

01;05;08;11;12

## Оптимизация параметров поверхностных акустических волн путем использования многослойных структур

© М.Ю. Двоешерстов, В.И. Чередник, А.П. Чириманов, С.Г. Петров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: Dvoesh@rf.unn.ru

(Поступило в Редакцию 4 февраля 2003 г.)

Рассмотрены методика и алгоритм численного анализа и оптимизации основных параметров электроакустических поверхностных волн, распространяющихся в многослойных пьезокристаллических структурах. Найдены конкретные сочетания материалов слоев и пьезокристаллических подложек, при которых распространяющаяся электроакустическая поверхностная волна имеет оптимальные рабочие параметры (малые дисперсионные искажения, высокий коэффициент электромеханической связи, высокую термостабильность, малые дифракционные потери и т.д.)

### Введение

Как известно [1], к основным параметрам электроакустических поверхностных волн (ЭАПВ) относятся: скорость волны ( $V$ ), коэффициент электромеханической связи ( $K^2$ ), угол сноса потока энергии ( $pfa$ ), параметр анизотропии ( $\beta$ ), температурный коэффициент задержки ( $tcd$ ), дисперсионные искажения скорости ( $\gamma$ ) в случае слоистых систем, потери вдоль направления распространения ( $\delta$ ) в случае использования псевдоповерхностных электроакустических волн [2] и т.д.

В случае использования ЭАПВ, распространяющихся в многослойных структурах, их параметры определяются как материальными свойствами пьезокристаллической подложки, так и свойствами каждого отдельно взятого слоя. Когда общая толщина слоев  $H$  сравнима или больше длины волны  $\lambda$ , то в этом случае структура ЭАПВ имеет достаточно сложный вид. Кроме этого, в такой системе появляются моды ЭАПВ более высших порядков. Когда общая толщина слоев  $H \ll \lambda$ , параметры и структура распространяющейся ЭАПВ в основном определяются свойствами полубесконечной пьезокристаллической подложки, а нанесенные на поверхность пьезоподложки слои лишь несколько изменяют параметры ЭАПВ. Тем не менее даже в этом случае ( $H \ll \lambda$ ) при использовании слоистых структур типа пленка–пьезоподложка можно существенно улучшить параметры волны [3,4]. Например, с помощью материала одного слоя определенной толщины, нанесенного на поверхность пьезокристаллической подложки, изначально не обладающей термостабильными свойствами для ЭАПВ, можно термокомпенсировать ЭАПВ при одновременном увеличении коэффициента электромеханической связи и т.д. В некоторых случаях при использовании псевдоповерхностных акустических волн (ППАВ) пленка определенной толщины может существенно уменьшить потери  $\delta$  вдоль направления распространения волны [5].

Однако в отличие от свободных пьезокристаллических подложек существенным недостатком слоистых

систем являются дисперсионные искажения скорости ЭАПВ, что является нежелательным эффектом. При нанесении на поверхность подложки даже одного слоя конечной толщины  $h$  скорость ЭАПВ начинает зависеть от частоты. Используя многослойные структуры, можно попытаться убрать этот недостаток. Объясним это на примере двух слоев, нанесенных на поверхность пьезокристаллической подложки. Если в отдельности один слой, нанесенный на поверхность пьезокристалла, увеличивает результирующую скорость волны, а другой слой, наоборот, уменьшает ее, то при нанесении на поверхность пьезокристалла одновременно двух таких различных слоев при определенной толщине каждого из них можно избавиться от дисперсии при одновременном улучшении термостабильных свойств волны и т.д.

Таким образом, подбирая различные сочетания материалов слоев и их толщины, нанесенных на какую-либо пьезокристаллическую подложку определенной ориентации, при помощи численного эксперимента можно попытаться решить задачу оптимизации параметров ЭАПВ, распространяющихся в многослойных структурах. В данной работе основное внимание уделено решению именно этой проблемы. Предлагается общая методика численного анализа и оптимизации параметров ЭАПВ путем использования многослойных пьезокристаллических структур.

### Постановка задачи

Как известно, для определения основных параметров ЭАПВ, распространяющихся в многослойных структурах, прежде всего необходимо решить одновременно систему уравнений пьезоакустики [6,7], описывающих распространение ЭАПВ в пьезокристаллической среде, а также систему уравнений движения, описывающих распространение волны в каждом отдельно взятом слое [7]. При произвольном количестве слоев, нанесенных на пьезокристаллическую подложку произвольной кристаллографической симметрии, параметры ЭАПВ можно

рассчитать только численными методами. При решении этих уравнений в качестве основы можно использовать методику Фарнелла–Джонса [7] либо методику Адлера [2]. Чтобы найти фазовую скорость ЭАПВ, а также все остальные параметры ЭАПВ, необходимо еще воспользоваться соответствующими механическими и электрическими граничными условиями на всех внутренних и внешних границах слоев и пьезоподложки. В случае многослойной системы на всех внутренних границах должны выполняться условия непрерывности трех компонент механических смещений  $u_j$ , трех нормальных компонент тензора механических напряжений  $T_{3j}$ , электрического потенциала  $\varphi$  и нормальной составляющей индукции электрического поля  $D_3$  в каждой среде [7]. Ясно, что с увеличением количества слоев, нанесенных на пьезокристаллическую подложку, увеличивается и количество механических и электрических граничных условий. Кроме того, в зависимости от материала слоя (металл, диэлектрик либо пьезослой) будут несколько изменяться и соответствующие электрические граничные условия.

В общем случае задача поиска фазовой скорости ЭАПВ, распространяющейся в многослойной системе, может быть решена путем использования каких-либо методов глобального поиска экстремума граничной функции цели  $\Phi_p$  [8], которая в случае методики Фарнелла–Джонса представляет собой значение определителя граничных условий [7] либо функцию эффективной диэлектрической проницаемости в случае методики Адлера [2]. При поиске решений для поверхностных акустических волн (ПАВ) глобальный экстремум граничной функции цели  $\Phi_p$  ищется при сканировании фазовой скорости волны  $V$ , которая является параметром при поиске решения. В случае поиска решений для псевдоповерхностных акустических волн (ППАВ) глобальный экстремум  $\Phi_p$  ищется при одновременном сканировании фазовой скорости волны  $V$  и потерь  $\delta$  вдоль направления распространения волны. При этом найденная величина результирующей фазовой скорости волны  $V$  зависит от материальных свойств каждого слоя и пьезоподложки, а также от ориентации кристалла и направления распространения волны, описывающихся обычно через три угла Эйлера ( $\phi$ ,  $\Theta$ ,  $\Psi$ ) [7]. Далее, можно также вычислить все остальные параметры волны (коэффициент электромеханической связи, угол сноса потока энергии, температурный коэффициент скорости (задержки), параметр анизотропии и т.д.) [6].

### Методика поиска оптимальных для ЭАПВ архитектур многослойных структур

Рассмотрим более подробно механизм уменьшения дисперсионных искажений ЭАПВ, распространяющихся в многослойных структурах. При наличии одного слоя на поверхности пьезоподложки в зависимости от

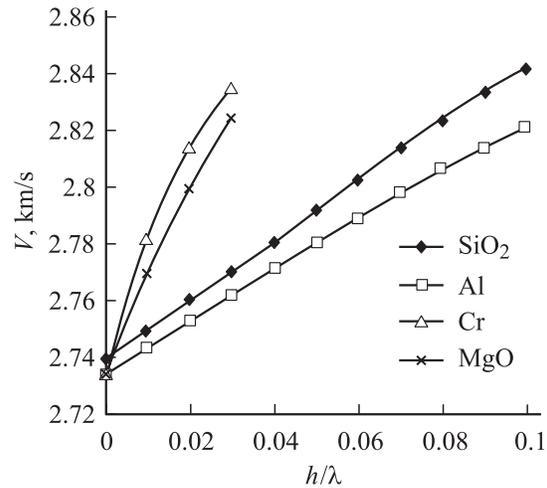


Рис. 1. Зависимости скорости ПАВ от  $h/\lambda$  в лангсита ориентации  $(0, 140, 24^\circ)$  при наличии изотропных пленок SiO<sub>2</sub>, Al, Cr, MgO.

толщины слоя результирующая скорость акустической волны меняется по сравнению с открытой поверхностью и зависит от частоты (длины волны  $\lambda$ ). В качестве примера на рис. 1, 2 показаны рассчитанные по выше описанным методикам фазовые скорости поверхностной акустической волны (ПАВ), распространяющейся в пьезокристалле лангсита (LGS) ориентации  $(0, 140, 24^\circ)$  при наличии на его поверхности различных изотропных пленок. Из рис. 1 видно, что пленки плавленого кварца (SiO<sub>2</sub>), алюминия, хрома, окиси магния увеличивают результирующую скорость ПАВ с увеличением величины  $h/\lambda$  (на рисунках толщина пленок  $h$  нормирована на длину волны  $\lambda$ ), а пленки никеля, золота, молибдена, свинца, платины, вольфрама, меди, наоборот, уменьшают ее. Материальные константы для этих материалов были взяты из [9,10].

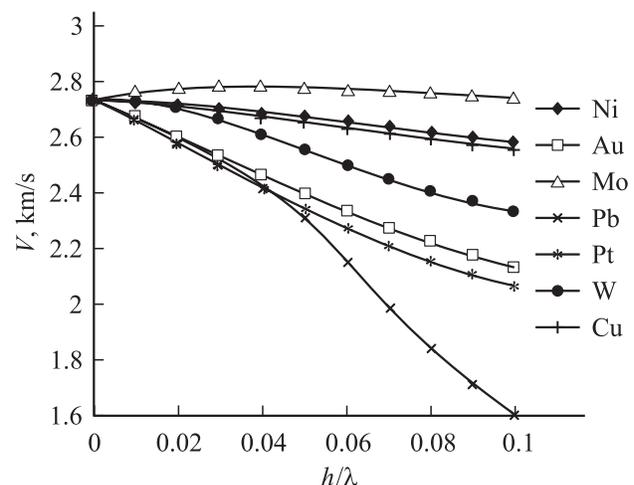


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для пленок Al, Au, Mo, Pb, Pt, W, Cu.

Если на поверхность пьезоподложки нанести одновременно две различных пленки с противоположным влиянием на фазовую скорость ЭАПВ, то при определенной толщине этих пленок можно „компенсировать“ результирующую скорость ЭАПВ, распространяющейся в такой слоистой системе. При этом дисперсионные искажения можно значительно уменьшить и скорость волны практически не будет зависеть от частоты (длины волны). Анализируя рис. 1, 2, можно увидеть, что зависимости фазовой скорости ЭАПВ от  $h/\lambda$  ( $h \ll \lambda$ ) в случае пленки из плавленого кварца (кривая SiO<sub>2</sub> на рис. 1) и пленки никеля (кривая Ni на рис. 2), нанесенных на пьезокристалл лангсита ориентации (0, 140, 24°), имеют противоположный характер и линейно изменяются по одному закону с ростом нормированной толщины вплоть до значений  $h/\lambda \approx 0.1$ . Поэтому при нанесении одновременно двух таких пленок на поверхность лангсита результирующая скорость ЭАПВ будет практически не иметь дисперсии.

Рассмотрим более подробно методику, позволяющую найти без дисперсионное решение для ЭАПВ, распространяющейся в многослойной системе. В большинстве случаев при малой толщине пленок ( $h_i \ll \lambda$ ) зависимость фазовой скорости волны от параметра  $h/\lambda$  имеет линейный характер (рис. 1, 2). Поэтому в первом приближении можно ввести коэффициент  $\gamma$ , характеризующий дисперсионные свойства слоистой системы. В этом случае относительное изменение фазовой скорости ЭАПВ можно записать в следующем виде:

$$\frac{(V_0 - V(h))}{V_0} = \gamma \frac{h}{\lambda} = \frac{\gamma}{V_0} \omega. \quad (1)$$

Здесь  $V_0$  — фазовая скорость волны в отсутствии слоя,  $V(h)$  — скорость волны в присутствии слоя,  $\omega$  — частота. В наиболее общем случае скорость ЭАПВ при увеличении толщины слоя может изменяться и не по линейному закону, поэтому коэффициент  $\gamma$  может быть разным при разной толщине одного и того же слоя. Значения коэффициента  $\gamma$  можно получить расчетным путем для каждого конкретного случая материалов слоя толщины  $h$  и пьезоподложки определенной ориентации.

На рис. 3, 4 показаны рассчитанные значения коэффициентов  $\gamma$  в случае пьезокристалла лангсита LGS ориентации (0, 140, 24°) при наличии на его поверхности пленок различного типа. Из этих рисунков видно, что в одних случаях коэффициент  $\gamma$  положителен (рис. 3), в других — отрицателен (рис. 4).

При наличии множества слоев, если выполняется условие

$$G = \sum_{i=1}^N \gamma_i h_i = 0, \quad (2)$$

где  $N$  — полное число слоев,  $\gamma_i$  — дисперсионный коэффициент для  $i$ -го слоя,  $h_i$  — нормированная толщина  $i$ -го слоя, то можно говорить об условии отсутствия дисперсии скорости ЭАПВ в многослойной структуре.

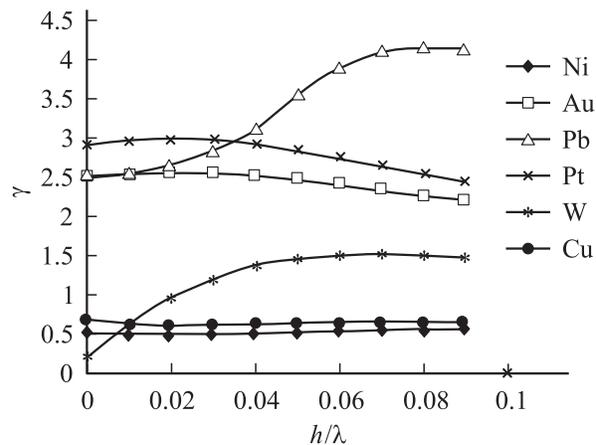


Рис. 3. Зависимости коэффициента  $\gamma$  от  $h/\lambda$  для ПАВ в лангсита ориентации (0, 140, 24°) при наличии изотропных пленок Ni, Au, Pb, Pt, W, Cu.

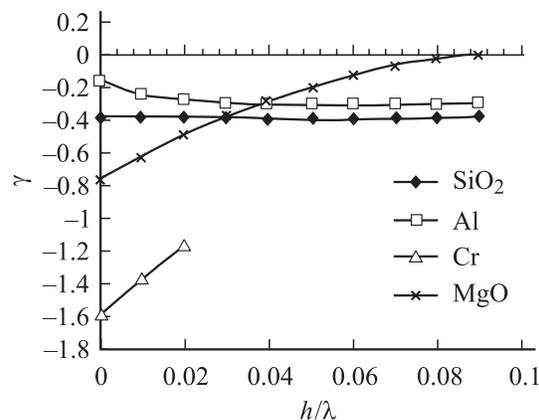


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для пленок SiO<sub>2</sub>, Al, Cr, Mo.

На рис. 5 показаны рассчитанные значения  $G = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)$  в системе SiO<sub>2</sub>/Ni/LGS (0, 140, 24°) при разных значениях  $h_1/\lambda$  и  $h_2/\lambda$  ( $h_1$  — толщина нижней пленки Ni,  $h_2$  — толщина верхней пленки SiO<sub>2</sub>) при распространении ПАВ. Из рис. 5 видно, что имеется целое семейство кривых, при которых отсутствует дисперсия скорости ПАВ. Например, если толщина пленки Ni равна  $h_1 = 0.04\lambda$ , то дисперсия скорости ( $G = 0$ ) ЭАПВ отсутствует при толщине пленки SiO<sub>2</sub>  $h_2 = 0.05\lambda$  (кривая  $h_2/\lambda = 0.05$  на рис. 5). При этом рассчитанные фазовые скорости ( $V$ , км/с) ПАВ в каждом отдельно взятом случае были: открытая поверхность LGS (0, 140, 24°) — 2.7345, однослойная система Ni ( $h_1/\lambda = 0.04$ )/LGS — 2.6844, однослойная система SiO<sub>2</sub> ( $h_2/\lambda = 0.05$ )/LGS — 2.7908, двухслойная система SiO<sub>2</sub>/Ni/LGS — 2.7305. При толщине слоя Ni, равной  $h_1 = 0.015\lambda$ , дисперсионные искажения скорости будут отсутствовать при толщине пленки SiO<sub>2</sub>, равной  $h_2 = 0.02\lambda$  (кривая  $h_2/\lambda = 0.02$  на рис. 5), и т.д.

Используя многослойные системы, можно также снизить до нуля дисперсионные искажения скорости при

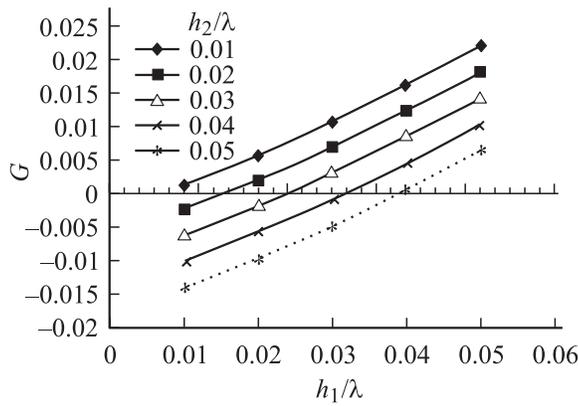


Рис. 5. Зависимость  $(\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot h_2)$  для ПАВ в системе:  $\text{SiO}_2/\text{Ni}/\text{LGS}$  ( $0, 140^\circ, 24^\circ$ ) от  $h_1/\lambda$  при различных  $h_2/\lambda$ .

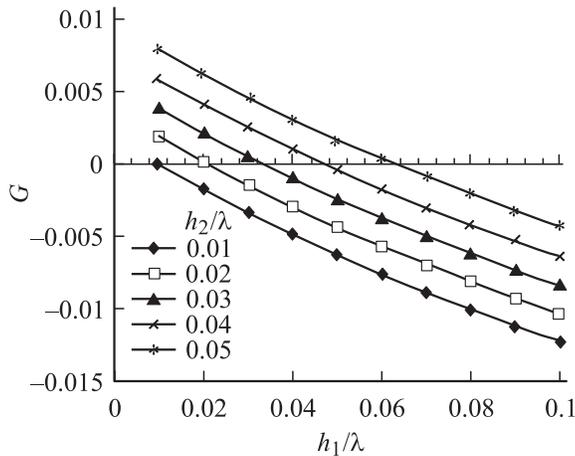


Рис. 6. То же, что на рис. 5 для ППАВ в системе:  $\text{Al}/\text{Cr}/\text{LiTaO}_3$  ( $0, -48^\circ, 0$ ).

распространении псевдоповерхностной акустической волны (ППАВ). На рис. 6 показаны рассчитанные значения  $G = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)$  в системе:  $\text{Al}/\text{Cr}/\text{танталат}$  лития  $\text{LiTaO}_3$  ориентации  $(0, -48^\circ, 0)$ . Из рисунка видно, что при определенных соотношениях толщины слоев алюминия и хрома также имеются условия, при которых ППАВ не будет иметь дисперсии скорости. Например, при толщине хрома  $h_1 = 0.03\lambda$  и алюминия  $h_2 = 0.04\lambda$  (кривая  $h_2/\lambda = 0.04$  на рис. 6) величина  $G = 0$ , и т.д. При этом рассчитанные параметры ППАВ в каждом отдельно взятом случае были: скорости ( $V, \text{km/s}$ ;  $\delta, \text{dB}/\lambda$ ) ППАВ: открытая (o) и металлизированная (S) поверхность  $\text{LiTaO}_3$  ( $0, -48^\circ, 0$ ) —  $V_S = 4.11485 \text{ km/s}$ ,  $\delta_S = 0.012 \text{ dB}/\lambda$ ,  $V_0 = 4.226 \text{ km/s}$ ,  $\delta_0 = 0.00075 \text{ dB}/\lambda$ ,  $K^2 = 5.6\%$ ,  $pfa = 0$ ,  $\beta = -2.7$ ,  $tcd = 63.2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , однослойная система  $\text{Cr}(h_1/\lambda = 0.03)/\text{LiTaO}_3$  —  $V_S = 4.1366 \text{ km/s}$ ,  $\delta_S = 0.04 \text{ dB}/\lambda$ , однослойная система  $\text{Al}(h_2/\lambda = 0.04)/\text{LiTaO}_3$  —  $V_S = 4.0829 \text{ km/s}$ ,  $\delta_S = 0.01 \text{ dB}/\lambda$ , двухслойная система  $\text{Al}/\text{Cr}/\text{LiTaO}_3$  —  $V_S = 4.1099 \text{ km/s}$ ,  $\delta_S = 0.04 \text{ dB}/\lambda$ ,  $pfa = 0$ ,  $\beta = -2.56$ ,  $tcd = 63.7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . Материальные константы для  $\text{LiTaO}_3$  были взяты из работы [11].

Таким образом, используя описанную выше методику и проведя численный эксперимент, можно заранее выбрать пьезоподложку определенной ориентации, подобрать материалы слоев и определить их толщины, при которых ЭАПВ практически не будет иметь дисперсионных искажений.

Необходимо также заметить, что при подборе слоев с точки зрения уменьшения дисперсионных искажений скорости ЭАПВ путем численного эксперимента можно также одновременно найти такие сочетания материалов слоев и их толщины, при которых одновременно можно оптимизировать также и другие параметры ЭАПВ. Для этого необходимо записать функцию цели ФЦ, которую можно представить в виде линейной комбинации параметров ЭАПВ с индивидуальными весовыми коэффициентами  $a_i$ , позволяющего варьировать вклад каждого слагаемого в ФЦ [12],

$$\Phi(\phi, \Theta, \Psi, h_i/\lambda, \gamma)$$

$$= \min \{ a_1 pfa + a_2 tcd + a_3 (\beta + 1) + a_4 G + \dots \}. \quad (3)$$

Применяя процедуру поиска глобального экстремума функции цели многих переменных ФЦ [12], при переборе параметров ФЦ ( $\phi, \Theta, \Psi, h_i/\lambda, \gamma$ ) с минимальным шагом в цикле можно путем численного эксперимента решить задачу оптимизации параметров ЭАПВ путем использования многослойных структур.

В результате такого поиска в настоящей работе была рассчитана многослойная структура:  $\text{Al}/\text{Ni}/\text{YX}$  — пьезокварц (ориентация  $(0, 90^\circ, 0)$ ), в которой распространяющаяся ПАВ термокомпенсирована ( $tcd \approx 0$ ) и не имеет практически дисперсионных искажений скорости ( $G \approx 0$ ). Заметим, что пленка Ni, нанесенная на поверхность пьезокварца YX-среза достаточно сильно снижает скорость ПАВ в такой системе (например, при  $h_1 = 0.05\lambda$  фазовая скорость  $V = 2.86 \text{ km/s}$ ) по сравнению со свободной поверхностью пьезокварца ( $V_0 = 3.16 \text{ km/s}$ ,  $V_S = 3.157 \text{ km/s}$ ,  $tcd = -22 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ). Пленка Al на пьезокварце YX-среза, наоборот, несколько увеличивает скорость ПАВ (при  $h_1 = 0.05\lambda$  фазовая скорость  $V = 3.1602 \text{ km/s}$ ). В рассчитанных двухслойных системах  $\text{Al}(h_2 = 0.05\lambda)/\text{Ni}(h_1 = 0.09\lambda)/\text{YX}$  — пьезокварц (фазовая скорость волны  $V = 2.706 \text{ km/s}$ ,  $tcd = 0.9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $G = 0$ ) и  $\text{Al}(h_2 = 0.05\lambda)/\text{Ni}(h_1 = 0.005\lambda)/\text{YX}$  — пьезокварц (фазовая скорость волны  $V = 3.13 \text{ km/s}$ ,  $tcd = -0.2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $G = 0.001$ ) распространяющаяся ПАВ одновременно не имеет дисперсионных искажений скорости и термокомпенсирована.

## Заключение

В работе предложена численная методика анализа и оптимизации основных параметров электроакустических поверхностных волн путем использования многослойных структур. На примере пьезоподложек танталата

лития, пьезокварца, а также нового перспективного пьезокристалла лангасита предложены конкретные сочетания пленок различного типа, позволяющих получить оптимальные рабочие характеристики распространяющихся в таких структурах электроакустических волн.

## Список литературы

- [1] *Schmidt R., Voltmer F.* // Proc. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1969. Vol. MTT-17. N 11. P. 920–926.
- [2] *Adler E.* // Proc. IEEE Trans. on EFTC. 1994. Vo. 41. N 6. P. 876–882.
- [3] *Raghavan R., Vetelino J., Jhunjunwala A.* // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1979. P. 606–611.
- [4] *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П.* и др. // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 485–488.
- [5] *Wallner P., Ruile W., Weigel R.* // Proc. IEEE Trans. on EFTC. 2000. Vol. 47. N 5. P. 1235–1240.
- [6] *Олинер А.* Поверхностные акустические волны. М.: Мир, 1981. 500 с.
- [7] *Мэттьюз Г.* Фильтры на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1981. 470 с.
- [8] *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 9. С. 801–813.
- [9] *Ballandras S., Gavignet E., Bigler E.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. N 12. P. 1625–1627.
- [10] *Pisarevsky Yu., Senushencov P., Popov P.* et al. // Proc. IEEE Inter. Freq. Contr. Symp. 1995. P. 653–656.
- [11] *Kovacs G., Anhorn M., Engan H.* et al. // Proc. 1990 Ultrason. Symp. 1990. P. 435–438.
- [12] *Двоешерстов М.Ю., Петров С.Г., Чередник В.И.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 8. С. 103–108.