



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ФЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҮЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ



СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
Еуразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева

**Студенттер мен жас ғалымдардың  
«ФЫЛЫМ ЖӘНЕ БІЛІМ - 2014» атты  
IX халықаралық ғылыми конференциясы**

**IX Международная научная конференция  
студентов и молодых ученых  
«НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ - 2014»**

**The IX International Scientific Conference for  
students and young scholars  
«SCIENCE AND EDUCATION-2014»**

2014 жыл 11 сәуір  
11 апреля 2014 года  
April 11, 2014



**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ**  
**Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҮЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ**

**Студенттер мен жас ғалымдардың  
«Ғылым және білім - 2014»  
атты IX Халықаралық ғылыми конференциясының  
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
IX Международной научной конференции  
студентов и молодых ученых  
«Наука и образование - 2014»**

**PROCEEDINGS  
of the IX International Scientific Conference  
for students and young scholars  
«Science and education - 2014»**

**2014 жыл 11 сәуір**

**Астана**

**УДК 001(063)**

**ББК 72**

**F 96**

**F 96**

«Ғылым және білім – 2014» атты студенттер мен жас ғалымдардың IX Халықаралық ғылыми конференциясы = IX Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование - 2014» = The IX International Scientific Conference for students and young scholars «Science and education - 2014». – Астана: <http://www.enu.kz/ru/nauka/nauka-i-obrazovanie/>, 2014. – 5831 стр. (қазақша, орысша, ағылшынша).

ISBN 978-9965-31-610-4

Жинаққа студенттердің, магистранттардың, докторанттардың және жас ғалымдардың жаратылыстану-техникалық және гуманитарлық ғылымдардың өзекті мәселелері бойынша баяндамалары енгізілген.

The proceedings are the papers of students, undergraduates, doctoral students and young researchers on topical issues of natural and technical sciences and humanities.

В сборник вошли доклады студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых по актуальным вопросам естественно-технических и гуманитарных наук.

**УДК 001(063)**

**ББК 72**

ISBN 978-9965-31-610-4

©Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 2014

**УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН ГУЛЯЕВА-БЛЮСТЕЙНА В РОМБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ КЛАССА 222**

Сагатов Нурсултан, Сисенова Гульзайнаб, Байгазиев Арман  
[zaika\\_sakon@mail.ru](mailto:zaika_sakon@mail.ru)

Студенты физико-технического факультета

ЕНУ им. Л. Гумилева, Астана, Казахстан

Научные руководители - С.К. Тлеуkenов, И.Б.Проценко

Рассматривается волна Гуляева–Блюстейна (Г-Б), один из видов поверхностных акустических волн (ПАВ) проявляющиеся в пьезоэлектрических кристаллах который был открыт в 1968 г. в СССР Гуляевым Ю.В. и независимо в США Блюстейном. Они существуют в пьезоэлектрических кристаллах вблизи свободной границы, частицы среды испытывают чисто поперечные колебания в направлении, параллельном свободной поверхности (Рис.1). Высокая эффективность возбуждения ПАВ Г-Б обусловили их широкое применение в электронике и активно исследуется аналитическими и численными методами[1-4].

В данной работе показана применимость и эффективность метода матрицанта разработанный для исследования распространения волн в анизотропных пьезоупругих средах[5, 6].

В данной работе связанные упругие и электромагнитные процессы в пьезоэлектрическом кристалле рассматриваются на основе совместной системы уравнений движения упругой среды и уравнениями Максвелла в отсутствие токов и свободных зарядов в среде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\ rot \bar{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{B}}}{\partial t} \\ rot \bar{\mathbf{H}} = \frac{\partial \bar{\mathbf{D}}}{\partial t} \end{cases} \quad (1) \quad \begin{cases} \sigma_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = \epsilon_{ij} E_j + e_{ikl} S_{kl} \end{cases} \quad (2)$$

здесь  $S_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right)$  тензор малых деформаций,  $D_i$  – компоненты вектора

электрического смещения,  $\epsilon_{ij}, \mu_{ij}$  – компоненты тензора диэлектрической и магнитной проницаемости анизотропной среды которые содержат  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  для вакуума,  $c_{ijkl}$  – упругие,  $e_{kij}$  – пьезоэлектрические параметры среды,  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора механических напряжений.

Связь вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  с напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$  и вектора электрического смещения  $\mathbf{D}$  с напряженностью электрического поля  $\mathbf{E}$  представляется в форме:

$$B_i = \mu_{ij} H_j; D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad (3)$$

Рассматривается анизотропное пьезоэлектрическое полупространство ромбической симметрии класса 222 с направлением распространения ПАВ Г-Б вдоль оси Y, со срезом перпендикулярно оси X (рис.1).

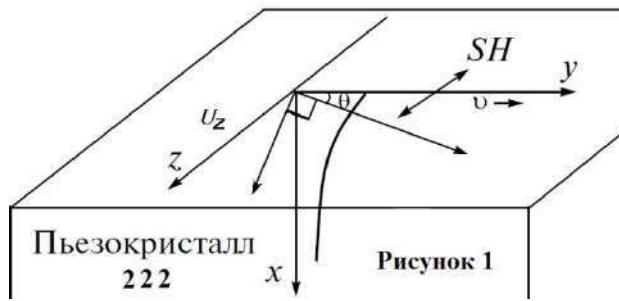


Рисунок 1. Обозначение координатных осей

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка описывающая связанные упругую поперечно-сдвиговую (SH) и электромагнитной волны на основе представления решений(1-3)в виде:

$$f(x,y,z,t) = f(x)\exp(i\omega t - imy) \quad (4)$$

в данном случае принимает вид:

$$\frac{d\vec{\mathbf{W}}}{dx} = \mathbf{B}\vec{\mathbf{W}} \quad (5)$$

относительно вектора-столбца:

$$\vec{\mathbf{W}} = (u_z, T_{xz}, E_y, H_z)^t \exp(i\omega t - imy) \quad (6)$$

здесь  $m$ -компоненты волнового вектора вдоль оси  $Y$ . Далее общий множитель  $\exp(i\omega t - imy)$  опущен.

Матрица коэффициентов  $\mathbf{B}$ , для связанных упругой SH и электромагнитной волн, в уравнении (5) имеет вид:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{c_{44}} & \frac{\epsilon_{14}}{c_{44}} & 0 \\ -\rho\omega^2 + m^2 \left(c_{55} + \frac{\epsilon_{15}^2}{\epsilon_{22}}\right) & 0 & 0 & -\frac{im^2\epsilon_{25}}{\omega\epsilon_{22}} \\ \frac{m^2\epsilon_{25}}{\epsilon_{22}} & 0 & 0 & -i\omega \left(\frac{m^2}{\omega^2\epsilon_{22}} - \mu_{33}\right) \\ 0 & \frac{i\omega\epsilon_{14}}{c_{44}} & i\omega \left(\epsilon_{11} + \frac{\epsilon_{14}^2}{c_{44}}\right) & 0 \end{pmatrix} \vec{\mathbf{W}} = (u_z, T_{xz}, E_y, H_z)^t \quad (7)$$

Условия существования ПАВ Г-Б аналитическом виде выражаются системой уравнений в которую входят смещение и напряжение упругой поперечной (SH) волны и электромагнитного поля при  $x=0$  на основе матрицы (7).

Для системы ОДУ (5) получена нормированная матрица фундаментальных решений – матрицант в аналитическом виде [7, 8]:

$$\mathbf{T}_0 = \frac{\mathbf{B}^2 + k_2^2 \mathbf{I}}{k_2^2 - k_1^2} \cos k_1 x - \frac{\mathbf{B}^2 + k_1^2 \mathbf{I}}{k_2^2 - k_1^2} \cos k_2 x - \frac{k_1^2 \mathbf{B} + k_1^2 k_2^2 \mathbf{B}^{-1}}{k_2^2 - k_1^2} \frac{\sin k_1 x}{k_1} + \frac{k_2^2 \mathbf{B} + k_1^2 k_2^2 \mathbf{B}^{-1}}{k_2^2 - k_1^2} \frac{\sin k_2 x}{k_2} \quad (8)$$

Здесь  $\mathbf{I}$  –единичная матрица,  $k_i$ - компоненты волновых векторов упругой SH и электромагнитной волны вдоль оси  $X$ .

На основе (8) определяется матрица  $\mathbf{R}$  для границы полупространств [5- 7]:

$$\mathbf{T}_0^\pm = \frac{1}{2} \mathbf{I} \mp \mathbf{R}; \quad \mathbf{R} = \frac{\mathbf{B} - k_1 k_2 \mathbf{B}^{-1}}{2i(k_1 + k_2)} \quad (9)$$

Условия существования волн Г-Б следует из соотношений для металлизированной поверхности:

$$\mathbf{R} \mathbf{W}(0) = 0, \quad \mathbf{W}(0) = (u_z, 0, 0, H_z)^t \quad (10)$$

и для свободной поверхности на границе полупространство-вакуум:

$$(\mathbf{R}_0 + \mathbf{R})\mathbf{W}(0) = 0, \quad \mathbf{W}(0) = (u_z, 0, E_y, H_z)^t \quad (11)$$

где  $\mathbf{R}_0$  . матрица для границы вакуума.

Значения скорости распространения и показателя спадания волн Г-Б в ромбических кристаллах класса  $mm2$  для свободной и металлизированной поверхности получены из условия существования волн Г-Б (10-11) на основе (9).

Показатель спадания для свободной поверхности получена в виде:

$$\beta_f = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4K_{14}^2}{\varepsilon_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_0} (1 + K_{25}^2) \right)^2} \frac{c_{44}}{c_{55}} \left( \frac{\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}}{\varepsilon_0} - c_{55} \sqrt{\frac{\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}}{c_{44}c_{55}}} \right)} \right] \quad (12)$$

Здесь коэффициенты электромеханической связи имеют вид:  $K_{14}^2 = \frac{e_{14}^2}{\varepsilon_{11}c_{44}}$ ;  $K_{25}^2 = \frac{e_{25}^2}{\varepsilon_{22}c_{55}}$ ;

Значение скорости волны Г-Б для свободной (неметаллизированной поверхности) следуют из (12):

$$v_f = v_t \sqrt{1 - \beta_f^2} \quad (13)$$

здесь  $v_t = \sqrt{c_{44}/\rho}$  скорость SH волны.

Для йодноватой кислоты (см. Акустические кристаллы [8], стр. 361–365) ромбической симметрии класса 222 параметры среды имеют значения:

$$C_{44} = 18.35 * 10^9; C_{55} = 11.6 * 10^9; \varepsilon_1 = 7.5\varepsilon_0; \varepsilon_2 = 12.4\varepsilon_0; \varepsilon_3 = 8.1\varepsilon_0; \rho = 4629; e_{14} = 0.293; e_{36} = 0.312; e_{25} = 0.244;$$

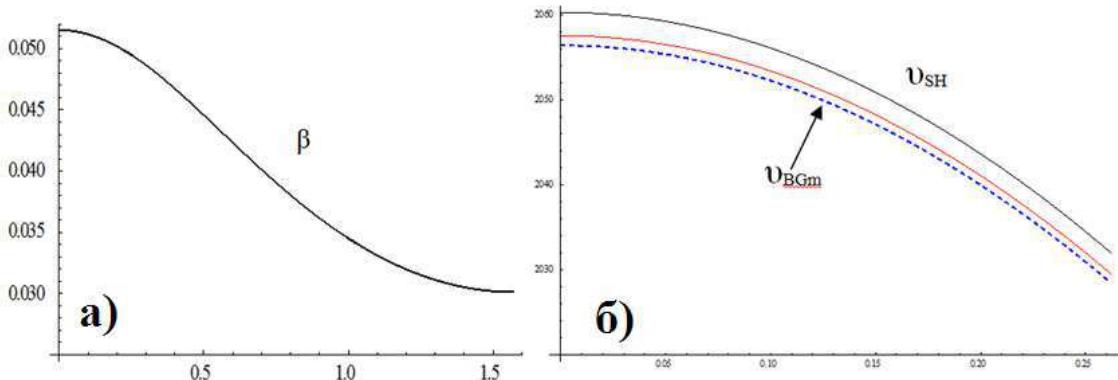


Рисунок 2. Характеристики волн Г-Б для йодноватой кислоты: а) изменение показателя спадания при изменении угла среза  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ; б) сравнительные значения скорости SH волны и волны Г-Б ( $0^\circ < \theta < 20^\circ$ )

Для сегнетовой соли (Rochellesalt [9] стр. 369–381) ромбической симметрии класса 222 параметры среды имеют значения:  $C_{44} = 11.9 * 10^9; C_{55} = 3.05 * 10^9; \varepsilon_1 = 115\varepsilon_0; \varepsilon_2 = 8.4\varepsilon_0; \varepsilon_3 = 9.4\varepsilon_0; \rho = 1767; e_{14} = 4; e_{36} = 0.115; e_{25} = 0.154$ ;

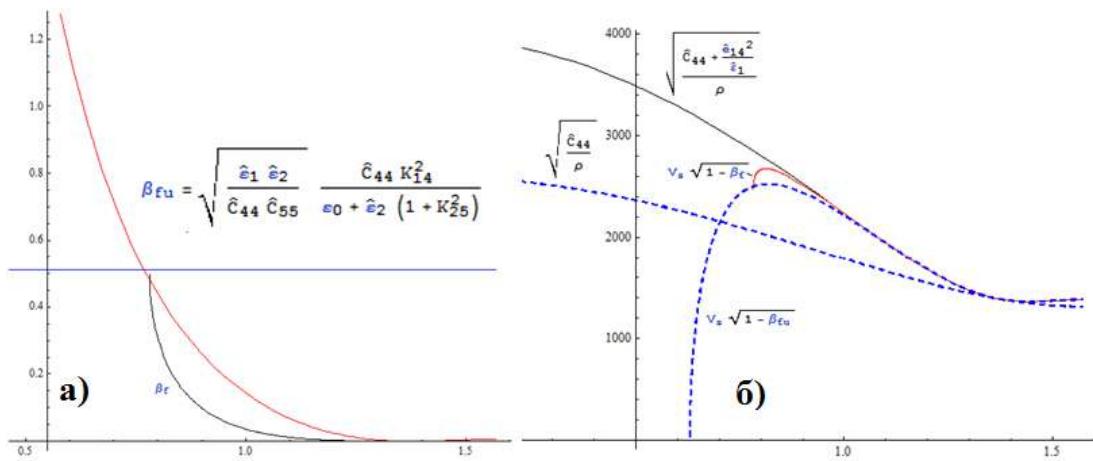


Рисунок 3. Характеристики волн Г-Б для селенитовой соли: а) изменение показателя спадания при изменении угла среза  $30^\circ < \theta < 90^\circ$ ; б) сравнительные значения скорости волны Г-Б и SH волны (сплошная-с учетом пьезоэфекта, пунктирная- без учета пьезоэфекта), ( $30^\circ < \theta < 90^\circ$ ).

Методом матрицанта определены условия существования и получены аналитические значения и построены графики показателя спадания искорости поверхностных акустических волн Гуляева–Блюстейна в средах ромбической симметрии класса 222 при повороте среза вокруг оси Z. Для примера рассчитаны характеристики волн Гуляева–Блюстейна для селенитовой соли и йодноватой кислоты. Этот метод получения характеристик волн Г-Б отличается от ранее используемых методов общностью и обозримостью.

Выражаем благодарность научным руководителям: д.ф.-м.н., проф. С.К. Тлеуkenову и начальнику отдела связи, навигации и береговых радиолокационных станций АО «Национальная компания «Актауский международный морской торговый порт» И.Б. Проценко.

#### Список использованных источников

- Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С. Акустоэлектроника: история, современное состояние и новые идеи для новой эры // Акуст. журн. 2005. том 51. № 1. С.101–110
- Bright V.M., Hunt W.D. Bleustein-Gulyaev waves in gallium arsenide and other piezoelectric cubic crystals // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. P. 1556–1564
- Collet B., Destrade M. Explicit secular equations for piezoacoustic surface waves: shear-horizontal modes // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 116. P. 3432–3442
- Mozhaev V.G., Weihnacht M. Sectors of nonexistence of surface acoustic waves in potassium niobate // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. 2002. V. 1. P. 391–395
- Тлеуkenов С.К. Метод матрицанта: распространение волн в анизотропных средах // Lambert academic publishing, 2014. 148 с.
- Тлеуkenов С.К. Волновые процессы и метод матрицанта // журн. Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, 2011. № 4(83). С. 68–74
- Tleukonov S.K., Zhakiyev N.K., Yeltinova L.A. An analytical solution of the reflection and refraction problems for coupled waves in elastic and piezoelectric media // IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symp. Proc. 2013. P.1025–1028
- Акустические кристаллы. Справочник. / Под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982. 682 с.
- Auld B.A. Acoustic Fields and Waves in Solids I, Krieger Publishing Company.- Mala-bar, Florida. -1990. -431 P.