

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.113

© 1990 г.

И. Я. Ашбель, М. Ю. Двоешерстов, С. Г. Петров

ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ДВУХСЛОЙНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СРЕДАХ С ИСКУССТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Обычно при использовании тонких пленок, наносимых на поверхность звукопровода для коррекции частотных или температурных характеристик устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), выбираются пары материалов (пленка, звукопровод), имеющие примерно равные коэффициенты линейного расширения α . В противном случае при нанесении тонкой пленки на поверхность звукопровода при температуре T_0 в полученной структуре при рабочей температуре T возникают внутренние термические напряжения.

В работах [1, 2] показано, что поверхностное натяжение в твердом теле изменяет параметры тонкого приповерхностного слоя, в результате чего изменяется скорость распространения ПАВ. В двухслойной системе с различными коэффициентами линейного расширения материалов возникновение внутренних термических напряжений, так же как в случаях, рассмотренных в работах [1, 2], приводит к изменению величины скорости ПАВ, что может быть использовано для коррекции частотных и температурных характеристик акустоэлектронных устройств.

В данной работе рассмотрены свойства ПАВ, распространяющихся в двухслойной структуре типа изотропная пленка – пьезокристалл при наличии внутренних термических напряжений. Рассмотрим двухслойную структуру, показанную на рис. 1. В направлении оси x_1 распространяется квазирэлеевская волна. Пусть тонкая пленка толщиной h нанесена на подложку при температуре T_0 . При рабочей температуре T вследствие различия коэффициентов линейного расширения материалов пленки и подложки в структуре возникают внутренние термические напряжения. При анизотропной в смысле линейного расширения подложке (например, LiNbO_3) аморфная или поликристаллическая пленка при рабочей температуре T становится также анизотропной (сжимается или растягивается в каком-либо направлении).

Воспользуемся анализом волновых уравнений, описывающих распространение ПАВ в двухслойной структуре с начальными внутренними напряжениями [3]

$$\rho^{(m)} \frac{\partial^2 u_i^{(m)}}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}^{(m)}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{jk}^{(m)} = \frac{\partial u_i^{(m)}}{\partial x_k} \right), \tag{1}$$

$$\text{rot rot } \mathbf{E}^{(m)} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}^{(m)}}{\partial t^2}.$$

Здесь ρ – плотность среды, u_i – смещение, x_j – координата, $T_{i,j}$ – тензор упругих напряжений, σ_{jk} – начальные напряжения. Индекс $m=1$ относится к слою, $m=2$ – к подложке, μ_0 – магнитная проницаемость, \mathbf{E} , \mathbf{D} – напряженность и индукция электрического поля. Индексы $i, j, k=1, 2, 3$. Как обычно, по повторяющимся индексам подразумевается суммирование.

Можно показать [4], что если толщина пленки h много меньше толщины подложки H , то возникающими напряжениями в подложке $\sigma_{jk}^{(2)}$ при температуре T можно пренебречь. Кроме того, поскольку толщина пленки много меньше ее размеров вдоль осей x_1 и x_2 , деформацию в пленке можно считать однородной по ее толщине, а напряжения $\sigma_{13}^{(1)}$, $\sigma_{23}^{(1)}$, $\sigma_{33}^{(1)}$ в пленке – малыми по сравнению с напряжениями

$\sigma_{11}^{(1)}$, $\sigma_{22}^{(1)}$, $\sigma_{12}^{(1)}$.

Для упрощения расчетов возьмем случай, когда сагиттальная плоскость x_1x_3 является плоскостью симметрии кристалла подложки (например, LiNbO_3 YZ-среза). При этом в системе будет распространяться волна квазирэлеевского типа (компоненты смещения u_1, u_3). Внутреннее термическое напряжение в пленке при двухосном терми-

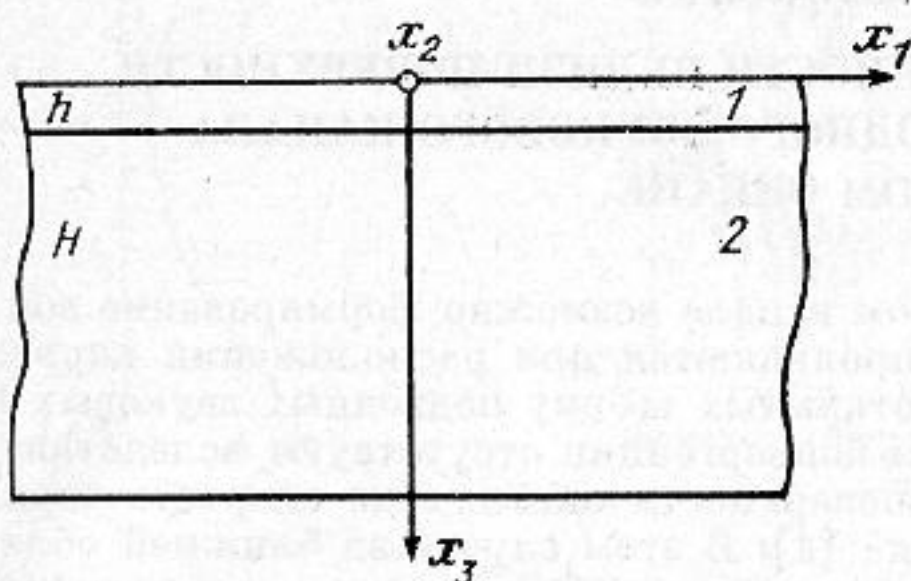


Рис. 1

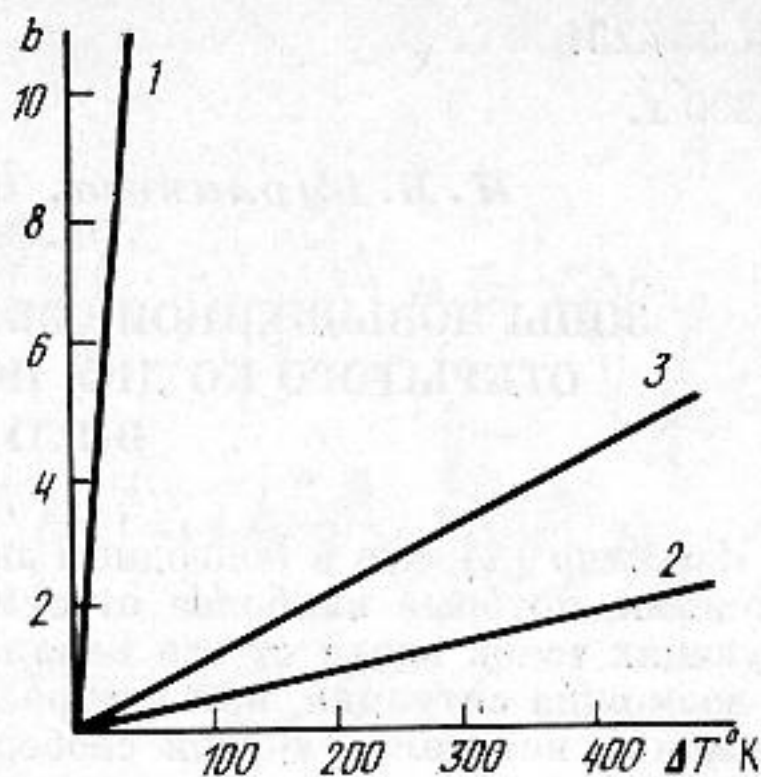


Рис. 2

Рис. 1. Система координат в слоистой структуре

Рис. 2. Относительное изменение скорости ПАВ $b = |\Delta v/v_0| \cdot 10^4$ в зависимости от ΔT для структур NaCl/LiNbO_3 : (1 — $h/l=0,15$) и MgO/LiNbO_3 : (2 — $h/l=0,01$, 3 — $h/l=0,015$)

ческом растяжении (сжатии), входящее в уравнение (1), будет [4]

$$\sigma_{11} = \frac{2\mu}{2\mu + \lambda} [2(\mu + \lambda)(\alpha_1 - \alpha_2) + \lambda(\alpha_1 - \alpha_2^1)] (T - T_0),$$

где α_1 — коэффициент линейного расширения материала пленки, α_2, α_2^1 — коэффициенты линейного расширения материала кристаллической подложки, λ, μ — коэффициенты Ламе материала пленки, которые также зависят от созданных в пленке термических деформаций (напряжений) (α_2 — в направлении x_1 , α_2^1 — в направлении x_2).

По методу работы [5] был произведен численный расчет скорости ПАВ, распространяющийся в двухслойной структуре при наличии внутренних напряжений. В качестве примера на рис. 2 приведено относительное изменение скорости ПАВ $\Delta v/v_0$ от величины $\Delta T = T - T_0$, пропорциональной σ_{11} для структур NaCl/LiNbO_3 и MgO/LiNbO_3 (v_0 — скорость ПАВ в структуре без напряжений). Пересчет констант упругости материалов пленки (класс 3m3) в изотропный случай проводился в соответствии с методикой, изложенной в [6]. При этом параметры пленок: NaCl — $\rho = 2,167 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 38,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\lambda = 0,15 \text{ дин/см}^2$, $\mu = 0,15 \text{ дин/см}^2$; MgO — $\rho = 3,576 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 13,45 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\lambda = 0,74 \text{ дин/см}^2$, $\mu = 1,32 \text{ дин/см}^2$. Параметры пьезокристаллической подложки были взяты из работы [7].

Анализ кривых на рис. 2 показывает, что чем больше разница коэффициентов линейного расширения материалов пленки и подложки (кривые 1; 2) или чем больше соотношение h/l (кривая 3), тем более сильная зависимость $\Delta v/v_0$ от σ_{11} (l — длина акустической волны).

Также были рассчитаны температурные коэффициенты скорости TKV ПАВ в таких структурах. При этом в программу расчета была введена зависимость всех параметров от температуры. Температурные константы упругости и плотности были взяты из [7]. Результаты расчетов показали, что TKV ПАВ в слоистой напряженной структуре увеличивается или уменьшается в зависимости от знака деформации (сжатие, растяжение) по сравнению со структурой в отсутствие внутренних напряжений. Так например, в случае NaCl/LiNbO_3 при $h/l=0,4$, $\Delta T=100 \text{ К}$, $TKV = -99,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ($TKV = -101,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ при $\Delta T=0$). Изменение величины TKV за счет термических напряжений может быть использовано для целей термокомпенсации акустопроводов с малыми значениями температурного коэффициента задержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников В. А., Крылов В. В. К теории гиперзвуковых поверхностных волн в твердых телах // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 5. С. 732–734.
2. Косевич Ю. А., Сыркин Е. С. Критерий существования и свойства глубоко проникающих волн Рэля в кристаллах // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. № 6(12). С. 2221–2229.
3. Nalawatwar A. L., Epstein M. Surface acoustic waves in strained media // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. P. 43–48.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости, 4-е изд. испр. и доп. М.: Наука, 1987. С. 69.
5. Фильтры на поверхностных акустических волнах/Под ред. Мэтьюза Г. М.: Радио и связь, 1981. С. 37.
6. Peresada G. I. On the calculation of elastic moduli of polycrystalline systems from single crystal data // Phys. Stat. Sol. 1971. V. 4. P. 23–27.
7. Акустические кристаллы. Справочник/Под ред. Шаскольской М. П. М.: Наука, 1982. С. 452.