

Чувствительность дисперсионных характеристик акустических волн в слоистой структуре «Me/ZnO/Me/алмаз» от толщины металлических слоев

С. И. Бурков^{1,*}, О. П. Золотова^{2,†}, П. П. Турчин¹, И. М. Рычков¹

¹Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева
Россия, 660037, Красноярск, пр. им. газеты Красноярский рабочий, д. 31

(Статья поступила 03.07.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

В настоящей работе было выполнено исследование влияния массовой нагрузки в виде двух металлических слоев (верхний и нижний электрод) на изменение фазовой скорости дисперсионных мод упругой волны в пьезоэлектрической слоистой структуре «Me/ZnO/Me/алмаз». Проанализированы зависимости этого изменения от отношения $h \times f$ (частота \times толщина пьезоэлектрика) и отношения d/h (толщина металла/толщина пьезоэлектрика). В качестве материала металлических слоев рассматриваются алюминий (Al), молибден (Mo), платина (Pt).

PACS: 43.35.+d; 68.60.Bs; 68.65.Ac. УДК: 534.22; 534.84 534.16.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая многослойная структура, упругая волна, рэлеевская мода, SH-волна.

ВВЕДЕНИЕ

Устройства акустоэлектроники имеют конечные размеры, и актуальной проблемой становится учет отражения и преломления упругой волны от границы кристаллической пластины либо учет интерфейса двух пьезоэлектрических сред [1]. Более сложная ситуация складывается в многослойных структурах, где необходимо учитывать и межслойный интерфейс, то есть границу между двумя кристаллическими слоями. В данном случае возможны как трансформация типа упругого колебания, так и возбуждения поверхностной волны при отражении объемной 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 продольной и поперечных толщинных модах упругих колебаний [3, 4]. В настоящей работе теоретически рассмотрено влияние массовой нагрузки в виде металлических слоев над слоем пьезоэлектрика на дисперсионные характеристики мод упругой волны Рэлея и Лява в пьезоэлектрических слоистых структурах «оксид цинка/алмаз» («ZnO/алмаз»). В качестве материала металлических слоев рассматриваются алюминий (Al), молибден (Mo), платина (Pt) в виде напыленной тонкой пленки, т.е. металлы, которые наиболее часто используются в качестве электродов [5].

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Уравнение движения, уравнение электростатики и уравнения состояния пьезоэлектрической среды име-

ют вид [6]:

$$\begin{aligned} \rho_0 \ddot{U}_A &= \tau_{AB,B}; \quad D_{M,M} = 0; \\ \tau_{AB} &= c_{ABCD}^E \eta_{CD} - e_{MAB} E_M; \\ D_M &= \varepsilon_{MN}^\eta E_N + e_{MAB} \eta_{AB}, \end{aligned} \quad (1)$$

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_{ABKL}^E , e_{NAB} , ε_{MN}^η — упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные.

Распространение упругой волны в рабочей системе координат, в которой ось X_3 направлена вдоль внешней нормали к границе раздела, а ось X_1 совпадает с направлением распространения волны, должно удовлетворять соответствующим граничным условиям. Граничные условия, в частности, для четырехслойной структуры «металл/пьезоэлектрик/металл/диэлектрическая подложка» можно записать как равенство нулю нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл/вакуум»; равенство нормальных компонент тензора напряжений на границе раздела «металл/пьезоэлектрик», равенство векторов смещения и равенство нулю волны потенциала [7]:

$$\begin{aligned} \tau_{3j}^{(1)} \Big|_{x_3=d_1} &= 0; \\ \tau_{3j}^{(1)} &= \tau_{3j}^{(2)} \Big|_{x_3=h}; \quad \phi^{(2)} = 0 \Big|_{x_3=h}; \quad \mathbf{U}^{(1)} = \mathbf{U}^{(2)} \Big|_{x_3=h}; \\ \tau_{3j}^{(2)} &= \tau_{3j}^{(3)} \Big|_{x_3=d_2}; \quad \phi^{(2)} = 0 \Big|_{x_3=d_2}; \quad \mathbf{U}^{(2)} = \mathbf{U}^{(3)} \Big|_{x_3=d_2}; \\ \tau_{3j}^{(3)} &= \tau_{3j}^{(4)} \Big|_{x_3=0}; \quad \mathbf{U}^{(3)} = \mathbf{U}^{(4)} \Big|_{x_3=0}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь d_1 , d_2 и h — толщины верхнего и нижнего слоя металла и пьезоэлектрического слоя. В настоящей работе принято $d_1 = d_2$, т.е. толщины слоев ме-

*E-mail: sburkov@sfu-kras.ru

†E-mail: zolotova@sibsau.ru

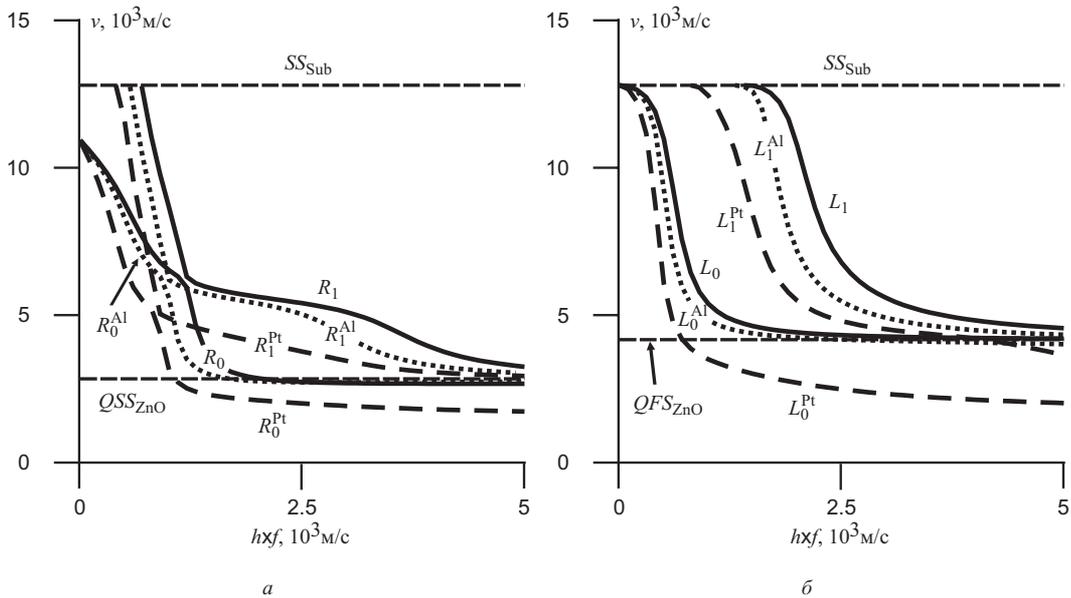


Рис. 1: Дисперсионные зависимости фазовых скоростей от произведения $h \times f$ для слоистой структуры «Me/ZnO/Me/алмаз»: а — моды R_0 и R_1 , б — моды L_0 и L_1 . Сплошные линии — скорости мод при бесконечно тонких слоях металла, штриховые линии — скорости при толщине слоев металла $d/h = 0.1$

тала равны. Равенство нулю определителя матрицы граничных условий (2), размерность которой в данном случае 24×24 , позволяет определить характеристики упругой волны.

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАССОВОЙ НАГРУЗКИ В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ

Массовая чувствительность (S) многослойного резонатора в основном находится из условия энергетического баланса как частотное изменение, т.е. как сдвиг относительной частоты резонатора, нормализованный к поверхностной массовой плотности $S = \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right) / (f \rho_s) = \left(\frac{\Delta v}{v}\right) / (f \rho_s)$ [8] (v, f — фазовая скорость и частота упругой волны). Однако недостатком данного уравнения 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:

$$S_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{v - v_{mt}}{v}, \quad (3)$$

где v_{mt} — фазовая скорость упругой волны при нанесении тонкого металлического слоя, не изменяющего механических граничных условий. Условие (3) нивелирует влияние пьезоэффекта и, следовательно, параметр (S_v) не будет зависеть от выбора типа пьезоэлектрического слоя.

На рис. 1 представлены дисперсионные зависимости фазовых скоростей фундаментальных и первых мод волн Рэлея и Лява от значения $h \times f$ (толщина ZnO \times частота) для слоистой структуры вида «Me/ZnO/Me/алмаз» с ориентацией [100](001) слоя и подложки. В качестве слоя металла (Me) использовались Al, Mo, Pt, обладающие различными значениями акустического импеданса $Z = \rho v$. Акустические импедансы используемых слоев соотносятся как $Z_{Al} < Z_{ZnO} < Z_{diamond} < Z_{Mo} < Z_{Pt}$. Значения материальных констант для Al и Mo взяты из [5], ZnO — из [9], алмаза — из [10]. Значения материальных констант платины взяты из работы [11] и преобразованы для поликристаллического варианта материала.

Расчет изменения фазовых скоростей мод упругой волны был произведен для относительных отношений толщин металлических слоев к толщине пьезоэлектрика при $d/h = 10^{-4}; 5 \times 10^{-4}; 10^{-3}; 5 \times 10^{-3}; 0.005; 0.01; 0.05; 0.1$. В абсолютных единицах данные значения фазовых скоростей можно получить при толщинах слоев пьезоэлектрика $h = 10$ мкм и металла $d = 1$ мкм в слоистой структуре «Me/ZnO/Me/алмаз» при изменении частоты от 1 МГц до 1 ГГц. Использование слоев металла в слоистой структуре может существенно влиять на перераспределение энергии упругой волны как вследствие акустических свойств слоев, так и сложной интерференции между модами упругой волны, падающими и отраженными от границы раздела слоев.

На рис. 2 представлены графики относительного изменения фазовых скоростей S_v фундаментальной моды R_0 и волны Сезава (мода R_1) в зависимости от вида металлического слоя, отношения d/h и параметра

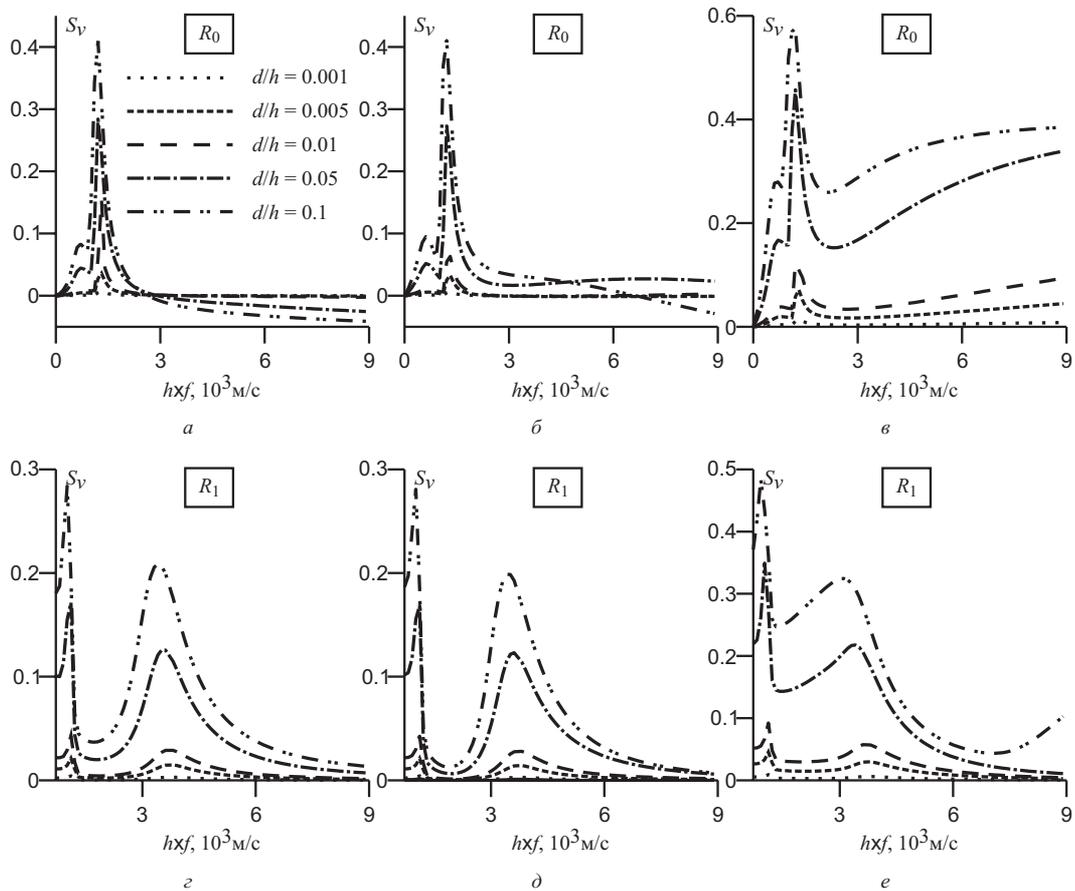


Рис. 2: Дисперсионные зависимости изменения фазовых скоростей моды R_0 и R_1 от произведения $h \times f$ для слоистой структуры «Me/ZnO/Me/алмаз»: а, г — алюминий, б, д — молибден, в, е — платина. Толщины металла d/h : $5 \cdot 10^{-3}$; 0.005; 0.01; 0.05; 0.1

$h \times f$. Максимальные значения параметра S_v достигаются при значении $h \times f = 1210$ м/с при использовании всех типов металлических слоев, что обусловлено взаимодействием (гибридизацией) между фундаментальной R_0 и первой R_1 рэлеевскими модами упругой волны [12]. Однако, значения параметра S_v при использовании слоя Al либо Mo практически одинаковы ($S_v = 0.41$), но параметр $S_v = 0.58$ для структуры «Pt/ZnO/Pt/алмаз» при $h \times f = 1210$ м/с и отношении $d/h = 0.1$. Необходимо отметить, что определенный вклад в изменение фазовой скорости упругой волны также вносит в области взаимодействия рэлеевских мод и условие «резонансного» отражения моды R_0 упругой волны от границы раздела слоистой структуры при $\lambda/2$ (λ — длина акустической волны), что приводит к появлению локальных максимумов в значениях S_v (рис. 2). Максимальные значения параметра S_v для волны Сезава (мода R_1) в области взаимодействия мод акустической волны для слоев Al либо Mo также практически одинаковы ($S_v = 0.28$), но параметр $S_v = 0.48$ для структуры «Pt/ZnO/Pt/алмаз» при $h \times f = 1110$ м/с и отношения $d/h = 0.1$. Максимум в значениях параметра S_v для моды R_1 достигается

в окрестности значений $h \times f = 3400$ м/с, где выполняется условие $h = \lambda$, т. е. длина упругой волны равна толщине пьезоэлектрического слоя (рис. 2).

Основной особенностью распространения фундаментальной рэлеевской моды упругой волны в слоистой структуре «Me/ZnO/Me/алмаз» является появления отрицательных значений параметра S_v при использовании металлических слоев Al либо Mo, т. е. значение фазовой скорости упругой волны начинает возрастать при нанесении металлического слоя (рис. 2). Для слоистой структуры «Al/ZnO/Al/алмаз» этот эффект наблюдается при всех рассмотренных толщинах металлического слоя, в прямой зависимости как от толщины слоя, так и от частоты ($h \times f$). Например, при отношении $d/h = 0.01$ отрицательные значения параметра S_v появляются при $h \times f \geq 3700$ м/с, но при отношении $d/h = 0.1$ от $h \times f \geq 2600$ м/с. Иная ситуация возникает в слоистой структуре «Mo/ZnO/Mo/алмаз». Незначительное увеличение фазовой скорости рэлеевской моды происходит при $d/h \leq 0.1$ и абсолютные значения параметра $S_v = 10^{-4} - 10^{-6}$. Однако, при толщине металлического слоя $d/h = 0.1$ и значении $h \times f = 6150$ м/с толщина слоя Mo становится равной

четверти длины упругой волны ($d = \lambda/4$), что приводит к резонансному отражению и увеличению значений параметра S_v в отрицательной области значений (рис. 2,в). Необходимо отметить, что в слоистой структуре «Pt/ZnO/Pt/алмаз» отрицательных значений параметра S_v не возникает в связи с высоким значением акустического импеданса для фундаментальной моды упругой волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был выполнен анализ влияния массовой нагрузки в виде двух металличе-

ских слоев (верхний и нижний электрод) на изменение фазовой скорости дисперсионных мод упругой волны в пьезоэлектрической слоистой структуре «Me/ZnO/Me/алмаз» в зависимости от частоты и отношения d/h . Изменение фазовой скорости упругой волны $\Delta v/v$ 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/ZnO/Pt/алмаз».

-
- [1] Гуляев Ю. В. УФН. 2005. **175**, № 8. С. 887.
 [2] Альшиц В. И., Любимов В. Н., Радович А. ФТТ. 1996. **38**, № 4. С. 1091.
 [3] Zhang H., Kim E. S. J. of Microelectromechanical Systems. 2005. **14**, N 4. P. 699.
 [4] Benetti M., Cannat D., Di Pietrantonio F., Foglietti V., Verona E. Appl. Phys. Lett. 2005. **87**, N 17. 173504.
 [5] Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyansky I. M. Proc. IEEE Ultras. Symp. 2001. P. 415.
 [6] Farnell G. W. Acoustic Surface Waves. Topics in Applied Physics. **24**. Springer. 1978.
 [7] Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Telichko A. V., Burkov S. I., Blank V. D. InTech. Piezoelectric Materials. 2016. P.161.
 [8] Wingqvist G., Yantchev V., Katardjiev I. Sensors and Actuators A: Physical. 2008. **148**, N 1. P. 88.
 [9] Zhang Z., Wen Z., Wang C. Ultrasonics. 2013. **53**, N 2. P. 363.
 [10] Sorokin B. P., Kvashnin G. M., Kuznetsov M. S., Telichko A. V., Burkov S. I. J. of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2013. **6**, № 1. С. 120.
 [11] Macfarlane R. E., Rayne J. A., Jones C. K. Phys. Lett. 1965. **18**, N 2. P. 91.
 [12] Kuznetsova I. E., Zaitsev B. D., Teplykh A. A., Borodina I. A. Acoust. Phys. 2007. **53**, N 1. P. 64.

The sensitivity of dispersion characteristics of acoustic waves in the layered structure «Me/ZnO/Me/diamond» from the thickness of metallic layers

S. I. Burkov^{1,a}, O. P. Zolotova^{2,b}, P. P. Turchin¹, I. M. Rychkov¹

¹Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian State University. Krasnoyarsk 660041, Russia

²Institute of Space Research and High Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Krasnoyarsk 66037, Russia

E-mail: ^asburkov@sfu-kras.ru, ^bzolotova@sibsau.ru

In the present work, a study of influence of mass loading of two metal layers (upper and lower electrode) on the changes in the phase velocity of the dispersive modes of elastic wave in a piezoelectric layered structure «Me/ZnO/Me/diamond» has been fulfilled. Dependences of this quantity from the $h \times f$ product (frequency×thickness of the piezoelectric) and the d/h ratio (metal thickness/piezoelectric thickness) are analyzed. The materials of the metallic layers are aluminum (Al), molybdenum (Mo), platinum (Pt).

PACS: 43.35.+d; 68.60.Bs; 68.65.Ac.

Keywords: piezoelectric multilayer structure, elastic wave, Rayleigh mode, SH-wave.

Received 03 July 2017.

Сведения об авторах

1. Бурков Сергей Иванович — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (391) 206-20-97, e-mail: sburkov@sfu-kras.ru.
2. Золотова Ольга Павловна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (391) 213-96-51, e-mail: zolotova@sibsau.ru.
3. Турчин Павел Петрович — канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой; тел.: (391) 206-20-97, e-mail: pturchin@sfu-kras.ru.
4. Рычков Илья Михайлович — аспирант; тел.: (391) 206-20-97, e-mail: rim89@inbox.ru.