

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 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 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 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-

сивных и активных устройствах акустоэлектроники от фильтров до нелинейных устройств памяти и сенсоров на ПАВ. Поэтому монокристаллы ниобата лития является, наряду с кварцем, одним из наиболее изученных акустических кристаллов, для которого известны все материальные константы второго и третьего порядков. Вместе с тем остается во многом невыясненной деформационная чувствительность фазовой скорости ПАВ в этом кристалле, а также диапазон возможного управления характеристиками ПАВ посредством введения в звукопровод функциональных слоев. В данной работе эти вопросы выясняются на примере слоя наноструктурированного углерода, включающего, в частности, упорядоченный набор углеродных нанотрубок.

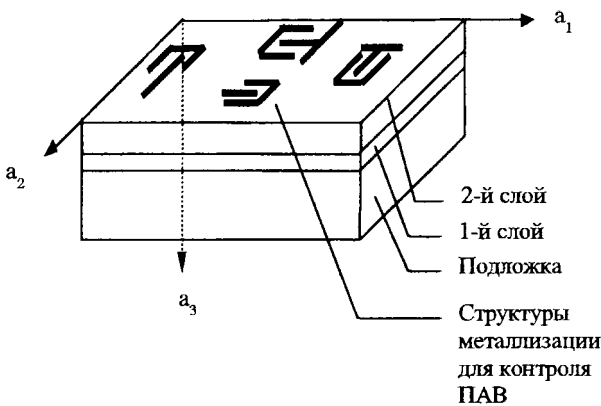


Рис. 1. Многослойный звукопровод ПАВ для МЭМС

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. Эта величина играет ключевую роль в формировании частотных характеристик ПАВ-структур, в частности, задает время задержки в линиях задержки на ПАВ, определяет резонансную частоту ПАВ-резонаторов, а ее относительное изменение в результате воздействий на звукопровод является мерой их интенсивности в сенсорных устройствах на ПАВ. Ее значение определяется тем фактом, что для эффективного возбуждения, трансформации и детектирования ПАВ расположение элементов ПАВ-структуры должно соответствовать определенным фазовым соотношениям в поле ПАВ.

Для вычисления V_R используется метод эффективных материальных констант, зависящих от температуры, квазистатических деформаций и электрического поля в звукопроводе. Такой подход означает использование лагранжевых координат сплошной среды (a_1, a_2, a_3) , относящихся к естественному недеформированному

состоянию звукопровода (рис. 1.). Предполагается, что ПАВ распространяется вдоль направления a_1 , а нормаль к поверхности распространения направлена вдоль a_3 .

Лагранжевы координаты точек среды и аналитическая форма уравнений материальных гиперповерхностей и линий в лагранжевых координатах не изменяются при деформировании среды. Именно поэтому лагранжево описание предпочтительнее обычно используемого пространственного при теоретическом рассмотрении связанных с распространением ПАВ задач при наличии деформаций.

Смещения точек среды в ПАВ, распространяющейся вдоль a_1 , определяются как линейные комбинации парциальных плоских волн вида

$$\beta_j \cdot \exp(-\alpha\omega/V \cdot a_3) \cdot \exp(i\omega(t - a_1/V)), \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

в подложке и каждом слое, где V — параметр скорости, t — время. Это означает, что в лагранжевом описании ПАВ и в деформированном состоянии звукопровода остается плоской волной.

В пьезоактивной среде механические деформации ПАВ сопровождаются волной электрического потенциала, представляющей собой аналогичную линейную комбинацию парциальных волн

$$\beta_4 \cdot \exp(-\alpha\omega/V \cdot a_3) \cdot \exp(i\omega(t - a_1/V)). \quad (2)$$

Парциальные коэффициенты проникновения α и соответствующие парциальные амплитуды β_j определяются для каждого слоя и подложки отдельно как решение соответствующей алгебраической системы

$$\Gamma_{ik}^{(Q)} \cdot \beta_k = 0, \quad i, k = 1, 2, 3, 4, \quad (3)$$

где

$$\Gamma_{jk}^{(Q)} = C_{3jk3}^{(Q)} \cdot \alpha^2 + (C_{1jk3}^{(Q)} + C_{3jk1}^{(Q)})i\alpha - C_{1jk1}^{(Q)} + \rho_0^{(Q)} V^2 \delta_{jk}, \quad j, k = 1, 2, 3; \quad (4a)$$

$$\Gamma_{k4}^{(Q)} = E_{3k3}^{(Q)} \cdot \alpha^2 + (E_{31k}^{(Q)} + E_{13k}^{(Q)})i\alpha - E_{11k}^{(Q)}, \quad k = 1, 2, 3; \quad (4б)$$

$$\Gamma_{4k}^{(Q)} = E_{3k3}^{(Q)} \cdot \alpha^2 + (E_{3k1}^{(Q)} + E_{1k3}^{(Q)})i\alpha - E_{1k1}^{(Q)}, \quad k = 1, 2, 3; \quad (4в)$$

$$\Gamma_{44}^{(Q)} = -\mathcal{E}_{33}^{(Q)} \cdot \alpha^2 - (\mathcal{E}_{13}^{(Q)} + \mathcal{E}_{31}^{(Q)})i\alpha + \mathcal{E}_{11}^{(Q)}; \quad (4г)$$

$C_{ijk}^{(Q)}, E_{ij}^{(Q)}, \mathcal{E}_{ij}^{(Q)}$ — эффективные модули упругости, пьезомодули и компоненты тензора диэлектрической проницаемости, зависящие от температуры, квазистатических деформаций и электрического поля в звукопроводе, $\rho_0^{(Q)}$ — плотность материала звукопровода в естественном недеформированном состоянии, $d_{ij}^{(Q)}$ — символ Кронекера, а $Q=1, 2, \dots, N$ или S для соответствующего слоя и подложки.

В предположении, что характерный масштаб изменения эффективных материальных констант в направлении по нормали к поверхнос-

ти звукопровода намного превосходит длину ПАВ, их зависимость от параметров нагружения определяется соотношениями:

$$C_{ijkl}^{\varphi\phi}(a_1, T) = C_{ijkl}(T) + \delta_{jk} \hat{t}_{il}(a_1, T) + C_{imkl}(T) \hat{U}_{j,m}(a_1) + C_{ijml}(T) \hat{U}_{k,m}(a_1) + C_{ijklmn}(T) \hat{\eta}_{mn}(a_1) - E_{mijkl}(T) \hat{E}_m(a_1), \quad (5)$$

$$E_{jkl}^{\varphi\phi}(a_1, T) = E_{jkl}(T) + E_{jkm}(T) \hat{U}_{l,m}(a_1) + E_{jkimnl}(T) \hat{\eta}_{mn}(a_1) + F_{jmk}(T) \hat{E}_m(a_1), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{jk}^{\varphi\phi}(a_1, T) = \varepsilon_{jk}(T) + \varepsilon_{jkm}(T) \hat{E}_m(a_1) + F_{jkmn}(T) \hat{\eta}_{mn}(a_1); \quad (7)$$

где \hat{U}_i, \hat{E}_m — квазистатические смещения точек среды и электрическое поле, появляющиеся в результате внешнего воздействия, $\hat{t}_{ij}(a_1, T)$ — соответствующий тензор квазистатических термодинамических напряжений, $U_{i,k} = \frac{\partial U_i}{\partial a_k}$;

$\eta_{ik} = \frac{1}{2}(U_{i,k} + U_{k,i})$ — линейный тензор деформаций, $C_{ijkl}(T)$ и $C_{ijklmn}(T)$ — модули упругости второго и третьего порядка материала, измеренные при постоянном электрическом поле, $E_{jkl}(T)$ и $E_{jkimnl}(T)$ — соответствующие пьезомодули второго и третьего порядка, $F_{jmk}(T)$ — тензор электрострикции, $\varepsilon_{jk}(T)$ и $\varepsilon_{jkm}(T)$ — тензоры линейной и нелинейной диэлектрической проницаемости, измеренные при постоянной деформации.

Температурная зависимость характеристик ПАВ определяется температурной зависимостью материальных модулей, плотности, толщин слоев, а также температурными напряжениями в слоях и подложке, возникающими вследствие различия коэффициентов теплового расширения. В слоях действуют также внутренние механические напряжения, обусловленные структурной и фазовой неоднородностью материалов, которые можно считать изотропными в плоскости слоев. Суммарные статические напряжения в слое Q в линейном по температуре приближении можно представить в виде

$$\sigma_{ii}^{(Q)}(a_i, T) = \sigma_{ii}^{(Q)}(a_i, T) - (C_{ii11}^{(Q)} + C_{ii22}^{(Q)} - 2 \frac{C_{ii33}^{(Q)}}{C_{3333}^{(Q)}}) \cdot (\beta_{ii}^{(Q)} - \beta_{ii}^{(Q-1)}) \cdot (T - T_0), \quad i=1,2. \quad (8)$$

Здесь $\beta_{ii}^{(Q)}$ — тензор коэффициентов термического расширения, $\sigma_{ij}^{(Q)}$ — внутренних механических напряжений слоя Q, T_0 — опорная температура (комнатная). В том же приближении температурная зависимость толщины и плотности слоя Q дается выражениями:

$$H^{(Q)}(T) = H^{(Q)}(T_0) [1 + \{\beta_{33}^{(Q)} + \sum_{i=1}^2 \frac{C_{ii33}^{(Q)}}{C_{3333}^{(Q)}} (\beta_{ii}^{(Q)} - \beta_{ii}^{(Q-1)}) \cdot (T - T_0)\}], \quad (9)$$

$$\rho_0^{(Q)}(T) = \rho_0^{(Q)}(T_0) [1 + \{\beta_{33}^{(Q)} + \sum_{i=1}^2 (\beta_{ii}^{(Q)} + \frac{C_{ii33}^{(Q)}}{C_{3333}^{(Q)}} (\beta_{ii}^{(Q)} - \beta_{ii}^{(Q-1)})) \cdot (T - T_0)\}]. \quad (10)$$

Термодинамические напряжения в слое с номером Q представляются в виде

$$\hat{t}_{il}^{(Q)}(a_i, T) = T_{il}^{(Q)}(a_i, T) + (\delta_{il} - \delta_{i3} \delta_{l3}) \sigma_{ii}^{(Q)}(a_i, T), \quad (11)$$

где первое слагаемое зависит от температуры только вследствие температурной зависимости материальных констант и определяется термодинамическим соотношением

$$T_{il}^{(Q)}(a_i, T) = C_{ilmn}^{(Q)}(T) \hat{U}_{m,n}(a_i) + E_{kil}^{(Q)}(T) \hat{E}_k(a_i), \quad (12)$$

обобщающим закон Гука на пьезоэлектрики.

Компоненты материальных тензоров каждого слоя и подложки связаны с их значениями в соответствующих кристаллофизических системах координат, отмечаемых ниже штрихами, соотношениями

$$\begin{aligned} E_{ijk}^{(Q)} &= R_{im}^{(Q)} * R_{jn}^{(Q)} * R_{kp}^{(Q)} * E_{mnp}^{r(Q)}, \\ E_{ijkim}^{(Q)} &= R_{ip}^{(Q)} * R_{jq}^{(Q)} * R_{ks}^{(Q)} * R_{lt}^{(Q)} * R_{mu}^{(Q)} * E_{pqstu}^{r(Q)}, \\ \varepsilon_{ij}^{(Q)} &= R_{im}^{(Q)} * R_{jn}^{(Q)} * \varepsilon_{mn}^{r(Q)}, \\ \varepsilon_{ijk}^{(Q)} &= R_{ip}^{(Q)} * R_{jq}^{(Q)} * R_{ks}^{(Q)} * \varepsilon_{pqs}^{r(Q)}, \\ F_{ijkl}^{(Q)} &= R_{im}^{(Q)} * R_{jn}^{(Q)} * R_{kp}^{(Q)} * R_{ls}^{(Q)} * F_{mnpqs}^{r(Q)}, \end{aligned}$$

где ортогональная матрица $R^{(Q)}$, описывающая переход от координатной системы (a_1, a_2, a_3) в естественном недеформированном состоянии к соответствующей кристаллофизической системе есть

$$R^{(Q)} = \begin{vmatrix} \cos\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} & \sin\lambda^{(Q)} \cos\theta^{(Q)} + \cos\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} \sin\theta^{(Q)} & \sin\mu^{(Q)} \sin\theta^{(Q)} \\ \sin\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} \sin\theta^{(Q)} & -\cos\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} \sin\theta^{(Q)} & \sin\mu^{(Q)} \cos\theta^{(Q)} \\ -\cos\lambda^{(Q)} \sin\theta^{(Q)} \sin\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} & \cos\theta^{(Q)} & \sin\theta^{(Q)} + \cos\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} \\ \cos\theta^{(Q)} & \sin\theta^{(Q)} \cos\lambda^{(Q)} \cos\mu^{(Q)} & \cos\theta^{(Q)} \\ \sin\lambda^{(Q)} \sin\mu^{(Q)} & -\cos\lambda^{(Q)} \sin\mu^{(Q)} & \cos\mu^{(Q)} \end{vmatrix}$$

где $\lambda^{(Q)}, \mu^{(Q)}, \theta^{(Q)}$ — углы Эйлера системы (a_1, a_2, a_3) относительно кристаллофизической системы подложки и слоев.

Поля смещений точек среды в ПАВ $U_i^{(Q)}$ и электрический потенциал ПАВ $\phi^{(Q)}$ в подложке и слоях $Q=S, 1, 2, \dots, N-1$, удовлетворяют граничным условиям на границе раздела слоев с номерами L и (L+1), т.е. при $a_3 = \sum_{i=L+1}^N H^{(i)}(T)$, вида

$$\begin{cases} C_{3ikl}^{(L)} U_{k,l}^{(L)} + E_{k3l}^{(L)} \phi_{,k}^{(L)} = C_{3ikl}^{(L+1)} U_{k,l}^{(L+1)} + E_{k3l}^{(L+1)} \phi_{,k}^{(L+1)}; & (13a) \\ U_i^{(L)} = U_i^{(L+1)}, \quad i=1,2,3 \\ E_{3kl}^{(L)} U_{k,l}^{(L)} - \varepsilon_{3k}^{(L)} \phi_{,k}^{(L)} = E_{3kl}^{(L+1)} U_{k,l}^{(L+1)} - \varepsilon_{3k}^{(L+1)} \phi_{,k}^{(L+1)}; & (13b) \\ \phi^{(L)} = \phi^{(L+1)}, \end{cases}$$

и условиям на границе $a_3=0$ слоя N с вакуумом вида

$$\begin{cases} C_{3ik}^{(N)} U_{k,l}^{(N)} + E_{k3l}^{(N)} \phi_{,k}^{(N)} = 0; \\ U_i^{(N)} = U_i^{(vac)}, \quad i=1,2,3 \end{cases} \quad (13B)$$

$$\begin{cases} E_{3kl}^{(N)} U_{k,l}^{(N)} - \mathcal{E}_{3k}^{(N)} \phi_{,k}^{(N)} = E_{3kl}^{(vac)} U_{k,l}^{(vac)} - \mathcal{E}_{3k}^{(vac)} \phi_{,k}^{(vac)}; \\ \phi^{(N)} = \phi^{(vac)}, \end{cases} \quad (13Г)$$

где эффективные константы вакуума, возникающие при использовании лагранжевых координат, даются выражениями

$$\begin{aligned} E_{ij}^{(vac)} &= -F_{ij}^{(vac)} E_l^{(N)}; \\ \mathcal{E}_{ij}^{(vac)} &= \varepsilon_0 \delta_{ij} + F_{ijkl}^{(vac)} U_{k,l}^{(N)}; \\ F_{ijkl}^{(vac)} &= \varepsilon_0 (\delta_{ij} \delta_{kl} - \delta_{il} \delta_{jk}), \end{aligned} \quad (14)$$

с диэлектрической проницаемостью вакуума ε_0 .

Однородная система (5) имеет нетривиальное решение, только если ее определитель $\det \Gamma^{(Q)}=0$. Этот детерминант представляет собой полином восьмой степени относительно переменной $(i\alpha)$ с вещественными коэффициентами. Восемь корней этого полинома для заданного пробного значения V $\alpha^{(n)}$, $n=1, \dots, 8$, либо вещественные, либо появляющиеся парами с одинаковыми мнимыми и противоположными действительными частями, определяют коэффициенты проникновения для каждого слоя и подложки. Для подложки необходимо выбрать корни, для которых $\text{Re } a > 0$, что соответствует затуханию ПАВ в глубину подложки. Если слоев N, всего получим $8N+4$ корня, первые четыре из которых будем относить к подложке, а остальные — к соответствующим слоям.

Для каждого n , $n=1, \dots, 8N+4$, находятся парциальные амплитуды $\beta_i^{(n)}$, $i=1, \dots, 4$.

Для выполнения граничных условий поля смещений точек среды и электрический потенциал ПАВ в подложке и слоях $(U_i^{(Q)}, \phi^{(Q)})$, $Q=S, 1, 2, \dots, N$, выбираются в виде линейной комбинации парциальных волн вида:

$$\begin{cases} U_i^{(S)} \\ \phi^{(S)} \end{cases} = \sum_{n=1}^4 C_n \begin{cases} \beta_i^{(n)} \\ \beta_4^{(n)} \end{cases} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} a_3) \exp(i\omega(t - \frac{a_1}{V})); \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_i^{(L)} \\ \phi^{(L)} \end{cases} = \sum_{n=8L-3}^{8L+4} C_n \begin{cases} \beta_i^{(n)} \\ \beta_4^{(n)} \end{cases} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} a_3) \exp(i\omega(t - \frac{a_1}{V})); \quad (15)$$

$L=1, 2, \dots, N$;

$$\begin{cases} U_i^{(vac)} \\ \phi^{(vac)} \end{cases} = \sum_{n=8N-3}^{8N+4} C_n \begin{cases} \beta_i^{(n)} \\ \beta_4^{(n)} \end{cases} \exp(\frac{\omega}{V} a_3) \exp(i\omega(t - \frac{a_1}{V})). \quad (16)$$

Подстановка этих соотношений в граничные условия приводит к системе алгебраических соотношений относительно множителей C_n :

$$\sum_{n=1}^{8N+4} B_{mn} C_n = 0. \quad (17)$$

Ненулевые элементы матрицы **B** задаются соотношениями:

$$1) \quad n=1, \dots, 4: \quad B_{mn} = T_{mn} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(S)}), \quad m=1, \dots, 4$$

$$B_{mn} = \beta_{m-4}^{(n)} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(S)}), \quad m=5, \dots, 8;$$

$$2) \quad n=8L-3, \dots, 8L+4, \quad L=1, \dots, N-1:$$

$$B_{8(L-1)+m,n} = -T_{mn} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(L-1)}),$$

$$B_{8L+m,n} = T_{mn} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(L)}), \quad m=1, \dots, 4$$

$$B_{8(L-1)+m,n} = -\beta_{m-4}^{(n)} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(L-1)}),$$

$$B_{8L+m,n} = \beta_{m-4}^{(n)} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(L)}), \quad m=5, \dots, 8;$$

$$3) \quad n=8N-3, \dots, 8N+4:$$

$$B_{8(N-1)+m,n} = -T_{mn} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(N-1)}),$$

$$B_{8N+m,n} = \{T_{mn} - (iE_{3k1}^{(vac)} - E_{3k3}^{(vac)})\beta_k^{(n)} +$$

$$(i\mathcal{E}_{31}^{(vac)} - \mathcal{E}_{33}^{(vac)})\beta_4^{(n)}\} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(N)}), \quad m=1, \dots, 4$$

$$B_{8(N-1)+m,n} = -\beta_{m-4}^{(n)} \exp(-\alpha^{(n)} \frac{\omega}{V} z^{(N-1)}), \quad m=5, \dots, 8.$$

Здесь $z^{(L)}$, $L=S, 1, \dots, N$ — координата поверхности раздела между слоями с номерами L и $L+1$,

$$\begin{aligned} T_{jn} &= \sum_{k=1,2,3} (iC_{3jk}^{(L)} + \alpha^{(n)} C_{3jk3}^{(L)}) \beta_k^{(n)} + \\ &+ (iE_{13j}^{(L)} + \alpha^{(n)} E_{33j}^{(L)}) \beta_4^{(n)}, \quad j=1, 2, 3; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} T_{4n} &= \sum_{k=1,2,3} (iE_{3ki}^{(L)} + \alpha^{(n)} E_{3k3}^{(L)}) \beta_k^{(n)} - \\ &- (i\mathcal{E}_{31}^{(L)} + \alpha^{(n)} \mathcal{E}_{33}^{(L)}) \beta_4^{(n)}. \end{aligned}$$

Условие совместности системы (17) $\det \mathbf{B}(V)=0$ определяет фазовую скорость ПАВ V_R как неявную функцию квазистатических градиентов смещений, электрического поля, температуры, толщин слоев, ориентации слоев и подложки, внутренних механических напряжений в слоях

$$V_R = V_R(\hat{U}_{k,l}^{(Q)}, \hat{E}_k^{(Q)}, T, \sigma_{ii}^{(Q)}, H^{(Q)}, \lambda^{(Q)}, \mu^{(Q)}, \theta^{(Q)}). \quad (19)$$

Используя это значение скорости ПАВ, можно из (17) определить значение множителей C_n , коэффициентов проникновения $a^{(n)}$ и парциальных амплитуд $\beta_i^{(n)}$, $i=1, \dots, 4$, $n=1, \dots, 8N+4$ и тем самым полностью определить акустическое и электрическое поле ПАВ.

В данной работе рассматривается композитный слой с углеродными нанотрубками цилиндрической формы. Диаметр нанотрубки составляет примерно 10 нм, а длина равна толщине композитного слоя.

Вектор, задающий оси нанотрубок в углах Эйлера, определяется как:

$$n_i = [\sin(\mu) \cdot \sin(\theta), -\sin(\mu) \cdot \cos(\theta), \cos(\mu)],$$

Объемная доля нанотрубок в слое задается величиной x . Плотность композитного материала рассчитывается по формуле:

$$\rho = \rho^{\text{графит}} \cdot (1-x) + \rho^{\text{трубка}} \cdot x,$$

где $\rho^{\text{графит}}$ и $\rho^{\text{трубка}}$ — плотности графита и нанотрубок, соответственно. Модули упругости композитного слоя определяются из выражения:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^{\text{графит}} \cdot (1-x) + C_{ijkl}^{\text{трубка}} \cdot x, \quad (24)$$

где $C_{ijkl}^{\text{графит}}$, $C_{ijkl}^{\text{трубка}}$ — тензоры модулей упругости графита и нанотрубок. $C_{ijkl}^{\text{трубка}}$ задаются формулой:

$$\begin{aligned} C_{ijkl}^{\text{трубка}} = & Z_1 \cdot \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + Z_2 \cdot (\delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk}) + \\ & + Z_3 \cdot (D_{ij} \cdot \delta_{kl} + D_{kl} \cdot \delta_{ij}) + \\ & + Z_4 \cdot (D_{ik} \cdot \delta_{jl} + D_{il} \cdot \delta_{jk} + \\ & + D_{jl} \cdot \delta_{ik} + D_{jk} \cdot \delta_{il}) + Z_5 \cdot N_{ijkl}, \end{aligned}$$

где p_{ij} — символ Кронекера, а D_{ij} , N_{ijkl} и Z_{1-5} определяются выражениями:

$$D_{ij} = \frac{(3n_i \cdot n_j - \delta_{ij})}{2},$$

$$\begin{aligned} N_{ijkl} = & \frac{1}{8}(35n_i n_j n_k n_l - 5(n_i n_j \delta_{lm} + n_i n_l \delta_{jm} + \\ & + n_i \cdot n_m \cdot \delta_{lj} + n_j n_i \delta_{lm} + n_j n_m \delta_{il} + n_l \cdot n_m \cdot \delta_{ij}) + \\ & + \delta_{ij} \cdot \delta_{lm} + \delta_{il} \cdot \delta_{jm} + \delta_{im} \cdot \delta_{jl}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = & (si4 + 2 \cdot si22)/3, \quad Z_2 = (si4 - si22)/3, \\ Z_3 = & (sd4 + 2 \cdot sd22)/6, \quad Z_4 = (sd4 - sd22)/6, \\ Z_5 = & 8 \cdot (C_{11} + C_{33} - 2 \cdot C_{13} - C_{44})/35, \\ si4 = & (8 \cdot C_{11} + 3 \cdot C_{33} + 4 \cdot C_{13} + 2 \cdot C_{44})/15, \\ si22 = & (-C_{11} + 3 \cdot C_{12} + 4 \cdot C_{13} - C_{44})/6, \\ sd4 = & 2 \cdot (-8 \cdot C_{11} + 6 \cdot C_{33} + 2 \cdot C_{13} + C_{44})/21, \\ sd22 = & (2 \cdot C_{11} - 6 \cdot C_{12} + 4 \cdot C_{13} - C_{44})/3, \end{aligned}$$

где C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44} — компоненты тензора модулей упругости нанотрубок.

Из-за незначительного влияния тензора диэлектрической проницаемости на скорость ПАВ, его значение принимается равным тензору диэлектрической проницаемости графита.

Результаты расчетов представлены на рис.2-4. Установлено, что зависимость фазовой скорости ПАВ от толщины углеродного слоя носит нелинейный характер. В направлениях ($\lambda=90^\circ$, $\mu=90^\circ$, $\theta=90^\circ$) на X срезе, ($\lambda=0$, $\mu=90^\circ$, $\theta=90^\circ$) на Y срезе и ($\lambda=0$, $\mu=0$, $\theta=30+60 \cdot n$, где $n=0,1,2$) на Z срезе наблюдается резкое уменьшение скорости ПАВ при увеличении толщины углеродного слоя, что приводит к изменению максимумов на минимумы. Это позволяет предположить высокую чувствительность данно-

го направления к внешним воздействиям и потенциальную возможность разработки сенсора, основанного на этом эффекте. Введение нанотрубок в материал слоя позволяет осуществлять управление характеристиками распространения ПАВ в широком диапазоне. При $\theta=0$ наблюдается линейная зависимость скорости ПАВ от концентрации нанотрубок в слое. С увеличением θ ($0 < \mu < 90^\circ$) зависимость приобретает существенную нелинейность, что обуславливает высокую чувствительность исследуемой структуры.

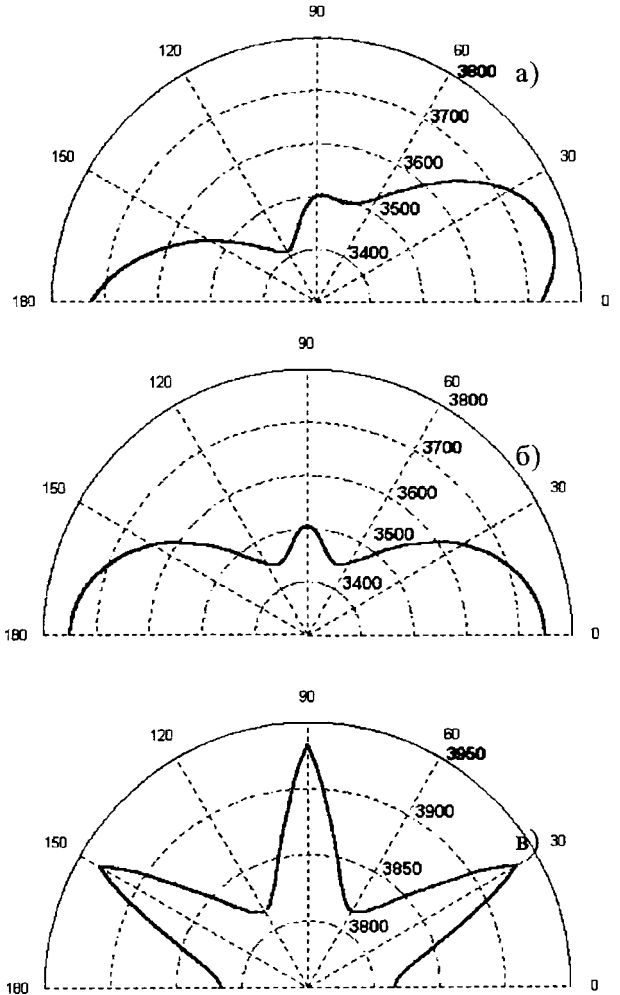
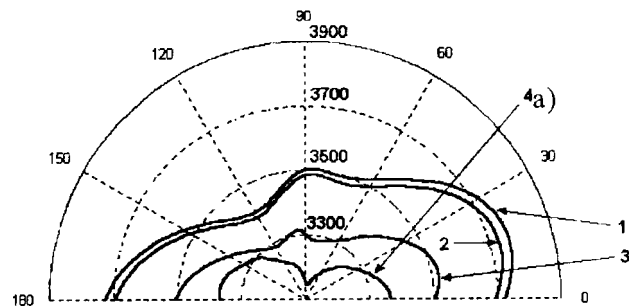
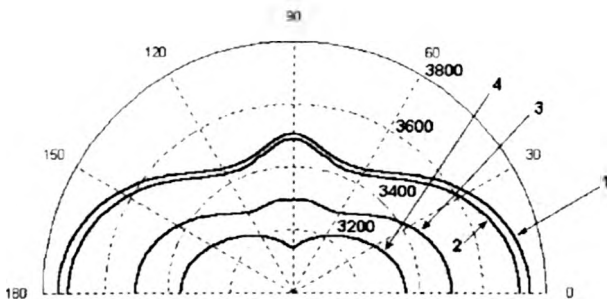


Рис.2. Зависимости скорости ПАВ от направления для LiNbO_3 : а) X срез; б) Y срез; в) — Z срез.



б)



в)

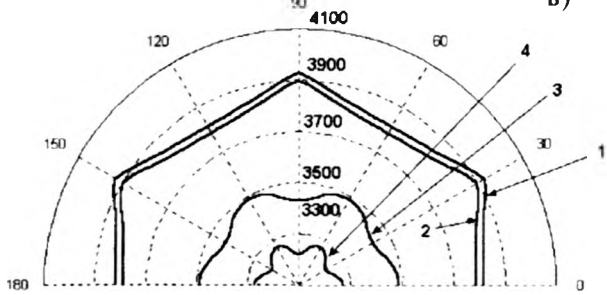
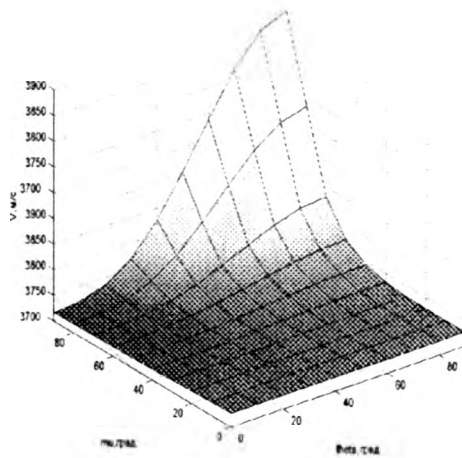
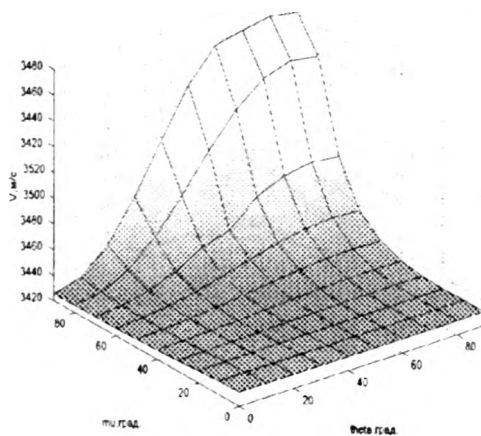


Рис. 3 — Зависимости скорости ПАВ в структуре $\text{LiNbO}_3/\text{углерод}$ от толщины слоя кН на основных срезах: а) — X срез; б) — Y срез; в) — Z срез (кривая 1 — $kH=0$; кривая 2 — $kH=0.1$; кривая 3 — $kH=0.85$; кривая 4 — $kH=1$).

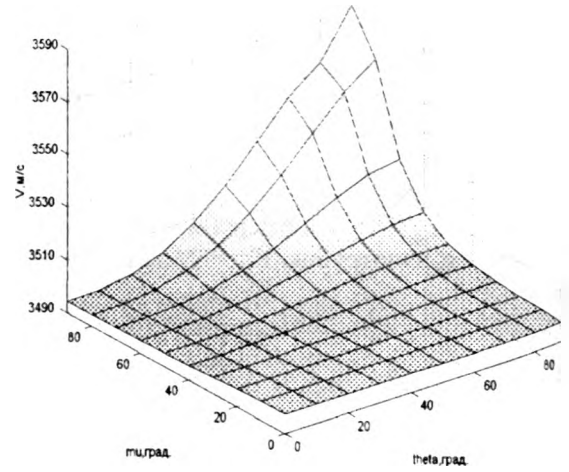
а



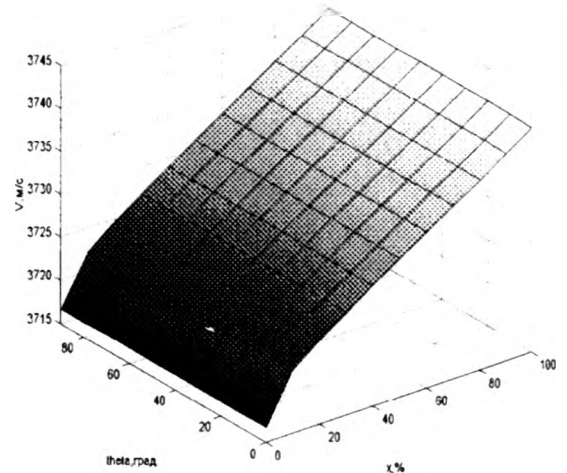
б



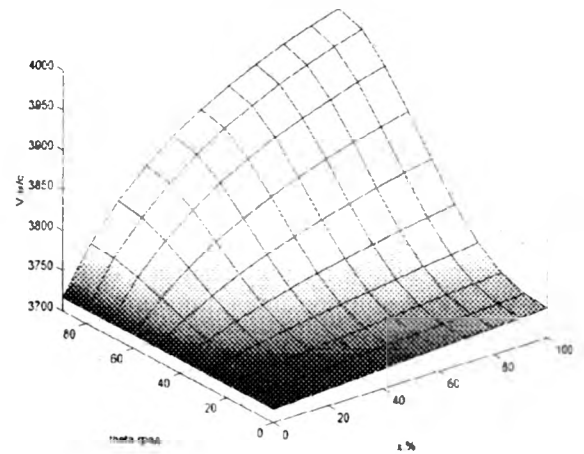
в



г



д



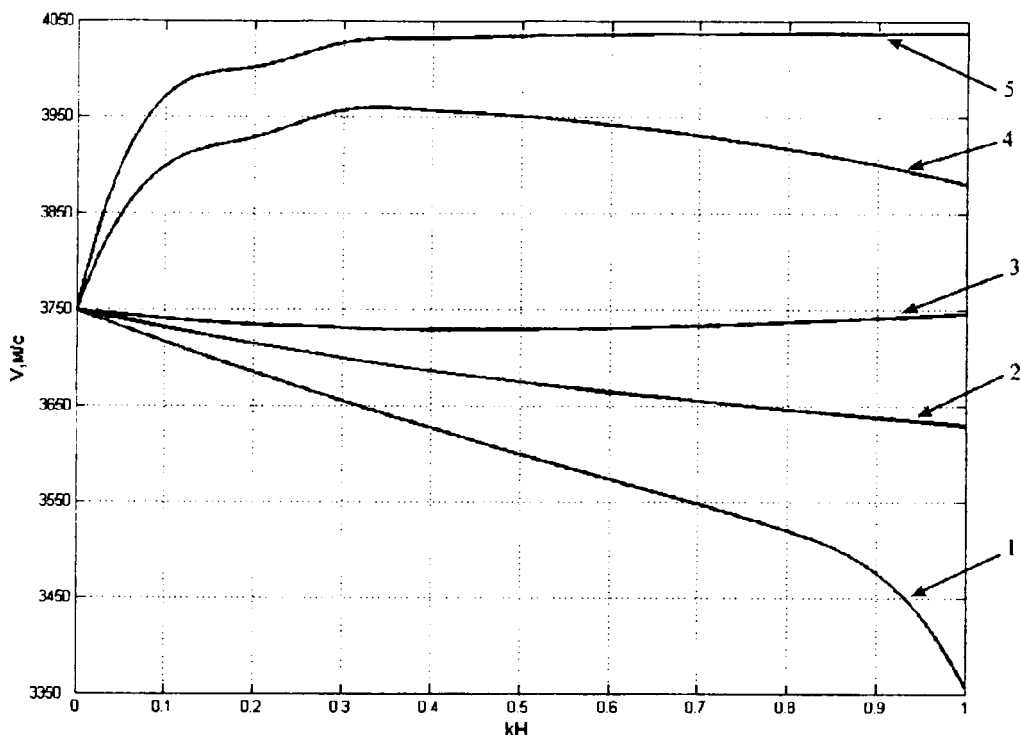


Рис.4 — Зависимости скорости ПАВ в структуре $\text{LiNbO}_3/\text{углерод}$ от толщины слоя, концентрации и ориентации нанотрубок: б), в) — зависимости скорости ПАВ от ориентации нанотрубок для направлений $\theta=0$, $\theta=67^\circ$ и $\theta=90^\circ$ на Y срезе, соответственно, ($kH=0.1$, $x=0.5$); г), д) — зависимости скорости ПАВ от ориентации и концентрации нанотрубок для $m=0$ и 90° , соответственно, ($kH=0.1$); е) — зависимости скорости ПАВ от толщины слоя kH на Y, X срезе (кривая 1 — $x=0$; кривая 2 — $x=0.5$, $\mu=0$, $\theta=0$; кривая 3 — $x=1$, $\mu=0$, $\theta=0$; кривая 4 — $x=0.5$, $\mu=90^\circ$, $\theta=90^\circ$; кривая 5 — $x=1$, $\mu=90^\circ$, $\theta=90^\circ$).

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.