

<i>Терещенко А.М., Ревякин А.М.</i> Моделирование потоков движения воздуха в чистых помещениях	111
<i>Тимошенко В.П., Хлыбов А.И., Родионов Д.В., Котляров Е.Ю., Ефимов А.Г.</i> Исследование устройства управления для СВЧ ППМ X-диапазона	117
<i>Калугин В.В., Евстафьев С.С., Тюрин Ф.О., Тошов П.Н.</i> Конструкторские и технологические аспекты создания преобразователя угла наклона	133
<i>Дробинский А.В., Уразалимова Д.С., Оразова Г.О.</i> Технологии беспроводной передачи энергии	138
<i>Черкасов А.М.</i> Внедрение сервиса Notion в проектную среду по Scrum-технологии	143
<i>Щавлев М.Э., Брусникин Г.Н.</i> Разработка информационной системы для производства шкафов релейной защиты и автоматики на базе E3.Series	148
<i>Юдичев Н.С.</i> Проектирование и разработка системы для оценки проектов предприятия	154

О поверхностных волнах в пьезомагнитных средах

С.К. Тлеукинов, д.ф.-м.н., профессор кафедры технической физики ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан,

Т.С. Досанов, к.ф.-м.н., ассоциированный профессор кафедры физики и приборостроения ПГУ имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан,

Н.А. Испулов, к.ф.-м.н., профессор кафедры физики и приборостроения ПГУ имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан,

А.Д. Гутенко, старший преподаватель кафедры физики и приборостроения ПГУ имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан,

К.Р. Досумбеков, старший преподаватель кафедры физики и приборостроения ПГУ имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан,

Email: matricant@inbox.ru, dosto81@mail.ru, nurlybek_79@mail.ru, a_gutenko@mail.ru, kairat_83@inbox.ru

On surface waves in piezomagnetic medium

S. Tleukenov, Dr.Sc.Phys.-Math., professor of the department of Technical Physics of the L.N.Gumilyov ENU, Nur-Sultan, Kazakhstan,

T. Dossanov, Ph.D. Phys.-Math., associate professor of the department of Physics and Instrumentation of the PSU named after S.Toraigyrov, Pavlodar, Kazakhstan,

N. Ispulov, Ph.D. Phys.-Math., Professor of the department of Physics and Instrumentation of the PSU named after S.Toraigyrov, Pavlodar, Kazakhstan,

A. Gutenko, senior lecturer at the department of Physics and Instrumentation of the PSU named after S.Toraigyrov, Pavlodar, Kazakhstan,

K. Dossumbekov, senior lecturer at the department of Physics and Instrumentation of the PSU named after S.Toraigyrov, Pavlodar, Kazakhstan

Аннотация

Методом матрицанта получено условие существования поверхностных волн в пьезомагнитной среде гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$. в случае, когда связаны два типа волн: упругая волна у-поляризации и электромагнитная ТЕ волна. Получено уравнение для волнового вектора этих поверхностных волн.

Abstract

The condition of the existence of surface waves in a piezomagnetic medium with hexagonal symmetry of classes $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$ is obtained by the matriciant method. in the case when two types of waves are connected: an elastic wave of y -polarization and an electromagnetic TE wave. The equation for the wave vector of these surface waves is obtained.

Ключевые слова: поверхностные волны, волны Гуляева-Блостейна, пьезомагнитная, метод матрицанта.

Keywords: surface waves, Gulyaev-Blustein waves, piezo-magnetic, matriciant method.

Поверхностные волны используются в различных областях науки и техники: в неразрушающем контроле при исследовании поверхности изделия, радиоэлектронике и управляющих системах для возбуждения и приема акустических волн, в датчиках на поверхностных акустических волнах и т.д.

Волны Гуляева-Блостейна, один из видов поверхностных акустических волн, были открыты в 1968 г. в СССР Гуляевым Ю.В. и независимо в США Блостейном. Волны Гуляева-Блостейна чисто сдвиговые поверхностные волны и могут распространяться в определенных направлениях поверхности пьезоэлектрического кристалла. Они имеют два характерных признака. Во-первых, они существуют лишь в пьезоэлектрических кристаллах вблизи свободной границы и, во-вторых, частицы среды испытывают чисто поперечные колебания в направлении, параллельном поверхности [1, 2].

В данной работе, впервые, на основе аналитического метода матрицанта [3 - 6], будет получено условие существования аналогичных волн в пьезомагнитной среде гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$.

Для анализа связанных упругих и электромагнитных процессов в пьезомагнитном кристалле запишем уравнения движения упругой среды и уравнения Максвелла в отсутствие свободных зарядов:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжения; ρ - плотность среды; $u(\vec{r})$ - вектор смещения бесконечно малого объема, находящегося в точке \vec{r} ; \vec{B} и \vec{H} - индукция и напряженность магнитного поля; \vec{E} и \vec{D} - напряженность и индукция электрического поля.

Обобщенный закон Гука, материальные уравнения пьезомагнитных сред и линейная часть тензора деформации, как известно, имеют вид:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - Q_{ijk} H_k, \quad B_i = \mu_0 \mu_{ij} H_j + Q_{ijk} \varepsilon_{jk} \quad (2)$$

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_j, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

где c_{ijkl} - компоненты тензора упругости; ε_{ij} - компоненты тензора деформации; Q_{ijk} - компоненты тензора пьезомагнитных модулей; μ_{ij} и ε_{ij} - тензоры магнитной и диэлектрической проницаемости; μ_0 и ε_0 - магнитная и диэлектрическая постоянные.

Для анализа системы уравнений (1) - (3) используется метод разделения переменных и представления решения в виде:

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

где ω - циклическая частота волн, предполагается, что частота упругих волн равна частоте электромагнитных волн; k_y и k_z - компоненты волнового вектора.

Для пьезомагнитной среды гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$ (декартова система координат совмещена с соответствующей кристаллографической системой координат) независимые модули упругости [4, с. 59], матрица пьезомагнитных модулей [4, с. 289], тензоры магнитной и диэлектрической проницаемости имеют вид [4, с. 339]:

Используя представление (4), при $k_y = 0$, из (1) - (3) для пьезомагнитной среды гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$ получим:

$$\frac{d\vec{w}}{dx} = \hat{B}\vec{w} \quad (5)$$

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & 0 & b_{14} \\ b_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i\omega b_{14} & 0 & b_{34} \\ 0 & 0 & b_{43} & 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} u_y \\ \sigma_{xy} \\ H_z \\ E_y \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{где } b_{12} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{11}}{4 \cdot Q_{22}^2 + c_{66} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{11}}, \quad b_{14} = \frac{2 \cdot k_z \cdot Q_{22}}{\omega \cdot (4 \cdot Q_{22}^2 + c_{66} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{11})},$$

$$b_{21} = -\rho \cdot \omega^2 + c_{44} \cdot k_z^2, \quad b_{34} = i\omega \left(\varepsilon_0 \varepsilon_{11} - \frac{c_{66} \cdot k_z^2}{\omega^2 \cdot (4 \cdot Q_{22}^2 + c_{66} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{11})} \right),$$

$$b_{43} = -i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_{33}.$$

$$\text{Здесь обозначили } c_{66} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2}.$$

То есть при распространении волн вдоль плоскости xOz электромагнитная ТЕ-волна связана с поперечной упругой волной у-поляризации.

Из метода матрицанта следует, что в случае взаимодействия только двух типов волн, распространяющихся в однородной среде, вектор \vec{w} записывается в виде:

$$\vec{w} = \hat{T}_{\text{одн}}^{\pm} \cdot \vec{w}_0 \cdot e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (7)$$

где \vec{w}_0 - некоторый постоянный вектор, определяющий амплитуды волн.

$$\hat{T}_{\text{одн}}^{\pm} = \frac{1}{2(k_x^2 - \kappa_x^2)} (\hat{\Phi}^{\pm} \cdot e^{\mp i k_x x} - \hat{\Psi}^{\pm} \cdot e^{\mp i \kappa_x x}) \quad (8)$$

$\hat{T}_{\text{одн}}^{\pm}$ - матрицант «усредненных» (однородных) сред [3].

$$\hat{\Phi}^{\pm} = (\hat{B}^2 + \kappa_x^2 \hat{E}) \pm \frac{i}{k_x} (\hat{B}^3 + \kappa_x^2 \hat{B}), \quad (9)$$

$$\hat{\Psi}^{\pm} = (\hat{B}^2 + k_x^2 \hat{E}) \pm \frac{i}{\kappa_x} (\hat{B}^3 + k_x^2 \hat{B}) \quad (10)$$

$$\left. \begin{matrix} k_x^2 \\ \kappa_x^2 \end{matrix} \right\} = \frac{2(1 - p_{1,2})}{h^2} \quad (11)$$

p_1 и p_2 - корни характеристического уравнения $\det(\hat{P} - \lambda \cdot \hat{E}) = 0$, \hat{E} - единичная матрица.

$$\hat{P} = \hat{E} + \frac{\hat{B}^2 h^2}{2} \quad (12)$$

Знаки « \pm » - относятся к волнам, распространяющимся вдоль положительного и отрицательного направлений оси Ox соответственно.

Для матрицы коэффициентов (6) из (11) и (12) получим:

$$\left. \begin{matrix} k_x^2 \\ \kappa_x^2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \cdot (-b_{12}b_{21} - b_{34}b_{43} \pm \sqrt{(b_{12}b_{21} - b_{34}b_{43})^2 - 4 \cdot i \cdot \omega \cdot b_{21} \cdot b_{43} \cdot b_{14}^2}) \quad (13)$$

Пусть плоскость границы есть плоскость yz (рис.1). Представим себе поверхность пьезомагнитной среды, покрытой тонким слоем идеально проводящей среды («свободная металлизированная поверхность»). Тогда на границе $x=0$, пренебрегая изменением упругих свойств системы, можно задать следующие граничные условия:

$$\sigma_{xy}|_{x=0} = 0 \text{ и } E_y|_{x=0} = 0 \quad (14)$$

Граничные условия (14) приводят к условиям существования поперечных поверхностных волн для пьезомагнитной среды (аналог волн Гуляева-Блюстейна).



Рисунок 1. Кристаллографическая система координат пьезомагнитной среды гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$ совмещена с декартовой системой координат

Матричное выражение (7) позволяет получить аналитическое решение задачи о поперечных поверхностных волнах в пьезомагнитной среде, при взаимодействии двух типов волн.

Беря только затухающие по глубине волны, т.е. проводя подстановки $k_x \rightarrow -i \cdot \kappa_x$ и $\kappa_x \rightarrow -i \cdot k_x$, из (13) получим:

$$\left. \begin{matrix} k_x^2 \\ \kappa_x^2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} (b_{12}b_{21} + b_{34}b_{43} \mp \sqrt{(b_{12}b_{21} - b_{34}b_{43})^2 - 4 \cdot i \cdot \omega \cdot b_{21} \cdot b_{43} \cdot b_{14}^2}) \quad (15)$$

Тогда при $x=0$ из выражения (7), имеем:

$$\vec{w}|_{x=0} = \hat{T}_{\text{одн}}^+|_{x=0} \cdot \vec{w}_0 \cdot e^{i(\omega t - k_x z)} \quad (16)$$

где

$$\hat{T}_{\text{одн}}^+|_{x=0} = \frac{1}{2} \cdot \left(\hat{E} - \frac{\hat{B} \cdot (k_x^2 + k_x \cdot \kappa_x + \kappa_x^2) - \hat{B}^3}{k_x \cdot \kappa_x \cdot (k_x + \kappa_x)} \right) \quad (17)$$

Вектор \vec{w}_0 имеет вид:

$$\vec{w}_0 = (u_0, 0, H_0, 0)^t \quad (18)$$

Индекс « t » означает операцию транспонирования. u_0 и H_0 постоянные определяющие амплитуды волн.

Используя граничные условия (14) из (16) - (18) получим условия существования поперечных поверхностных волн:

$$(b_{12} \cdot b_{21} - b_{34} \cdot b_{43})^2 - 4 \cdot i \cdot \omega \cdot b_{21} \cdot b_{43} \cdot b_{14}^2 = 0 \quad (19)$$

Условие существования поперечных поверхностных волн в пьезомагнитных средах гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$ (19), в случае, когда связаны два типа волн: упругая волна u -поляризации и электромагнитная ТЕ-волна.

Решая совместно (15) и (19) получим биквадратное уравнение относительно k_z :

$$a \cdot k_z^4 + b \cdot k_z^2 + c = 0 \quad (25)$$

где $a = \mu_0 \cdot (c_{44} \cdot \mu_{11} - c_{66} \cdot \mu_{33})^2 - 16 \cdot c_{44} \cdot \mu_{33} \cdot Q_{22}^2$

$$b = 2 \cdot \omega^2 \cdot \mu_0 \cdot (c_{44} \cdot \mu_{11} - c_{66} \cdot \mu_{33}) \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{11} \cdot \mu_{33} \cdot [4 \cdot Q_{22}^2 + c_{66} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{11}] - \rho \cdot \mu_{11}) + 16 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \mu_{33} \cdot Q_{22}^2$$

$$c = \omega^4 \cdot \mu_0 \cdot (\rho \cdot \mu_{11} - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{11} \cdot \mu_{33} \cdot [4 \cdot Q_{22}^2 + c_{66} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{11}])^2$$

Таким образом, в данной работе методом матрицанта исследован вопрос существования поверхностных волн в пьезомагнитных средах гексагональной симметрии классов $6'22'$, $6'mm'$, $6'm'2$, в случае, когда связаны два типа волн: упругая волна у-поляризации и электромагнитная TE волна. Получено уравнение (25) для волнового вектора этих поверхностных волн.

Используемые источники

1. *Bleustein J.L.* A new surface wave in piezoelectric materials // *Appl. Phys. Lett.* - 1968. - Vol. 13. - P. 412 - 413.
2. *Gulyaev Y.V.* Electroacoustic surface waves in solids // *Sov. Phys. JETP Lett.* - 1969. - Vol. 9. - P. 63 - 65.
3. *Тлеуенов С.К.* Метод матрицанта. - Павлодар: НИЦ ПГУ им. С. Торайгырова, 2004. - 148 с.
4. *Tleukenov S.K.* A method for the analytical description of coupled-field waves in various anisotropic media // *ACTA MECHANICA.* - 2014. - Том: 225. Выпуск 12. - С. 3535 - 3547.
5. *Tleukenov S.K., Aitbaev A.B.* Lamb waves in elastic layers with rhombic symmetry // *ACOUSTICAL PHYSICS.* - 2015. Том 61. Выпуск 2. - С. 144-147.
6. *Tleukenov S.K., Dossanov T.S., Vishenkova Yu.A.* About the reflection of electromagnetic TE-wave at the interface between isotropic elastic medium and piezo-crystal orthorhombic classes 222 mm², mmm // *BULLETIN OF THE UNIVERSITY OF KARAGANDA-PHYSICS.* - 2016. - Том 4. Выпуск 84. - С. 14 - 19.
7. *Tleukenov S., Bobeev A., Sabitova D.* Structure of the Matriciant for Systems of Ordinary Differential Equations of First Order and Its Applications // *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS & STATISTICS.* - 2018. - Том: 57. Выпуск 1. - С. 209 - 217.
8. Современная кристаллография (в четырёх томах). Том 4. Физические свойства кристаллов / под ред. Б.К. Вайнштейна. - М.: Наука, 1981. - 496 с.

УДК 543.251:628.8-403

Моделирование потоков движения воздуха в чистых помещениях

А.М. Терещенко, д. т. н., профессор кафедры ВМ-2,
А.М. Ревякин, к. ф.-м. н., доцент кафедры ВМ-2,
 Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
 г. Москва, Россия,
 E-mail: 4443655@mail.ru; arevyakin@mail.ru

Simulation of air flow in clean rooms

A.M. Tereshchenko, Dr.Sc.Eng., Professor at the Department of HM-2,
A.M. Revyakin, Ph.D. Phys.-Math., Associate Professor
 at the Department of HM-2,
 National Research University of Electronic Technology,
 Moscow, Russia

Аннотация

Исследуется конвективное движение, возникающее около нагретых поверхностей. Получены уравнения, описывающие динамические и физические свойства конвективной струи. Приведены частные решения полученных уравнений.

Abstract

We study the convective motion that occurs near the heated surfaces. The equations describing the dynamical and physical properties of the convective jet. Given the particular solutions of these equations.

Ключевые слова: моделирование, температура, струйное течение, турбулентность.

Keywords: simulation, temperature, jet flow, turbulence.

Источник тепла, помещённый в неподвижную воздушную среду, нарушает равновесное состояние воздуха и приводит его в движение. Возникает восходящий поток и направленное к нему течение окружающего воздуха. При достаточной мощности источника тепла вызванный им конвективный поток интенсивно перемешивается с окружающей средой и становится турбулентным. В связи с этим окружающая среда вовлекается в поступательное движение, через каждое последующее