

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ *SH*-ВОЛН В СТРУКТУРАХ ME/ZNO/ME/АЛМАЗ И ME/ALN/ME/АЛМАЗ

О. П. Золотова^{1*}, С. И. Бурков²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: zolotova@sibsau.ru

С помощью компьютерного моделирования проанализировано влияние массовой нагрузки в виде двух металлических слоев на изменение фазовой скорости дисперсионных поперечных мод упругой волны в структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз в зависимости от частоты волны и отношения толщин слоев «металл–пьезоэлектрик». Материалы пьезоэлектрических слоев и подложки обладают набором таких значимых свойств, как большие значения коэффициента электромеханической связи у пьезоэлектриков и значительные величины фазовых скоростей объемных волн и поверхностной акустической волны в алмазе. В качестве материалов металлического слоя использовались алюминий (Al), молибден (Mo) и платина (Pt), наиболее часто применяющиеся при изготовлении акустоэлектронных устройств. Обнаружено, что изменение фазовой скорости упругой волны зависит от акустического импеданса металлического слоя и его толщины. При низких значениях акустического импеданса металлического слоя более существенные изменения величин $\Delta v/v$ происходят вследствие изменения толщины нижнего электрода. Однако если акустический импеданс металлического слоя сравним с акустическим импедансом подложки, то увеличение значения величин $\Delta v/v$ в большей степени обусловлено толщиной верхнего металлического слоя. Результаты выполненного моделирования могут быть использованы при разработке различных акустоэлектронных устройств, в том числе используемых в качестве компонентов электронной базы ракетно-космической техники.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая слоистая структура, волна Лява, массовая нагрузка, компьютерное моделирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 642–650

METAL LAYER THICKNESS INFLUENCE ON THE DISPERSION CHARACTERISTICS OF *SH*-WAVES IN THE STRUCTURES “ME/ZNO/ME/DIAMOND” AND “ME/ALN/ME/DIAMOND”

O. P. Zolotova^{1*}, S. I. Burkov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: zolotova@sibsau.ru

The research paper presents the results of computer simulation of the influence of mass loading represented by two metal layers on variations in the phase velocity of the dispersion shear modes of the elastic wave in the piezoelectric layered structures Me/ZnO/Me/diamond and Me/AlN/Me/diamond depending on the frequency and the ratio of the metal layer thickness to the piezoelectric crystalline layer thickness. The materials of the piezoelectric layers and the substrate have a set of such significant properties as the large values of the electromechanical coupling coefficient for piezoelectric and the significant values of the phase velocities for bulk waves and surface acoustic wave in diamond. Aluminum (Al), molybdenum (Mo) and platinum (Pt) are considered as the metal layer materials, which are most often used in the manufacturing of acoustoelectronic devices. It was found that variation in the elastic wave phase velocity depends on the acoustic impedance of metal layer and its thickness. More significant changes in $\Delta v/v$ values at low acoustic impedance values of the metal layer occur due to a change in the thickness of the lower electrode. However, if the acoustic impedance of the metal layer is comparable with the acoustic impedance of the substrate, the increase in $\Delta v/v$ values is largely due to the thickness of the upper metal layer. The results of the simulation can be used in the development of various acoustoelectronic devices, including components of the electronic base of rocket and space technology.

Keywords: piezoelectric layered structure, Love wave, mass loading, computer simulation.

Введение. Устройства акустоэлектроники имеют ограниченные размеры, и при их разработке актуальной проблемой становится учет отражения и преломления упругой волны от границы кристаллической пластины либо от зоны контакта двух различных сред [1]. Более сложная ситуация складывается в многослойных структурах, где необходимо поочередно учитывать границы между всеми кристаллическими слоями. В данном случае может происходить трансформация типа упругого колебания либо возбуждение поверхностной волны при отражении объемной волны от межслойного интерфейса [2]. В настоящее время появилось много экспериментальных и теоретических исследований массовой чувствительности различных акустоэлектронных устройств на основе многослойных пьезоэлектрических структур, работающих на поперечных и продольной толщинных модах упругих колебаний [3–5]. В частности, существуют работы, в которых сдвиговые колебания резонаторов, созданных на подобных структурах, были использованы для разработки биосенсоров [6]. В сенсорах, созданных на основе слоистой пьезоэлектрической структуры, толщина электродов часто сопоставима с толщиной пьезоэлектрической пленки, и, следовательно, металлическими слоями нельзя пренебрегать. Тем более что такие металлы, как золото или платина, которые часто используются в сенсорах для различных биохимических применений, обладают значительными значениями акустического импеданса [7]. Однако исследования влияния массовой нагрузки пока не дают ответ на вопрос об основных причинах изменения значений фазовой скорости упругой волны в слоистой структуре. Таким образом, учет влияния толщины металлических слоев на изменение дисперсионных характеристик упругой волны в многослойной пьезоэлектрической структуре имеет ключевое значение для оптимизации конструкции и повышения чувствительности сенсоров на подобных структурах [8].

В настоящей работе выполнено компьютерное моделирование влияния массовой нагрузки в виде металлических слоев на дисперсионные характеристики мод упругой волны Лява в пьезоэлектрических слоистых структурах с оксидом цинка на алмазе (Me/ZnO/Me/алмаз) и нитридом алюминия на алмазе (Me/AlN/Me/алмаз). Данные материалы обладают набором таких свойств, как большие значения коэффициента электромеханической связи у пьезоэлектриков и значительные величины фазовых скоростей объемных волн и поверхностной акустической волны в алмазе. Благодаря этим особенностям рассматриваемые материалы широко используются при разработке различных акустоэлектронных устройств. В качестве материалов металлических слоев были выбраны алюминий, молибден, платина в виде напыленной тонкой пленки, т. е. металлы, наиболее часто применяющиеся при изготовлении электродов [9]. Результаты выполненного моделирования могут быть использованы при разработке различных акустоэлектронных устройств, в том числе используемых в качестве компонентов электронной базы ракетно-космической техники.

Теоретические основы распространения упругих волн в слоистой пьезоэлектрической среде.

Упругие волны малой амплитуды распространяются в невозмущенном внешними воздействиями пьезоэлектрическом кристалле. Уравнение движения, уравнение электростатики и уравнения состояния пьезоэлектрической среды имеют вид [10]

$$\rho_0 \ddot{U}_A = \tau_{AB,B}; \quad D_{M,M} = 0; \quad (1)$$

$$\tau_{AB} = c_{ABCD}^E \eta_{CD} - e_{MAB} E_M; \quad D_M = \varepsilon_{MN}^{\eta} E_N + e_{MAB} \eta_{AB},$$

где ρ_0 – плотность кристалла в недеформированном состоянии; U_A – вектор динамических упругих смещений; τ_{AB} – тензор термодинамических напряжений; D_M – вектор электрической индукции; η_{CD} – тензор малых деформаций; c_{ABCD}^E , e_{MAB} , ε_{MN}^{η} – упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные второго порядка. Для упругих смещений и электрического потенциала в виде плоских монохроматических волн малой амплитуды система уравнений (1) записывается в виде уравнения Грина–Кристоффеля, которое необходимо решить для каждой используемой среды слоистой структуры [11].

Введем рабочую ортогональную систему координат, в которой ось X_3 направлена вдоль внешней нормали к поверхности слоя, а ось X_1 совпадает с направлением распространения волны (рис. 1). Распространение упругой волны в такой системе должно удовлетворять соответствующим граничным условиям. Граничными условиями, в частности для четырехслойной структуры «металл – пьезоэлектрик – металл – диэлектрическая подложка» (рис. 1, а), являются: равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл–вакуум»; равенство нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл–пьезоэлектрик»; равенство векторов смещения; равенство нулю волны электрического потенциала [12]:

$$\tau_{3j}^{(1)} \Big|_{x_3=d_1} = 0;$$

$$\tau_{3j}^{(1)} = \tau_{3j}^{(2)} \Big|_{x_3=h}; \quad \varphi^{(2)} = 0 \Big|_{x_3=h}; \quad \bar{U}^{(1)} = \bar{U}^{(2)} \Big|_{x_3=h};$$

$$\tau_{3j}^{(2)} = \tau_{3j}^{(3)} \Big|_{x_3=d_2}; \quad \varphi^{(2)} = 0 \Big|_{x_3=d_2}; \quad \bar{U}^{(1)} = \bar{U}^{(3)} \Big|_{x_3=d_2};$$

$$\tau_{3j}^{(3)} = \tau_{3j}^{(4)} \Big|_{x_3=0}; \quad \bar{U}^{(3)} = \bar{U}^{(4)} \Big|_{x_3=0},$$

где d_1 , d_2 и h – толщины верхнего, нижнего слоя металла и пьезоэлектрического слоя соответственно. В настоящей работе рассмотрен случай, когда $d_1 = d_2$, т. е. толщины верхнего и нижнего слоев металла равны.

Подставляя в граничные условия уравнения упругой волны в виде линейных комбинаций парциальных волн

$$U_i = \sum_n C_n^{(m)} \alpha_i^{(n)} \exp \left[i \left(k_1 x_1 + k_3^{(n)} x_3 - \omega t \right) \right], \quad (3)$$

$$\varphi = \sum_n C_4^{(m)} \alpha_4^{(n)} \exp \left[i \left(k_1 x_1 + k_3^{(n)} x_3 - \omega t \right) \right],$$

где верхний индекс n соответствует числу парциальных волн в соответствующем кристаллическом слое, получим систему уравнений – граничных условий. Равенство нулю определителя матрицы граничных условий (2), размерность которой в данном случае

равна 24×24 , позволяет определить характеристики упругой волны.

Вариации граничных условий (2) определяют все типы упругих волн, распространяющихся в слоистой структуре. Для рассматриваемых слоистых структур Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз система уравнений граничных условий (2) разделяется на две независимые части: систему уравнений 16×16 для рэлеевских мод и систему уравнений 8×8 для SH-мод упругой волны. При использовании в слоистой структуре изотропных металлов, пьезоэлектрика группы симметрии 6 мм и диэлектрической подложки из кубического кристалла система уравнений для мод упругой волны Лява запишется в виде

$$\begin{aligned} C_n^{(1)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_1] &= 0, \\ C_n^{(1)} C_{44}^{(1)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} h] - \\ - C_n^{(2)} C_{44}^{(2)} k_3^{(m)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} h] &= 0, \\ C_n^{(2)} C_{44}^{(2)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_2] - \\ - C_n^{(3)} C_{44}^{(3)} k_3^{(m)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} d_2] &= 0, \\ C_m^{(1)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} h] - C_n^{(2)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} h] &= 0, \\ C_m^{(3)} \alpha_2^{(m)} \exp[ik_3^{(m)} d_2] - C_n^{(2)} \alpha_2^{(n)} \exp[ik_3^{(n)} d_2] &= 0, \\ C_n^{(3)} C_{44}^{(3)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} - C_n^{(4)} C_{44}^{(4)} k_3^{(n)} \alpha_2^{(n)} &= 0, \\ C_m^{(3)} \alpha_2^{(m)} - C_n^{(4)} \alpha_2^{(n)} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где цифровые верхние индексы 1–4 обозначают слои и подложку соответственно, по аналогии с уравнением (2); k_3 – волновой вектор.

Анализ влияния массовой нагрузки в слоистой структуре. Массовая чувствительность S многослойного резонатора определяется из условия энергетического баланса как частотное изменение, т. е. сдвиг относительной частоты резонатора, нормализованный к поверхностной массовой плотности [13]:

$$S = \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) / (f \rho_s) = \left(\frac{\Delta v}{v} \right) / (f \rho_s), \quad (5)$$

где v, f – фазовая скорость и частота упругой волны. Однако недостатком данного подхода является то, что при больших значениях частоты f сглаживаются изменения фазовой скорости при увеличении толщины металлического слоя. Поэтому в настоящей работе для определения массовой чувствительности упругой волны использовалась следующая формула:

$$S_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{v_{mt} - v}{v_{mt}}, \quad (6)$$

где v_{mt} – фазовая скорость упругой волны при нанесении тонкого металлического слоя, не изменяющего механических граничных условий. Отметим, что данное условие, как показал компьютерный эксперимент, выполняется при толщине слоя менее 1 нм. Также условие (6) нивелирует влияние пьезоэффекта, и, следовательно, параметр S_v не будет зависеть от типа пьезоэлектрического слоя.

Схематическое изображение исследуемых слоистых структур представлено на рис. 1, а. Дисперсионные

зависимости фазовых скоростей фундаментальной и первой моды волны Лява от значения параметра $h \times f$ (толщина пьезоэлектрика \times частота) для слоистой структуры вида Me/ZnO/Me/алмаз с ориентацией [100] (001) слоя и подложки представлены на рис. 1, б, аналогичные зависимости для слоистой структуры вида Me/AlN/Me/алмаз с ориентацией [100] (001) слоя и подложки представлены на рис. 1, в. В качестве слоя металла (Me) использовались Al, Mo, Pt, обладающие различными значениями акустического импеданса $Z = \rho v$. Выбор различных металлов позволяет также выяснить, как высокий/низкий акустический импеданс слоя влияет на изменение фазовой скорости упругой волны. Акустические импедансы используемых слоев соотносятся как $Z_{Al} < Z_{AlN} < Z_{ZnO} < Z_{алмаз} < Z_{Mo} < Z_{Pt}$. Значения материальных констант используемых материалов для алюминия и молибдена взяты в [9], ZnO – в [14], AlN – в [15], алмаза – в [16], поликристаллической платины – в [17].

Диапазон изменения фазовых скоростей SH-мод упругой волны в структуре Me/ZnO/Me/алмаз находится в пределах от значения фазовой скорости сдвиговой волны алмаза ($v = 12828,2$ м/с) до фазовой скорости поперечно-поляризованной объемной сдвиговой волны в ZnO ($v = 4176,2$ м/с).

В структуре Me/AlN/Me/алмаз фазовые скорости SH-мод упругой волны изменяются также от значения фазовой скорости сдвиговой волны алмаза до фазовой скорости медленной поперечно-поляризованной объемной сдвиговой волны в AlN ($v = 5808,8$ м/с).

Расчет изменения мод фазовых скоростей упругой волны был произведен при относительных отношениях толщин металлических слоев к толщине пьезоэлектрика $d/h = 0,005; 0,01; 0,05; 0,1$. Сплошной линией на рис. 1, б, в обозначены фазовые скорости мод упругой волны Лява (SH-моды) при металлизации пьезоэлектрического слоя двумя бесконечно тонкими слоями металла, не нарушающими механических граничных условий. Штриховыми линиями на рис. 1, б, в обозначены фазовые скорости упругой волны при относительном отношении толщины слоя металла к слою пьезоэлектрика $d/h = 0,1$. В абсолютных значениях представленные значения фазовых скоростей можно представить при толщинах слоев пьезоэлектрика $h = 10$ мкм и металла $d = 1$ мкм при изменении частоты от 1 МГц до 1 ГГц.

Использование слоев металла в слоистой структуре может существенно повлиять на перераспределение упругой энергии волны вследствие акустических свойств самих слоев или сложной интерференции между модами упругой волны, падающими и отраженными от границы раздела слоев. Например, в структурах Pt/ZnO/Pt/алмаз и Pt/AlN/Pt/алмаз при увеличении значений $h \times f$ фазовые скорости SH-мод (волны Лява) упругой волны стремятся к значению фазовой скорости объемной сдвиговой волны в Pt. Аналогичная ситуация проявляется и при использовании в многослойной структуре других металлов. При этом отмечается, что в структуре Me/AlN/Me/алмаз скорости SH-мод упругой волны при одинаковом типе металла и значении параметра $h \times f$ уменьшаются более значительно, чем в структуре Me/ZnO/Me/алмаз.

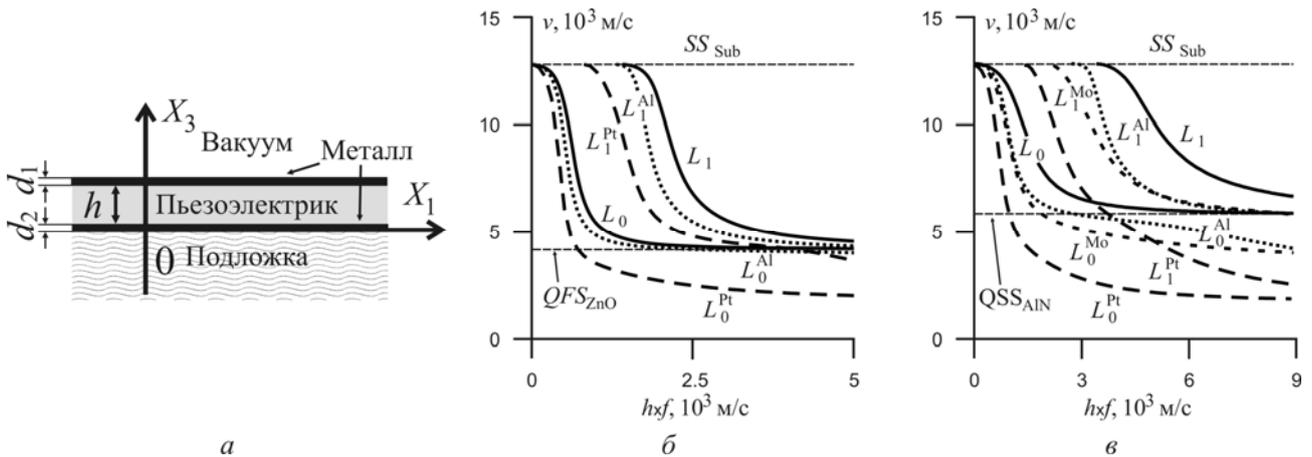


Рис. 1. Дисперсионные зависимости фазовых скоростей от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Ме/пьезоэлектрик/Ме/алмаз: а – схема слоистой структуры; б – моды SH-волны L_0 и L_1 в структуре Ме/ZnO/Ме/алмаз; в – моды SH-волны L_0 и L_1 в структуре Ме/AlN/Ме/алмаз; сплошные линии – скорости мод при бесконечно тонких слоях металла, штриховые линии – скорости при толщине слоев металла $d/h = 0,1$

Fig. 1. Dispersive dependence of phase velocities on the product $h \times f$ for the layered structure Me/Piezoelectric /Me/diamond: a – the scheme of the layered structure; b – SH-wave mode L_0 and L_1 in the structure Me/ZnO/Me/diamond; c – SH-wave mode L_0 and L_1 in the structure Me/ AlN/Me/diamond. Solid lines – mode velocities for infinitely thin metal layers, dash lines – mode velocities for metal layers thickness $d/h = 0,1$

На рис. 2 представлены графики относительного изменения фазовых скоростей S_v (б) фундаментальной моды L_0 и первой моды L_1 волны Лява в зависимости от типа металлического слоя, отношения d/h и параметра $h \times f$ в структуре Ме/ZnO/Ме/алмаз. Максимальные значения параметра S_v моды L_0 достигаются при значении $h \times f = 600-700$ м/с при использовании всех типов металлических слоев и отношении $d/h = 0,1$ (рис. 2, а-в). При использовании слоев Al и Mo значения параметра $S_v = 0,24$ и $S_v = 0,26$ соответственно, но для структуры Pt/ZnO/Pt/алмаз параметр $S_v = 0,49$. Необходимо отметить, что увеличение толщины металлического слоя приводит к смещению частоты сигнала при достижении максимальных значений параметра S_v . Существенный рост значений параметра S_v особенно проявляется с ростом значений $h \times f$ при отношении $d/h > 0,05$. Данное увеличение значений S_v особенно существенно для металлов с высоким значением акустического импеданса для фундаментальной моды L_0 упругой волны. Однако численные значения S_v в зависимости от типа металла существенно отличаются, например, в структуре Al/ZnO/Al/алмаз $S_v = 0,11$ при $h \times f = 8500$ м/с, а в структуре Pt/ZnO/Pt/алмаз $S_v = 0,56$ при аналогичном значении $h \times f$.

Максимальные значения параметра S_v для моды L_1 упругой волны Лява достигаются при $h \times f = 2100$ м/с, где выполняется условие $h = \lambda/4$, т. е. толщина пьезоэлектрического слоя равна четверти длины упругой волны (рис. 2, з-е). Однако в отличие от фундаментальной моды L_0 для первой моды L_1 волны Лява величины параметра S_v с ростом значений $h \times f$ уменьшаются при использовании металлических слоев Al или Mo, но для структуры Pt/ZnO/Pt/алмаз при отношении $d/h = 0,1$ происходит резкий рост значений параметра S_v (рис. 2, е).

На рис. 3 представлены графики относительного изменения фазовых скоростей S_v фундаментальной и первой моды волны Лява в зависимости от типа металлического слоя, отношения d/h и параметра $h \times f$ в структуре Ме/AlN/Ме/алмаз.

Максимальные значения параметра S_v моды L_0 достигаются при значениях $h \times f = 1300-1400$ м/с при использовании всех типов металлических слоев и отношении $d/h = 0,1$ (рис. 3, а-в). При использовании слоев Al и Mo значения параметра $S_v = 0,27$ и $S_v = 0,31$ соответственно, а для структуры Pt/AlN/Pt/алмаз параметр $S_v = 0,55$. Значения параметра S_v на 12-13 % превышают аналогичные значения для структуры Ме/ZnO/Ме/алмаз, при этом увеличение толщины металлического слоя также приводит к смещению частоты сигнала при достижении максимальных значений параметра S_v . При этом в отличие от предыдущей структуры для фундаментальной моды L_0 упругой волны отмечено существенное увеличение значений параметра S_v для всех типов металлов при отношении $d/h > 0,05$. Величина параметра S_v при больших значениях $h \times f$ может быть сравнима или даже превышать значения в локальном максимуме при $h \times f = 1300-1400$ м/с. Например, в структуре Al/AlN/Al/алмаз $S_v = 0,26$ при $h \times f = 8500$ м/с, а в структуре Pt/AlN/Pt/алмаз $S_v = 0,73$ при аналогичном значении $h \times f$.

Максимальные значения параметра S_v для моды L_1 упругой волны Лява достигаются при $h \times f = 4300$ м/с, где выполняется условие $h = \lambda/4$, т. е. толщина пьезоэлектрического слоя равна четверти длины упругой волны (рис. 3, з-е). В целом характер изменений параметра S_v аналогичен изменениям S_v в предыдущей слоистой структуре.

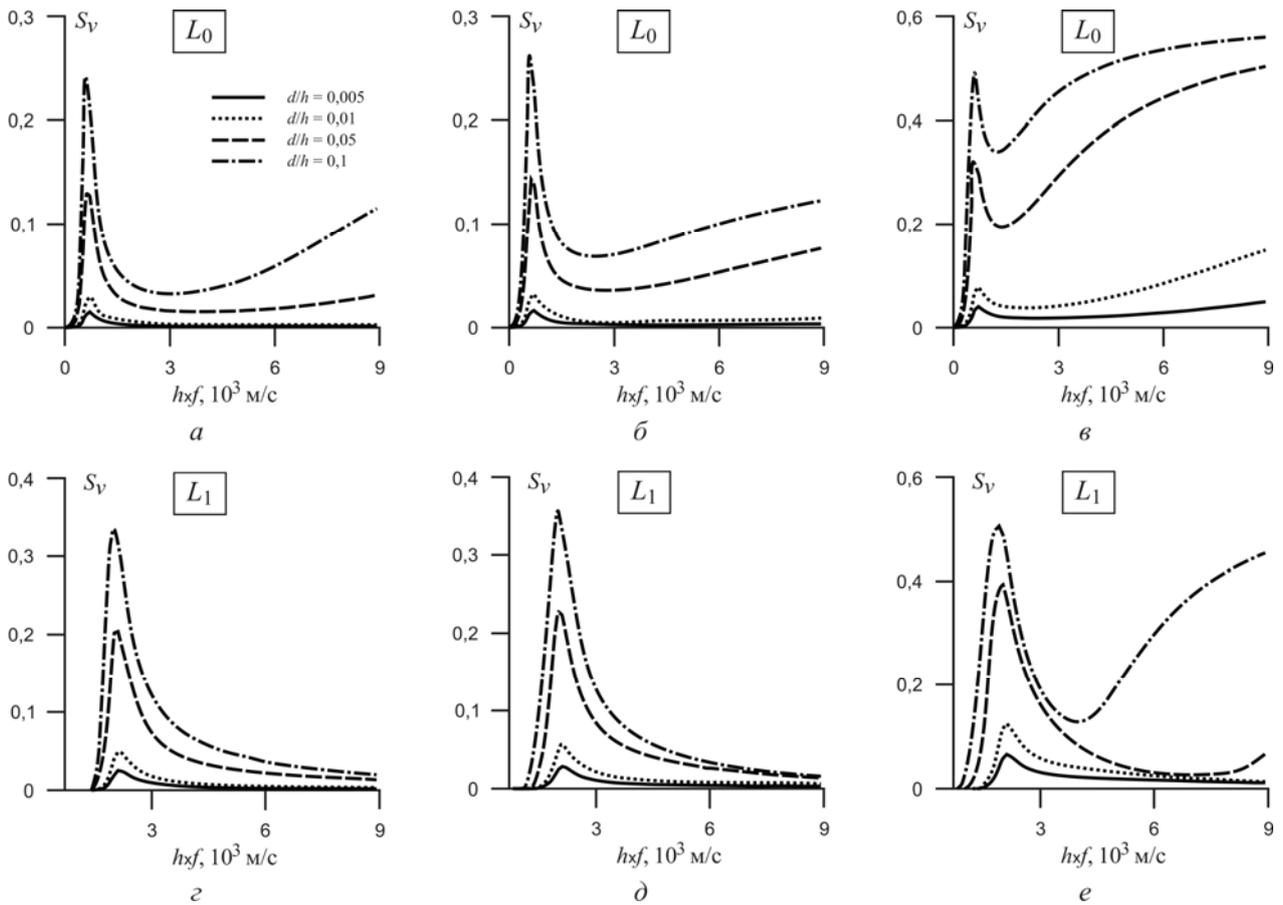


Рис. 2. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 и L_1 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Me/ZnO/Me/алмаз: а, з – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 2. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 and L_1 on the product of $h \times f$ for the layered structure Me/ZnO/Me/diamond: а (а), d (z) – aluminium; б (b), e (d) – molybdenum; в (c), f (e) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

При создании устройств акустоэлектроники желательно представлять характер зависимости характеристик упругой волны от свойств дополнительных слоев. На рис. 4 представлены зависимости параметра S_v от величины значения d/h для фундаментальных и первых мод упругой волны в обеих слоистых структурах.

В случае рассмотрения структуры Me/ZnO/Me/алмаз линейная зависимость наблюдается только при использовании слоев Al (рис. 4, а). Например, для фундаментальной моды L_0 волны Лява при $h \times f = 700$ м/с и первой моды L_1 при $h \times f = 3400$ м/с зависимость S_v от величины значения d/h аппроксимируется выражением $S_v = 2,2 \cdot d/h$ и $S_v = 0,94 \cdot d/h$ соответственно. Однако уже для структуры Mo/ZnO/Mo/алмаз наблюдается квадратичная зависимость $S_v = -9,3 \cdot (d/h)^2 + 3,2 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -6,4 \cdot (d/h)^2 + 1,6 \cdot d/h$ для моды L_1 . При использовании слоев платины присутствует явно выраженная квадратичная зависимость $S_v = -30,6 \cdot (d/h)^2 + 7,5 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -17,4 \cdot (d/h)^2 + 3,1 \cdot d/h$ для моды L_1 . При этом наблюдаются максимальные величины параметра S_v для фундаментальной моды волны Лява при отношении $d/h = 0,1$. В целом в рассмотренной структуре мода L_0 обладает большей чувствительностью при всех типах металлов, чем первая мода волны Лява.

В случае рассмотрения упругих волн Лява в структуре Me/AlN/Me/алмаз линейная зависимость уже не наблюдается (рис. 4, б). Например, для фундаментальной моды L_0 волны Лява при $h \times f = 1300$ м/с и первой моды L_1 при $h \times f = 4400$ м/с зависимость S_v от величины значения d/h аппроксимируется выражением $S_v = -9,6 \cdot (d/h)^2 + 3,7 \cdot d/h$ и $S_v = -17,5 \cdot (d/h)^2 + 5,4 \cdot d/h$ соответственно. При использовании слоев платины присутствует явно выраженная квадратичная зависимость: $S_v = -35 \cdot (d/h)^2 + 9 \cdot d/h$ для фундаментальной моды L_0 и $S_v = -48,6 \cdot (d/h)^2 + 10,7 \cdot d/h$ для моды L_1 . При этом максимальные величины параметра S_v наблюдаются для первой моды волны Лява при отношении $d/h = 0,1$. В отличие от предыдущей структуры, мода L_1 обладает большей чувствительностью при всех типах металлов, чем фундаментальная мода волны Лява.

Необходимо отметить, что подобные зависимости параметра S_v прослеживаются на всем рассмотренном частотном интервале. Таким образом, в многослойных структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз чувствительность S_v находится в прямой зависимости от значения акустического импеданса металлического слоя.

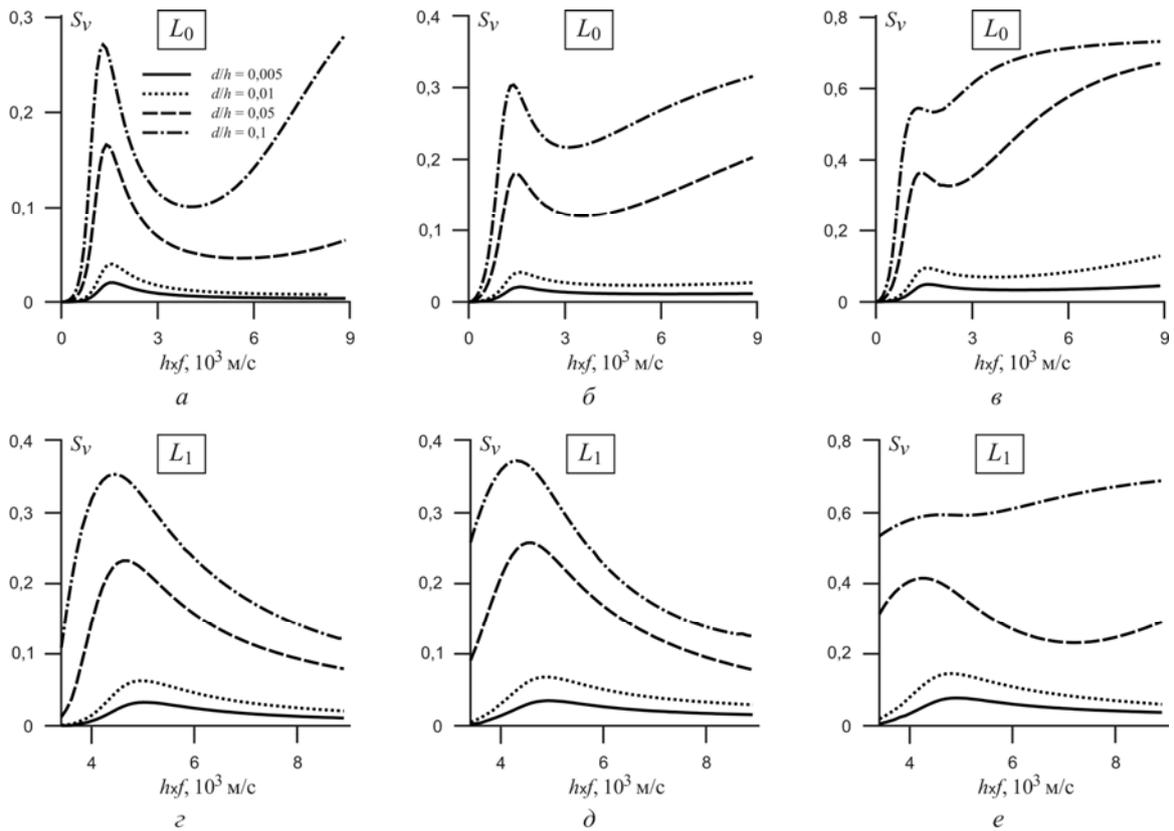


Рис. 3. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 и L_1 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры Me/AlN/Me/алмаз: а, з – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 3. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 and L_1 on the product of $h \times f$ for the layered structure Me/AlN/Me/diamond: а (а), d (з) – aluminium; б (б), e (д) – molybdenum; с (в), f (е) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

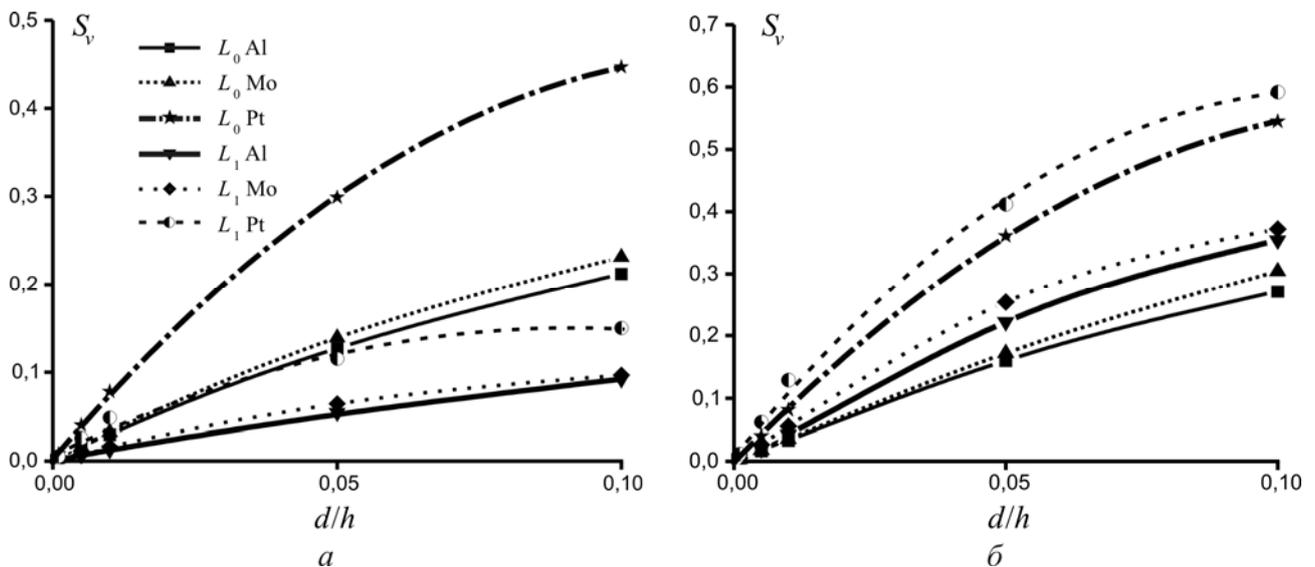


Рис. 4. Графики зависимости S_V отношения от толщины металла: а – структура Me/ZnO/Me/алмаз, мода L_0 при $h \times f = 700$ м/с и мода L_1 при $h \times f = 3400$ м/с; б – структура Me/AlN/Me/алмаз, мода L_0 при $h \times f = 1300$ м/с и мода L_1 при $h \times f = 4400$ м/с

Fig. 4. Dependency Graphs of the dependency of S_V ratio on the metal thickness: а – the structure Me/ZnO/Me/diamond, mode L_0 of $h \times f = 700$ m/c and mode L_1 of $h \times f = 3400$ m/c; б – the structure Me/AlN/Me/diamond, mode L_0 of $h \times f = 1300$ m/c and mode L_1 of $h \times f = 4400$ m/c

При рассмотрении условий распространения упругой волны в пьезоэлектрической структуре типа $\text{Me}/\text{пьезоэлектрик}/\text{Me}/\text{алмаз}$ возникает следующий вопрос: каким образом верхний или нижний металлический слой влияет на изменение фазовой скорости волны? Установлено, что для геометрически несимметричной многослойной структуры, когда толщины металлических слоев и/или типы материалов варьируются, значения параметра S_V будут отличаться.

На рис. 5 представлены дисперсионные зависимости фундаментальной моды L_0 волны Лява от величины параметра $h \times f$ в структурах $\text{Me}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ и $\text{ZnO}/\text{Me}/\text{алмаз}$. В структуре $\text{Me}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ характер изменения параметра S_V при использовании различных металлов качественно подобен поведению параметра S_V в структуре $\text{Me}/\text{ZnO}/\text{Me}/\text{алмаз}$. Однако отмечено, что если в структурах $\text{Al}/\text{ZnO}/\text{Al}/\text{алмаз}$ и $\text{Mo}/\text{ZnO}/\text{Mo}/\text{алмаз}$ величины параметра S_V сравнимы (см. рис. 2, а, б), то для структур $\text{Al}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ и $\text{Mo}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ значения параметра S_V существенно отличаются (рис. 5, а, б). В частности, при использовании Al при значении $h \times f = 700$ м/с и $d/h = 0,1$ значение параметра $S_V = 0,075$, а при использовании Mo величина $S_V = 0,21$. Для структур $\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Pt}/\text{алмаз}$ и $\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ характер поведения и значения параметра S_V практически не меняются (рис. 2, в, рис. 5, в).

В структурах $\text{ZnO}/\text{Me}/\text{алмаз}$ характер поведения дисперсии параметра S_V моды L_0 меняется: высокие значения чувствительности сменяются низкими, и наоборот. Например, при использовании слоя Al при значении $h \times f = 700$ м/с и $d/h = 0,1$ параметр $S_V = 0,18$, для Mo $S_V = 0,06$, и для Pt $S_V = 0,12$.

На рис. 6 представлены дисперсионные зависимости фундаментальной моды L_0 волны Лява в структурах $\text{Me}/\text{AlN}/\text{алмаз}$ и $\text{AlN}/\text{Me}/\text{алмаз}$. В структуре $\text{Me}/\text{AlN}/\text{алмаз}$ характер изменения параметра S_V при использовании различных металлов качественно подобен поведению параметра S_V в структуре $\text{Me}/\text{AlN}/\text{Me}/\text{алмаз}$. Аналогично рассмотренному предыдущему случаю с несимметричной металлизацией структур $\text{ZnO}/\text{алмаз}$ в структурах $\text{Al}/\text{AlN}/\text{Al}/\text{алмаз}$ и $\text{Mo}/\text{AlN}/\text{Mo}/\text{алмаз}$ величины параметра S_V сравнимы (см. рис. 3, а, б), а для структур $\text{Al}/\text{AlN}/\text{алмаз}$ и $\text{Mo}/\text{AlN}/\text{алмаз}$ значения параметра S_V существенно отличаются (см. рис. 6, а, б). В частности, при использовании Al при значении $h \times f = 1600$ м/с и $d/h = 0,1$ значение параметра $S_V = 0,09$, а при использовании Mo величина $S_V = 0,26$. Для структур $\text{Pt}/\text{AlN}/\text{Pt}/\text{алмаз}$ и $\text{Pt}/\text{AlN}/\text{алмаз}$ характер поведения и значения параметра S_V практически не меняются (см. рис. 3, в, рис. 6, в).

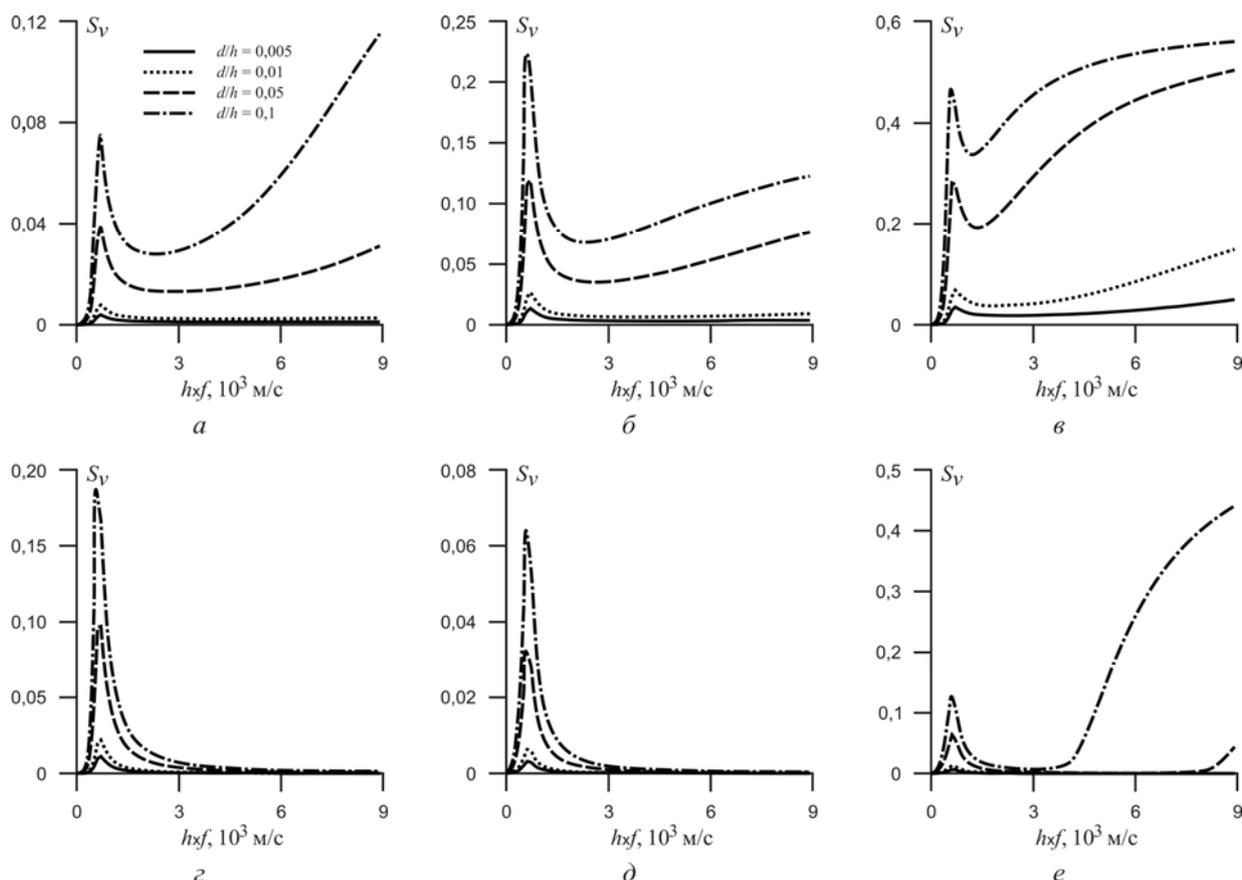


Рис. 5. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры $\text{Me}/\text{ZnO}/\text{алмаз}$ (а-в) и $\text{ZnO}/\text{Me}/\text{алмаз}$ (з-е): а, з – алюминий, б, д – молибден, в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 5. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 on the product of $h \times f$ for the layered structure $\text{Me}/\text{ZnO}/\text{Me}/\text{diamond}$ (a-e) and $\text{ZnO}/\text{Me}/\text{diamond}$ (z-e): a (a), d (z) – aluminium; b (б), e (d) – molybdenum; c (в), f (e) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

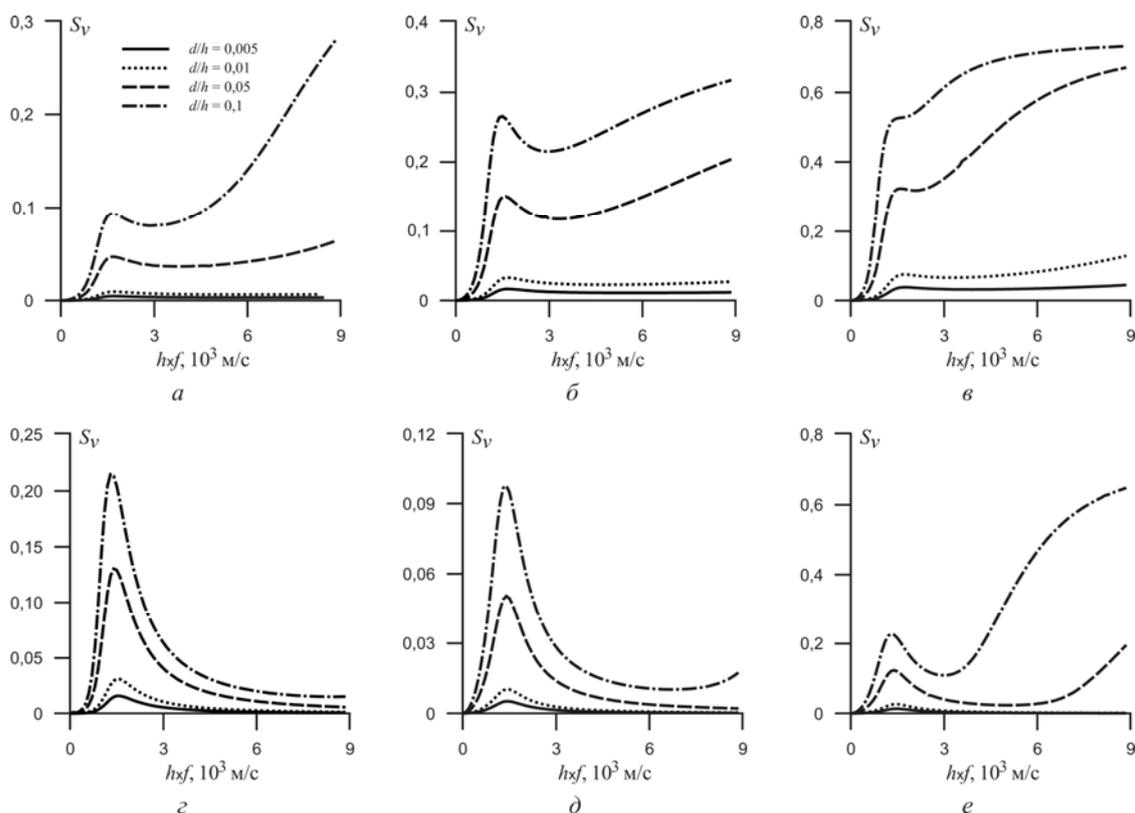


Рис. 6. Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды L_0 от произведения hxf для слоистой структуры Me/AlN/алмаз (а–в) и AlN/Me/алмаз (z–e): а, z – алюминий; б, д – молибден; в, е – платина; отношение толщин металла и пьезоэлектрика d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

Fig. 6. Dispersive dependence of the change of phase velocities of the mode L_0 on the product of hxf for the layered structure Me/AlN/Me/diamond (a–e) and AlN/Me/diamond (z–e): a (a), d (z) – aluminium; b (б), e (d) – molybdenum; c (в), f (e) – platinum. Ratio of the metal layers and piezoelectric d/h : 0,005; 0,01; 0,05; 0,1

В структурах AlN/Me/алмаз характер поведения дисперсии параметра S_V моды L_0 также меняется: высокие значения чувствительности сменяются низкими, и наоборот. Например, при использовании слоя Al при значении $hxf = 1300$ м/с и $d/h = 0,1$ параметр $S_V = 0,22$, для Mo $S_V = 0,097$, и для Pt $S_V = 0,23$.

Таким образом, в обоих типах структур с несимметричной металлизацией при высоких значениях акустического импеданса металлического слоя максимальные значения чувствительности достигаются при наличии верхнего металлического слоя, т. е. в структуре Me/ZnO/алмаз и Me/AlN/алмаз, а при низких значениях акустического импеданса – в структурах при наличии промежуточного металлического слоя (ZnO/Me/алмаз и AlN/Me/алмаз).

Заключение. Влияние массовой нагрузки в виде двух металлических слоев (моделирующих верхний и нижний электрод) на изменение фазовой скорости $\Delta v/v$ дисперсионных мод упругой волны в пьезоэлектрических слоистых структурах Me/ZnO/Me/алмаз и Me/AlN/Me/алмаз в зависимости от частоты и отношения d/h находится в прямой зависимости от значения акустического импеданса металлического слоя. Отмечено, что максимальные значения изменения фазовых скоростей мод упругой волны $\Delta v/v$ достигаются при конфигурации слоистой системы Pt/AlN/Pt/алмаз. Кроме того, структуры Me/AlN/Me/алмаз обладают большим значениями чувствительности S_V , чем струк-

туры Me/ZnO/Me/алмаз. Обнаружено, что максимальные значения величин $\Delta v/v$ достигаются, если толщина металлического слоя кратна четверти длины упругой волны. Необходимо отметить, что при низких значениях акустического импеданса металлического слоя более существенные изменения величин $\Delta v/v$ происходят вследствие изменения толщины нижнего электрода. Однако если акустический импеданс металлического слоя сравним с акустическим импедансом подложки, то в данном случае увеличение значений величин $\Delta v/v$ в большей степени обусловлено толщиной верхнего металлического слоя.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке управляемых акустоэлектронных устройств на волнах Рэлея и Лява.

Библиографические ссылки

1. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук. 2005. № 8 (175). С. 887–895.
2. Альшиц В. И., Любимов В. Н., Радович А. Резонансное возбуждение волн Лява в структурах типа «сэндвич» // Физика твердого тела. 1996. № 4 (38). С. 1091–1099.
3. Thin aluminum nitride film resonators. Miniaturized high sensitivity mass sensors / R. P. O'Toole [et al.] // Analytical Chemistry. 1992. Vol. 64. P. 1289–1294.

4. Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P. Bulk acoustic wave resonator operating at 8GHz for gravimetric sensing of organic films // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. P. 681–686.
5. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles / R. Gabl [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2004. Vol. 19. P. 615–620.
6. Immunosensor utilizing a shear mode thin film bulk acoustic sensor / G. Wingqvist [et. al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Vol. 127. P. 248–252.
7. Nakamoto T., Moriizumi T. A theory of a quartz crystal microbalance based upon a Mason equivalent circuit // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1990. P. 1, vol. 29. P. 963–969.
8. Lamb waves dispersion curves for diamond based piezoelectric layered structure / B. P. Sorokin [et. al.] // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 108. P. 113501 (5).
9. Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyansky I. M. Acoustic HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) thin films // *Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium (7–10 Oct. 2001, Atlanta, USA)*. 2001. Vol. 1. P. 415–418.
10. Фарнелл Д. Типы и свойства поверхностных акустических волн // *Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. М. : Мир, 1981. 500 с.*
11. Упругие волны в пьезоэлектрических слоистых структурах / О. П. Золотова [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика»*. 2012. № 2 (5). С. 164–186.
12. Piezoelectric-layered structures based on synthetic diamond / B. P. Sorokin [et. al.] // *InTech: Piezoelectric Materials*. 2016. P. 161–199.
13. Гравиметрическая чувствительность акустических волн в тонких пьезоэлектрических пластинах в присутствии жидкости / И. Е. Кузнецова [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2006. № 16 (32). С. 84–89.
14. Zhang Z., Wen Z., Wang C. Investigation of surface acoustic waves propagating in ZnO–SiO₂–Si multi-layer structure // *Ultrasonics*. 2013. Vol. 53. P. 363–368.
15. Tsubouchi K., Sugai K., Mikoshiba N. AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si // *Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium (14–16 Oct. 1981, Chicago, USA)*. 1981. P. 375–380.
16. Experimental investigation of the linear and nonlinear elastic properties of synthetic diamond single crystal / B. P. Sorokin [et. al.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика»*. 2013. № 1(6). С. 120–126.
17. Macfarlane R. E., Rayne J. A., Jones C. K. Anomalous temperature dependence of shear modulus C_{44} for platinum // *Physics Letters*. 1965. Vol. 18. P. 91–92.
4. Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P. Bulk acoustic wave resonator operating at 8 GHz for gravimetric sensing of organic films. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006, Vol. 114, P. 681–686. DOI: 10.1016/j.snb.2005.04.047.
5. Gabl R., Feucht H. D., Zeininger H. et al. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles. *Biosensors and Bioelectronics*. 2004, Vol. 19, P. 615–620. DOI: 10.1016/S0956-5663(03)00259-8.
6. Wingqvist G., Bjurström J., Hellgren A. C., Katardjiev I. Immunosensor utilizing a shear mode thin film bulk acoustic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007, Vol. 127, P. 248–252. DOI: 10.1016/j.snb.2007.07.051.
7. Nakamoto T., Moriizumi T. A theory of a quartz crystal microbalance based upon a Mason equivalent circuit. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 1*. 1990, Vol. 29, P. 963–969. DOI: 10.1143/JJAP.29.963.
8. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Telichko A. V. et al. Lamb waves dispersion curves for diamond based piezoelectric layered structure. *Applied Physics Letters*. 2016, Vol. 108, P. 113501 (5). DOI: 10.1063/1.4943945.
9. Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyansky I. M. [Acoustic HBAR Spectroscopy of Metal (W, Ti, Mo, Al) Thin Films]. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* Atlanta, USA, 2001. P. 415–418. DOI: 10.1109/ULTSYM.2001.991652.
10. Farnell G. W. *Acoustic Surface Waves: Topics in Applied Physics*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1978, 390 p.
11. Zolotova O. P., Burkov S. I., Sorokin B. P., Telichko A. V. [Elastic waves in piezoelectric layered structures]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Matematika i fizika*. 2012, Vol. 5, No. 2, P. 164–186 (In Russ.).
12. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Telichko A. V., Burkov S. I., Blank V. D. Piezoelectric-layered structures based on synthetic diamond. *Piezoelectric Materials*. InTech. 2016, P. 161–199. DOI: /10.5772/61563.
13. Kuznetsova I. E., Zaitsev B. D., Joshi S. G., Kuznetsova A. S. Gravimetric sensitivity of acoustic waves in thin piezoelectric plates in the presence of liquids. *Technical Physics Letters*. 2006, Vol. 32, No. 8, P. 729–731. DOI: 10.1134/S1063785006080268.
14. Zhang Z., Wen Z., Wang C. Investigation of surface acoustic waves propagating in ZnO–SiO₂–Si multi-layer structure. *Ultrasonics*. 2013, Vol. 53, No. 2, P. 363–368. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.07.002.
15. Tsubouchi K., Sugai K., Mikoshiba N. [AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si]. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* Chicago, USA, 1981. P. 375–380. DOI: 10.1109/ULTSYM.1981.197646.
16. Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Kuznetsov M. S., Telichko A. V., Burkov S. I. Experimental investigation of the linear and nonlinear elastic properties of synthetic diamond single crystal. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Matematika i fizika*. 2013, Vol. 6, No. 1, P. 120–126 (In Russ.).
17. Macfarlane R. E., Rayne J. A., Jones C. K. Anomalous temperature dependence of shear modulus C_{44} for platinum. *Physics Letters*. 1965, Vol. 18, No. 2, P. 91–92. DOI: 10.1016/0031-9163(65)90659-1.

References

1. Gulyaev Yu. V. Acoustoelectronics (historical review). *Physics-Uspekhii*. 2005, Vol. 48, No. 8, P. 847–855.
2. Al'shich V. I., Ljubimov V. N., Radovich A. [Resonant excitation of Love waves in the sandwich structures]. *Fizika tverdogo tela*. 1996, Vol. 38, No. 4, P. 1091–1099 (In Russ.).
3. O'Toole R. P., Burns S. C., Bastiaans G. J., Porter M. D. Thin aluminum nitride film resonators. Miniaturized high sensitivity mass sensors. *Analytical Chemistry*. 1992, Vol. 64, P. 1289–1294. DOI: 10.1021/ac00035a017.