирующего макроскопического электромагнитного поля и модулирует все физико-химические процессы в приповерхностной области среды на атомарном уровне. В свою очередь, участие атомов среды в любых физико-химических процессах, приводящих к изменению их траекторий вблизи поверхности, отражается на характеристиках поля ПАВ, сосредоточенного в этой области. Таким образом, вследствие самой природы поля ПАВ, в нем интегрируется информация о температуре, деформациях, механических напряжениях и силовых воздействиях на поверхность, ускорении, давлении, электрическом и магнитном полях, адсорбции и абсорбции химических веществ, распределении электрических зарядов и других физико-химических величинах, связанных с переносом энергии, импульса, момента импульса, вещества и заряда в приповерхностной области тела.

Одной из важнейших характеристик поля ПАВ, определяющей распределение энергии ПАВ в пространстве, является ее фазовая скорость  $V_R$  в нагруженном состоянии звукопровода как функция его параметров. Для вычисления  $V_R$  используется метод эффективных материальных констант, зависящие от температуры, квазистатических деформаций и электрического поля в звукопроводе. В предположении, что характерный масштаб изменения эффективных материальных констант в направлении по нормали к поверхности звукопровода намного превосходит длину ПАВ, для кристаллов кристаллов кубической сингонии со слабым пьезоэффектом зависимость эффективных модулей упругости от параметров нагружения в линейном приближении определяется соотношениями:

$$C_{ijkl}^{\text{эфф}}(a_1, T) = C_{ijkl}(T) + \delta_{jk} \hat{t}_{il}(a_1, T) + \\ + C_{in\bar{k}l}(T) \hat{U}_{j,m}(a_1) + C_{ijm\bar{l}}(T) \hat{U}_{k,m}(a_1) + \\ + C_{ijk\bar{l}m}(T) \hat{\eta}_{mn}(a_1),$$

где  $\hat{U}_j$  — квазистатические смещения точек среды, появляющиеся в результате внешнего воздействия,  $T$  — абсолютная температура,  $\hat{t}_{il}(a_1, T)$  — соответствующий тензор квазиста-

тических термодинамических напряжений,  $\hat{U}_{i,k} = \frac{\partial \hat{U}_i}{\partial a_k}$ ;  $\hat{n}_{ik} = \frac{1}{2}(\hat{U}_{i,k} + \hat{U}_{k,i})$  — линейный тензор деформаций,  $C_{ijkl}(T)$  и  $C_{ijklmn}(T)$  — модули упругости второго и третьего порядка материала, измеренные при постоянном электрическом поле.

Температурная зависимость характеристик ПАВ в кубических монокристаллах определяется температурной зависимостью материальных модулей и плотности. Фазовая скорость ПАВ  $V_R$  определяется как неявная функция квазистатических градиентов смещений, температуры и ориентации рабочей поверхности кристалла, задаваемой углами Эйлера  $\lambda, \mu, \theta$ :

$$V_R = V_R(\hat{U}_{k,l}, T, \lambda, \mu, \theta).$$

При использовании ПАВ-структур в качестве сенсорных элементов МЭМС основное значение имеет правильный выбор материалов и параметров звукопровода с точки зрения характеристик чувствительности фазовой скорости ПАВ к внешним воздействиям. При этом часто оказывается, что в большинстве случаев величина коэффициентов чувствительности определяется параметрами подложки, а слои оказывают модулирующее влияние, величина которого определяется их толщиной. В этой связи для анализа чувствительности ПАВ-структур существенное значение имеет определение вклада подложки в чувствительность к тому или иному воздействию.

Для объемных квазиоднородных и квазистатических воздействий фазовая скорость ПАВ в подложке может рассматриваться как термодинамическая функция состояния приповерхностного слоя материала звукопровода толщиной в несколько длин ПАВ. Ее полный дифференциал есть

$$\begin{aligned} \frac{dV_R}{V_R} = & (W_{1nqr} + W_{n1qr} + W_{nq1r} + W_{nqr1}) \cdot \\ & \{C_{2nqr}^{(XYZ)}(d\lambda + \cos\mu d\theta) + \\ & + C_{3nqr}^{(XYZ)}(\cos\lambda \sin\mu d\theta - \sin\lambda d\mu)\} + \\ & (W_{2nqr} + W_{n2qr} + W_{nq2r} + W_{nqr2}) \cdot \\ & \{C_{3nqr}^{(XYZ)}(\cos\lambda d\mu + \sin\lambda \sin\mu d\theta) - \\ & - C_{1nqr}^{(XYZ)}(d\lambda + \cos\mu d\theta)\} - \\ & (W_{3nqr} + W_{n3qr} + W_{nq3r} + W_{nqr3}) \cdot \\ & \{C_{1nqr}^{(XYZ)} \cdot (\cos\lambda \sin\mu d\theta - \sin\lambda d\mu) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + C_{3nqr}^{(XYZ)}(\cos\lambda d\mu + \sin\lambda \sin\mu d\theta)\} + \\ & + \{W_{mnqr}(C_{mnqrst}^{(XYZ)} + \delta_{sq} C_{mntr}^{(XYZ)} + \delta_{sn} C_{mtqr}^{(XYZ)})\} \cdot \\ & \cdot d\bar{u}_{s,t}^{(XYZ)} + \{W_{mnvr}\} \cdot d\bar{t}_{mr}^{(XYZ)} + \\ & + \left\{ W_{mnqr} \frac{\partial C_{mnqr}^{(XYZ)}}{\partial T} + \frac{K}{2} \right\} \cdot dT - \frac{d\rho}{2\rho}, \end{aligned}$$

где  $C^{(XYZ)}$  с соответствующими тензорными индексами — модули упругости материала подложки в кристаллофизической системе координат,  $K$  — коэффициент объемного расширения материала звукопровода,  $\bar{u}_{s,t}^{(XYZ)}$ ,  $\bar{t}_{mr}^{(XYZ)}$  — тензоры градиентов статических деформаций и статических механических напряжений соответственно в кристаллофизической системе,  $r$  — плотность материала,  $W$  — тензор частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости, приведенных к кристаллофизической системе:

$$W_{mnqr}(C_{ijkl}^{(XYZ)}, \lambda, \mu, \theta) = \frac{1}{V_R} \frac{\partial V_R}{\partial C_{mnqr}^{(XYZ)}}.$$

В общем случае  $W$  имеет не более 15 независимых компонент, которые можно определить экспериментально или теоретически по парциальным коэффициентам чувствительности фазовой скорости ПАВ к компонентам  $\bar{u}_{s,t}^{(XYZ)}$ ,  $\bar{t}_{mr}^{(XYZ)}$ , температуре и ориентационной зависимости фазовой скорости ПАВ, или аналитическому уравнению для фазовой скорости ПАВ. В применении к МЭМС именно аналитический подход имеет определенные перспективы, поскольку позволяет локализовать определение  $V_R$ , сделав его пригодным к изучению микрообъектов типа границ зерен, двойников и скорости микротрещин, определяемой  $V_R$ . Кроме того, этот подход позволяет провести сравнение свойств многих материалов и поставить задачу оптимального выбора или конструирования материала с заранее заданными свойствами по его атомно-молекулярным характеристикам.

В случае рэлеевской моды ПАВ, когда звукопровод подвергается воздействию только диагональных градиентов смещений  $\hat{U}_{1,1}, \hat{U}_{2,2}, \hat{U}_{3,3}$ , скорость ПАВ для ориентаций звукопровода  $(001)\langle 100 \rangle$ ,  $(110)\langle 001 \rangle$ ,  $(001)\langle 110 \rangle$ ,  $(110)\langle 110 \rangle$  кристаллов кубической сингонии зависит только от эффективных модулей  $C_{1111}, C_{1331}, C_{1313}, C_{3113}, C_{3333}, C_{1133}$ . Для звукопроводов ориентации  $\{001\}\langle 100 \rangle$  нормированный квадрат фазовой скорости ПАВ  $v = \frac{\rho_0 V^2}{C_{55}}$  и нормированные коэффициенты чувствительности

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1111}}; \frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3333}}; \frac{C_{13}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1133}};$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3113}}; \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3131}}; \frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1331}}$$

определяются двумя параметрами: коэффициентом анизотропии материала звукопровода  $\eta = \frac{2C_{55}}{C_{11} - C_{12}}$  и параметром  $a = \frac{C_{11}}{C_{55}}$ . Были проанализированы свойства более 60 материалов кубической сингонии и изотропных и получены значения нормированных квадрата скорости и ее производных по модулям упругости. Значения последних представляют собой необходимую основу определения влияния внешних воздействий различной физической природы на фазовую скорость ПАВ. Исследованные материалы в совокупности дают достаточно полное представление о величинах, характеризующих ПАВ в звукопроводах ориентации  $(001)\langle 100 \rangle$ . Диапазон представленных значений коэффициента анизотропии  $0.236 (NaI) \pm 9.392 (Li)$ , диапазон значений параметра  $a$   $1.017 (Na) \pm 8.606 (Nb)$ . Диапазон изменения  $\eta$  составляет  $0.19333 (Li) \pm 0.98001 (RbCl)$ , а величин

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1111}} : 0.01198 (RbCl) \div 1.56642 (Li);$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1331}} : 0.44562 (TlCl) \div 1.44315 (Li);$$

$$\frac{C_{13}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1133}} : -2.08327 (Pb) \div -0.00137 (RbCl);$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1313}} : -2.57743 (Li) \div -0.03987 (RbCl);$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3113}} : 0.01076 (KI) \div 1.16414 (Li);$$

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3333}} : 0.01045 (RbCl) \div 1.34543 (Li).$$

Во всех случаях

$$\frac{\partial V}{\partial C_{1111}} > 0, \quad \frac{\partial V}{\partial C_{1331}} > 0, \quad \frac{\partial V}{\partial C_{3311}} < 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial C_{1313}} < 0, \quad \frac{\partial V}{\partial C_{3113}} > 0, \quad \frac{\partial V}{\partial C_{3333}} > 0.$$

Отметим, что при  $h > 2,5$  определяющей является зависимость нормированных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости от коэффициента анизотропии. При близких значениях  $h$  близки и величины нормированных производных. С ростом  $h$  растут и абсолютные величины последних. В то же время при фиксированном коэффициенте анизотропии абсолютные величины нормированных производных слабо зависят от  $a$ .

Из термодинамических неравенств следует, что  $C_{55} > 0$ ,  $1/2C_{11} < C_{13} < C_{11}$ . Тогда для переменных  $a$ ,  $h$

получаем:  $\eta > 2/a$ ;  $a > 1/\eta$ ;  $0 < A < a^2$ . Первое условие ограничивает снизу величины производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости. Если межатомное взаимодействие определяется только центральными силами, то справедливо соотношение Коши  $C_{55} = C_{13}$ . Тогда  $A = a^2 - 1$ ,  $\eta = 2/a - 1$ . Таким образом, условие  $h = 2/a$  ограничивает влияние нецентральных взаимодействий на коэффициент анизотропии. В то же время кристаллы с коэффициентом анизотропии  $\eta < 0,2$  неизвестны. Поэтому диапазоны  $0,2 < \eta < 10$ ,  $1 < a < 10$  включают в себе достаточно представительный класс кубической кристаллов.

На рис.1 показано распределение исследованных материалов в плоскости  $(a, \eta)$ . Сплошная линия соответствует предельному значению  $a = 2/\eta$ . Видно, что изученные материалы концентрируются в области  $2 < a\eta < 7$ . В то же время для прогнозирования характеристик ПАВ-устройств на основе новых материалов важно заранее знать значение парциальных коэффициентов чувствительности к различным воздействиям. В связи с этим были рассчитаны величины нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости в зависимости от  $a$  и  $h$  в диапазонах  $0 < \eta \leq 12$ ,  $2/\eta < a < 10$ , представленные на рис.2. В диапазоне  $\eta > 3$  зависимости указанных величин от  $a$  при фиксированном  $h$  довольно слабы. С высокой точностью их можно представить как

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1331}} = 0.120\eta + 0.020(e^{-1.1564(a-2)} - 1);$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3113}} = 0.1267\eta + 0.0362(e^{-0.6671(a-2)} - 1);$$

$$\frac{C_{55}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1313}} = -0.253\eta - 0.0704(e^{-0.6489(a-2)} - 1);$$

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1111}} = 0.1267a\eta + 0.02816a(e^{-0.6489(a-2)} - 1);$$

$$\frac{C_{11}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{3333}} = 0.1267a\eta - 0.0701a(e^{-0.7799(a-2)} - 1);$$

$$\frac{C_{12}}{V} \frac{\partial V}{\partial C_{1133}} = -0.2517a\eta + 0.2202a(e^{-0.8636(a-2)} - 1);$$

Эти выражения можно использовать для вычисления парциальных коэффициентов чувствительности фазовой скорости ПАВ DCV11, DCV22, DCV33 к компонентам тензора деформаций  $h_{11}$ ,  $h_{22}$ ,  $h_{33}$  и SCV11, SCV33 к соответствующим компонентам тензора статических напряжений, а также TCV. Некоторые из рассчитанных таким образом величин представлены в таблице 1. Рекордным по величине деформационной чувствительности фазовой скорости ПАВ является сверхпроводящая керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , что связано с большим значением коэффициента акустической нелинейнос-

ти этого материала  $\sim 100$ . В таблице 2 представлены вычисленные значения парциальных коэффициентов чувствительности ко всем компонентам тензора деформации и вектора статических вращений  $R_i = \frac{1}{2} \epsilon_{ijk} \hat{U}_{j,k} RCVi, i=1,2,3$ , в зависимости от пористости этого материала.

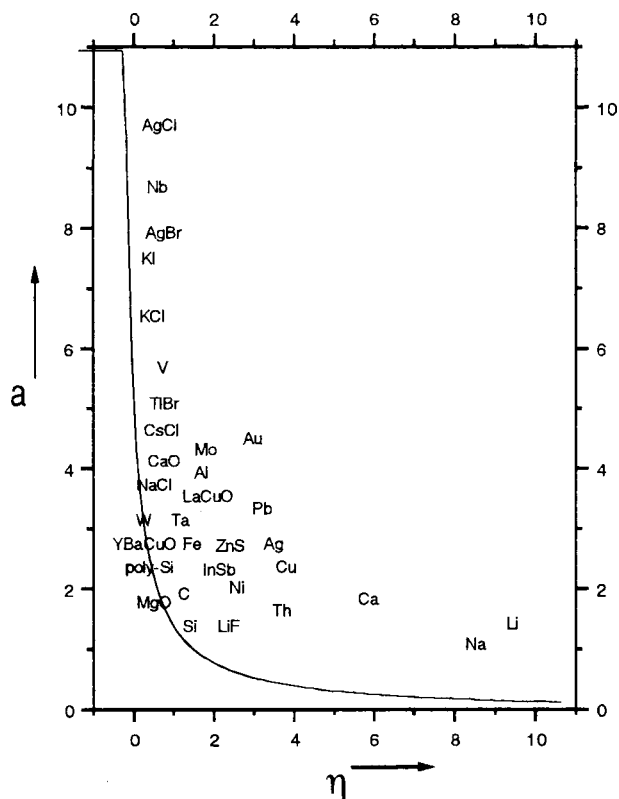
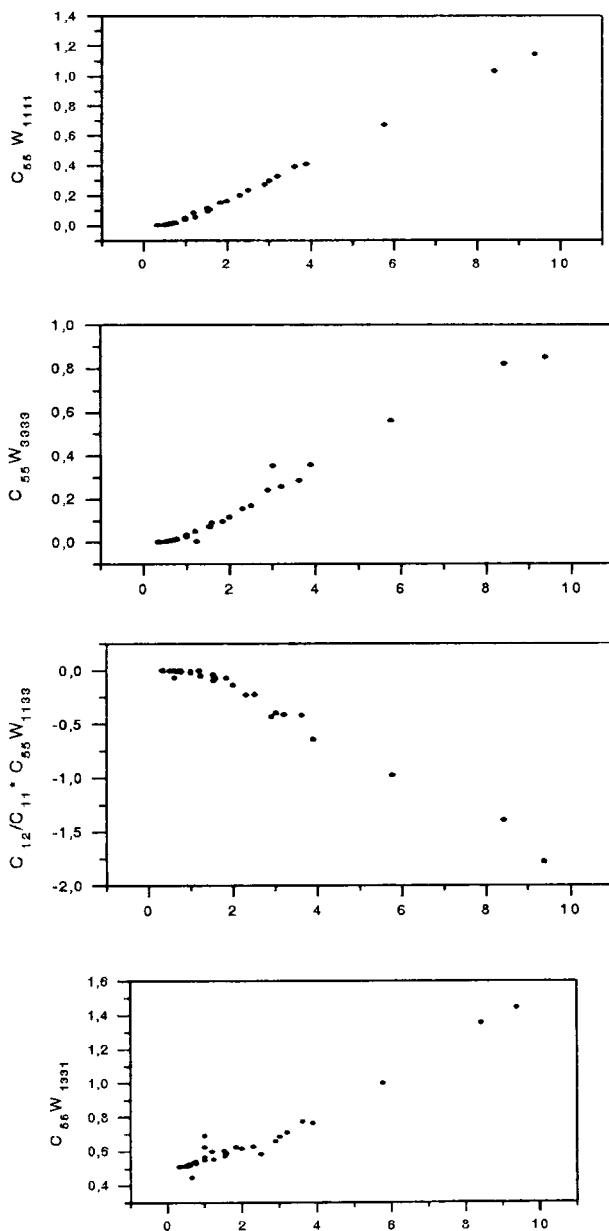


Рис. 1.

Введение производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости позволяет непосредственно связать величину чувствительности фазовой скорости ПАВ с характеристиками межатомных сил. Поскольку величины нормированных частных производных  $R_i = \frac{1}{2} \epsilon_{ijk} \hat{U}_{j,k}$  определяются в основном величиной коэффициента анизотропии  $h$ , то определяющим для них фактором будут величины тех характеристик межатомных сил, которые определяют и величину  $\eta$ . В соединениях ряда  $A_N B_{8-N}$  это в первую очередь степень ионности связей  $f_i$ , при этом следует учитывать, что зависимость  $\eta$  от  $f_i$  распадается на две ветви. В диапазоне  $0 \leq f_i \leq 0.654$  коэффициент анизотропии монотонно растет с ростом ионности, принимая значения в диапазоне  $1.65 \leq h \leq 2.3$ . В диапазоне ионностей  $0.65 \leq f_i \leq 0.785$  скорость роста резко увеличивается, достигая очень больших величин, а значение  $f_i = 0.785$  является критическим. При этом значения ионности коэффициент анизотропии становится бесконечно большим, что трактуется как неустойчивость соответствующей решетки. В диапазоне  $0.785 \leq f_i \leq 1.0$  коэффициент анизотропии быстро падает от бесконеч-

ных значений до нуля (эта ветвь соответствует щелочногалогидным соединениям). Для кристаллов  $M_g O, A_g Br, A_g Cl$ , значение ионности которых близко к критическому, коэффициент анизотропии остается конечным и небольшим по величине. Из рассмотрения описанных зависимостей следует, что наибольшими значениями нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости обладают кристаллы со степенью ионности, близкой к критической ( $f_i^{кр} = 0.785$ ). В рассматриваемом ряду  $A_N B_{8-N}$  к ним относятся галогениды меди  $CuI, CuBr, CuCl$  ( $h=3, 6, 12$ ) соответственно, соединения  $A_2 B_6, ZnTe, b-ZnSe, CdTe, CdS, CdSe$  ( $h=2.05, 2.3, 2.26, 2.39, 2.7, 2.8$ , соответственно).



Для ковалентных кристаллов с решеткой типа алмаза ( $f_i=0$ ) коэффициент анизотропии и, следовательно, величины нормированных частных про-

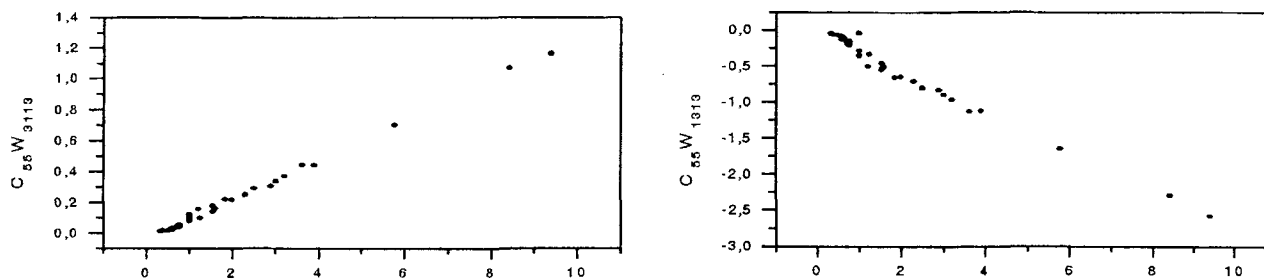


Рис. 2.

Таблица 2

Парциальные коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ для ориентации {001}<100> звукопроводов из материалов кубической сингонии

Материал	DCV11	DCV22	DCV33	SCV11, $10^{-11} \frac{m^2}{H}$	SCV33, $10^{-11} \frac{m^2}{H}$	TCV, $10^{-5} K^{-1}$
Si	-1,511	-0,882	-0,647	0,886	0,309	-2,956
Ge	-1,661	-1,218	-0,791	1,090	0,405	-3,887
GaAs	-1,55	-1,232	-0,742	1,274	0,512	-5,291
SiO2(ил)	1,57	1,491	2,117	1,953	0,425	8,565
ZnSe				2,075	1,011	-5,738
KBr				9,995	0,298	-4,700
KCl				8,170	0,268	-7,031
CsI				8,698	0,916	-49,382
KI				13,444	0,334	-6,957
Poly-Si				1,013	0,202	-2,342
NaCl	-2,936	0,100	-1,744	4,332	0,486	-1,328
NaF	-2,633	0,081	-1,472	1,999	0,262	-11,921
CsBr				7,684	0,998	-46,618

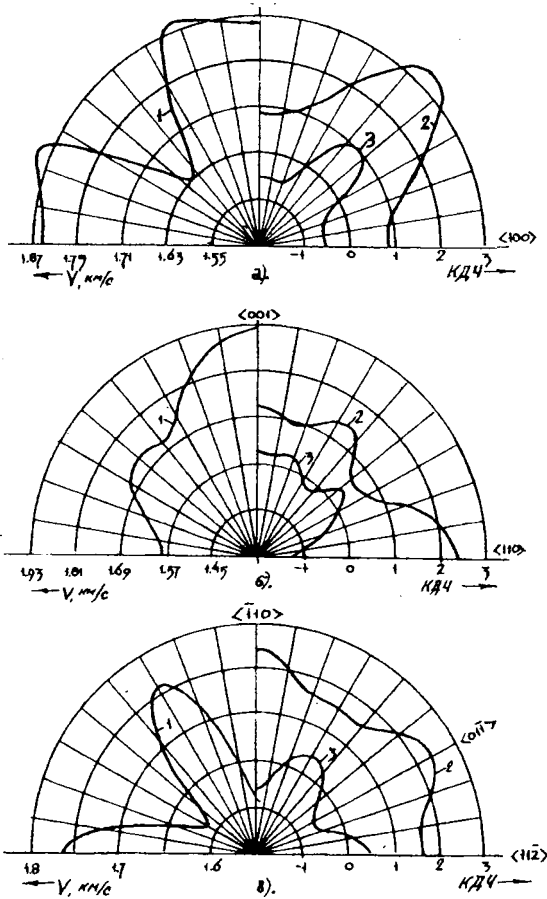
Таблица 3

Парциальные коэффициенты чувствительности фазовой скорости ПАВ в керамическом  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в зависимости от пористости  $n$

Фазовая скорость, коэффициенты чувствительности	Пористость		
	$n=0.18$	$n=0.056$	$n=0.0$
$V_R, m/c$	2281.8	2613.7	2727.1
DCV <sub>11</sub>	-17.23	-31.12	-34.86
DCV <sub>22</sub>	-9.95	-17.96	-20.12
DCV <sub>33</sub>	-16.47	-29.41	-32.87
DCV <sub>23</sub> , $\times 10^{-2}$	-0.75	-2.75	-3.57
DCV <sub>13</sub>	-0.11	$\tau$ -0.35	-0.44
DCV <sub>12</sub> , $\times 10^{-2}$	-3.28	-0.12	-0.15
RCV <sub>1</sub> , $\times 10^{-3}$	-0.13	-0.14	-0.14
RCV <sub>2</sub> , $\times 10^{-2}$	-0.16	-0.14	-0.14
RCV <sub>3</sub> , $\times 10^{-3}$	-0.10	-0.11	-0.12

изводных фазовой скорости ПАВ, определяется степенью металличности связей, которую можно характеризовать главным квантовым числом  $n$  валентной оболочки атомов, образующих кристалл. С ростом  $n$  коэффициент анизотропии растет, что связано с увеличением металлизации связи, поэтому растут и величины нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ по модулям упругости в ряду (C, -SiC, Si, Ge, a-Sn).

Известно закономерное уменьшение коэффициента анизотропии с ростом степени нецентральности межатомных сил связи для всех исследованных кристаллов с решетками типа алмаза и сфалерита. Соответственно для таких кристаллов должно наблюдаться закономерное увеличение абсолютных значений нормированных частных производных фазовой скорости ПАВ с уменьшением ковалентности связей за счет роста их ионности или металличности вследствие ослабления нецентральных сил.

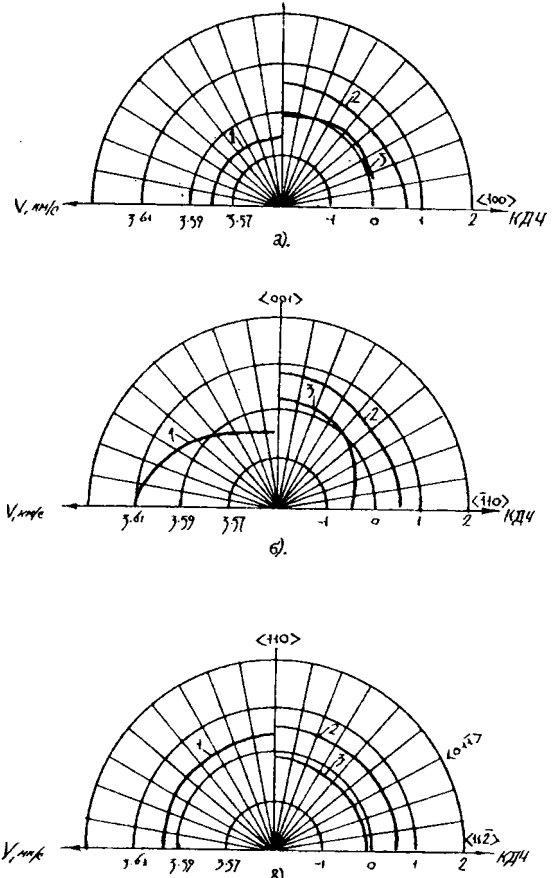


а - {001}, б - {110}, в - {111}  $As_2S_3$ ; 1 -  $v$ , 2 -  $КДЧ_{||}$ , 3 -  $КДЧ_{\perp}$

Рис.3.

На рис. 3-4 представлены ориентационные зависимости фазовой скорости и коэффициентов деформационной чувствительности (КДЧ) фазовой скорости ПАВ в плоскостях распространения {110}, {001}, {111} кристаллов антимонида индия и железиттриевого граната соответственно. Коэффициенты деформационной чувствительности

рассчитывались для случаев продольного и поперечного по отношению к направлению ПАВ нагружения звукопровода в конфигурации консоли, которая используется в сенсорах механических величин и актюаторов с контролем на ПАВ. Представленные данные свидетельствуют о том, что КДЧ обладают собственными экстремумами, не сводящимися к экстремумам фазовой скорости ПАВ, и поэтому информационно более емки, чем  $V_R$ .



а) {001} ЖИГ; б) {110} ЖИГ; в) {111} ЖИГ; 1 - фазовая скорость ПАВ; 2 -  $КДЧ_{||}$ ; 3 -  $КДЧ_{\perp}$

Рис.4.

Вычисленные ориентационные зависимости  $\gamma$  при продольных ( $\gamma_{||}$ ) и поперечных ( $\gamma_{\perp}$ ) деформациях для 5 кристаллов показаны на рис. 5-7. Очевидно качественное отличие ориентационной зависимости тензоэффекта в звукопроводах из титаната стронция от соответствующих кривых для кремния, арсенида галлия и антимонида индия, весьма между собой сходных. Это различие свойств особенно проявляется в плоскости {110}. Для InSb, GaAs, ЖИГ, Si имеем и  $\gamma_{||} > 0, 2B > 2.5 < 0$ : 4; 0 SrTiO<sub>3</sub>  $\gamma_{||} < 0$  в большинстве направлений этой плоскости. Экстремальные значения  $\gamma_{\perp}$  для InSb, GaAs, Si достигаются в высокосимметричных направлениях распространения, в то время как для SrTiO<sub>3</sub> в плоскостях {110} и {001} это происходит при  $\theta=54^\circ$  и  $26^\circ$  соответственно, а абсолютный экстремум  $g$  достигает 2.6, что превосходит

все известные в литературе данные по монокристаллам и приближается к рекордному значению  $g_{\parallel} = 3.1$  плавленого кварца. Такая большая величина тензоэффекта в титанате стронция объясняется более высоким значением коэффициента акустической нелинейности этого материала по сравнению с другими.

Ориентационная зависимость тензоэффекта в ЖИГ гораздо слабее, чем во всех других исследованных материалах, что связано в первую очередь со значением коэффициента анизотропии этого материала, равным 0.967, что весьма близко к 1.

Тензоэффект в InSb, GaAs в окрестности осей симметрии проявляется сильнее, чем в Si. Заметим, что из определения зависимости  $g(q)$  следует, что ее экстремумы соответствуют тем направлениям распространения ПАВ, для которых направление групповой скорости при деформировании не меняется. Из представленных данных следует, что таких направлений в группе кристаллов InSb, GaAs, Si больше, чем в кристаллах SrTiO<sub>3</sub> и ЖИГ, а сами экстремальные направления довольно близки.

Отметим, что исследованные кристаллы можно упорядочить по значениям фазовой скорости ПАВ:

$$V_{\text{InSb}} < V_{\text{GaAs}} < V_{\text{ЖИГ}} < V_{\text{SrTiO}_3} < V_{\text{Si}}$$

причем эта упорядоченность справедлива для всех исследованных направлений ПАВ. Несмотря на то, что скорость ПАВ входит в знаменатель определения коэффициентов деформационной чувствительности, указанная упорядоченность не проявляет себя в ориентационных зависимостях тензоэффекта. Это еще раз подчеркивает самостоятельную значимость исследования последних.

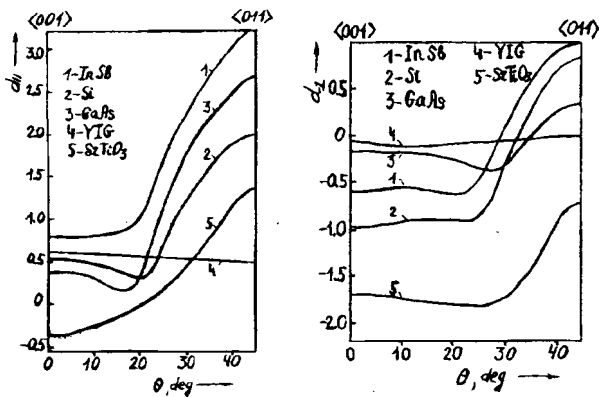


Рис. 5 Ориентационные зависимости  $\gamma_{\parallel}, \gamma_{\perp}$  в плоскости  $\{001\}$

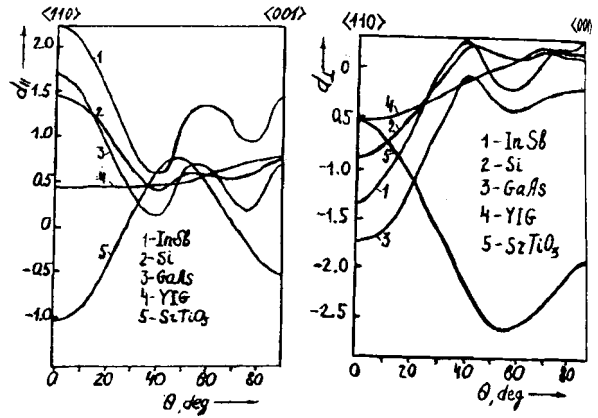


Рис. 6. Ориентационные зависимости  $\gamma_{\parallel}, \gamma_{\perp}$  в плоскости  $\{110\}$ .

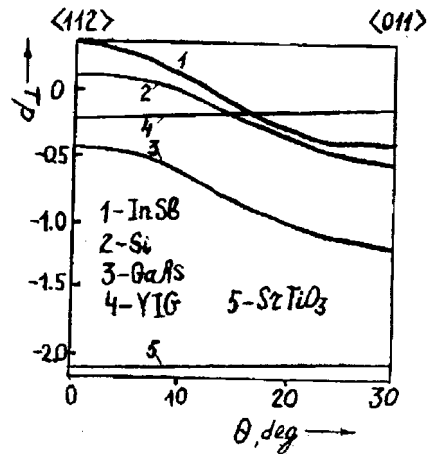
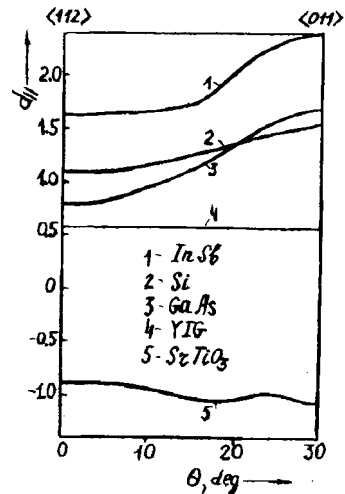


Рис. 7. Ориентационные зависимости  $\gamma_{\parallel}, \gamma_{\perp}$  в плоскости  $\{111\}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1634063.
2. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1634111.



3. Преобразователь давления (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1572187.
4. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1378721.
5. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1426400.
6. Преобразователь механических величин (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1410642.
7. Устройство на поверхностных акустических волнах (Колешко В.М., Мешков Ю.В., Баркалин В.В.) - авторское свидетельство СССР N 1436831.

## ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СТРУКТУРЕ $\text{LiNbO}_3/a:\text{C}$

Колешко В.М., Баркалин В.В., Паутино А.А.

*From the point of view the microelectromechanics the surface acoustic waves (SAW) in multilayer structures consisting of a crystalline substrate and several parallel plate functional layers of different thickness from crystalline, polycrystalline, nanostructured or amorphous materials. One of the most perspective material of a SAW substrate is the single-crystal lithium niobate having a high electromechanical coefficient and used in different passive and active devices of an acoustoelectronics from filters up to nonlinear circuits of memory and SAW sensors. The single crystal of a niobate of lithium is, alongside with crystal, one of the most studied acoustic crystal, for which all material constants of the second and third orders are known. At the same time there is in many respects obscure a SAW deformation sensitivity in this crystal, and also range of possible control of SAW the characteristics by means of the introducing in a  $\text{LiNbO}_3$ -acoustic line of different functional layers. In the present study these problems are clarified on an example of a layer of nanostructured carbon material containing, in particular, the ordered set carbon nanotubes.*

*For calculus of a SAW phase velocity in multilayer SAW structure the algorithm, founded on a method of effective material constants dependent on temperature, quasistatic deformations and electrical field in an acoustic waveguide in Lagrangian coordinates and taking into account linear and non-linear effects of an electric polarization, elasticity, piezoactivity, and electrostriction is offered. The material parameters of a layer of a carbon material were determined by a method of an effective elastic medium. At present paper the composite layer with carbon nanotuber of the cylindrical form is esteemed. Nanotube diameter is 10 nm, length is peer to depth of a composite  $a:\text{C}$  layer. The composite matrix was modelled by a material with parameters of amorphous carbon.*

*The relation of a SAW phase velocity in  $\text{LiNbO}_3/a:\text{C}$  structures from a SAW propagation direction for substrates X-, Y- and Z-cut  $\text{LiNbO}_3$ , from a thickness of  $a:\text{C}$ , from the contents and orientation of nanotubes layer was studied. Is established, that the relation of SAW phase velocity from the thickness of a carbonic layer has non-linear nature. In Z-directions on X- and Y- cuts and on X- on a Z-cut the sharp reduction of SAW velocity is watched at increase of depth of a carbonic layer, that results in qualitative rearrangement of relations with replacement of maxima on minima. It allows to suspect a sharp response of the data of directions to exposures. The introducing nanotubes in a material of a layer allows to execute control of a SAW phase velocity in a broad band. The linear dependence of SAW speed from nanotube concentration in a layer is watched. With increase angle the relation gains essential nonlinearity, that causes a sharp response of investigated frame to exposures. At defined values of parameters the construction low-dispersion laminated SAW structures is possible.*

*Thus, the conducted researches have shown prospects of usage of nanostructured carbon material stuff for new acoustoelectronic devices on the basis of  $\text{LiNbO}_3$ .*

С точки зрения микроэлектромеханики особый интерес представляют поверхностные акустические волны (ПАВ) в многослойных структурах, состоящих из кристаллической подложки и нескольких плоскопараллельных функциональных слоев различной толщины из кристал-

лического, поликристаллического или аморфного материала. Одним из наиболее перспективных материалов подложки является монокристаллический ниобат лития, обладающий высоким коэффициентом электромеханической связи и используемый поэтому в самых разных пас-