

ОБ АНОМАЛИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН
В ПЛАСТИНАХ ВБЛИЗИ СЕГНЕТОЭЛАСТИЧЕСКОГО
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Косевич Ю. А., Сыркин Е. С.

Характерной особенностью тонких пленок является наличие в них дисперсионных поперечных волн (волн изгиба) [1], скорость которых заметно меньше скорости поперечных волн такой же поляризации, распространяющихся в том же направлении в безграничном кристалле. Скорость же продольных волн в тонких пленках, как правило, лишь незначительно меньше скорости продольных волн в безграничном кристалле (в том же направлении). Однако могут реализоваться ситуации, когда и между этими скоростями возникает существенное различие. Как показано в настоящей работе, заметное уменьшение скорости продольных упругих волн может происходить в тонких пластинах кристаллов вблизи собственного сегнетоэластического фазового перехода, который характеризуется смягчением одного из модулей упругости или их комбинации. В работе также рассчитано влияние капиллярных эффектов (поверхностное натяжение $g_{\alpha\beta}$, избыточные поверхностные модули h_{ik} и т. д.) на характеристики длинноволновых волн Лэмба в тонкой пластине вблизи такого перехода. Усиление влияния капиллярных эффектов на основные характеристики высокочастотных волн Рэлея в полубесконечном кристалле (спектр, поляризация, глубина проникновения) вблизи фазового перехода отмечалось в работе [4].

Вблизи собственного сегнетоэластического фазового перехода в кубическом (или одноосном тетрагональном) кристалле смягчается одна из поперечных скоростей звука $V_{T1} = (C_{44}/\rho)^{1/2}$, $V_{T2} = ((C_{11} - C_{12})/2\rho)^{1/2}$. Смягчение моды V_{T1} происходит вблизи точки Кюри в сегнетоэластиках-сегнетоэлектриках типа *KDP*, сегнетовой соли и т. д. Смягчение моды V_{T2} происходит в соединениях типа А-15 вблизи структурного фазового перехода (Nb_3Sn , V_3Si и др.)

Рассмотрим низкочастотные (изгибную и продольную) волны Лэмба, распространяющиеся вдоль направления [100] в пластине кубического (или тетрагонального) кристалла, срединная плоскость которой совпадает с плоскостью (010). Используя объемные уравнения движения и граничные условия с учетом капиллярных эффектов [2, 3], получаем следующие законы дисперсии для длинноволновых ($kd \ll 1$) симметричной (продольной) $\omega_s(k)$ и антисимметричной (поперечной) $\omega_a(k)$ мод:

$$\omega_s^2 \left(1 + \frac{2\rho_s}{\rho d} \right) = \frac{k^2}{\rho} \left[C_{11} - \frac{C_{12}^2}{C_{11}} + \frac{2(g+h)}{d} \right], \quad (1)$$

$$\omega_a^2 \left(1 + \frac{2\rho_s}{\rho d} \right) = \frac{k^2}{\rho} \left[\frac{k^2 d^2}{12} \left(C_{11} - \frac{C_{12}^2}{C_{11}} \right) + \frac{2g}{d} \right], \quad (2)$$

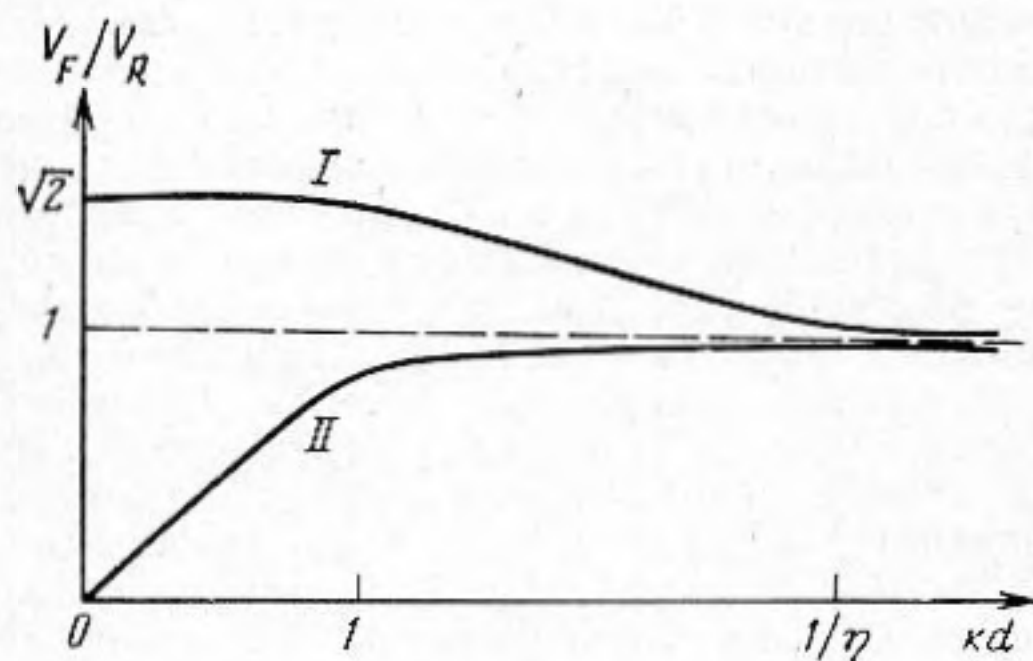
где d — толщина пластины, ρ — плотность кристалла, ρ_s — избыточная поверхностная плотность (на единицу площади), $g = g_{xxx}$, $h = h_{111}$, коэффициент 2 при капиллярных параметрах учитывает наличие у пленки двух границ. Как видно из (1), в рассматриваемой геометрии продольная скорость в пластине пропорциональна V_{T2} . Поэтому вблизи собственного сегнетоэластического фазового перехода, связанного со смягчением $C_{11} - C_{12}$, скорость продольной волны в пластине становится существенно меньше как продольной $V_L = (C_{11}/\rho)^{1/2}$, так и поперечной V_{T1} скоростей волн, распространяющихся в массивном кристалле в том же направлении. Поскольку капиллярные параметры g и h практически не зависят от близости к точке объемного фазового перехода, то, как видно из (1) и (2), их влияние на фазовые скорости симметричной и антисимметричной длинноволновых мод в этих условиях возрастает. При этом для достаточно тонких пленок в непосредственной близости к фазовому переходу законы дисперсии обеих мод могут приобрести звуковой характер со скоростями, определяемыми исключительно капиллярными параметрами g и h .

На фигуре приведены дисперсионные кривые для нулевых гармоник волн Лэмба в пластине вблизи сегнетоэластического фазового перехода со смягчением моды V_{T2} при произвольных значениях параметра kd : I — соответствует симметричной моде; II — антисимметричной. На этой фигуре фазовые скорости V_F отнормированы на скорость V_R рэлеевской волны в полубесконечном кристалле ($kd \gg 1$). Отметим, что вблизи фазового перехода скорость длинноволновой продольной волны в пленке в $\sqrt{2}$ раз больше (без учета капиллярных эффектов) скорости рэлеевской волны, выход на которую происходит при $kd \sim 1/\eta$, где $\eta = (V_{T2}/V_{T1})^2 \ll 1$ — параметр упругой анизотропии кристалла. Поперечная (изгибная) мода в пластине имеет квадратичный закон дисперсии в области $kd \ll 1$, а в интервале длин волн $1 \ll kd \ll 1/\eta$ приобретает звуковой характер, ее скорость близка к $V_R \approx \sqrt{2}V_{T2}$ и заметно уменьшается по мере приближения к точке фазового перехода.

Наличие аналогичного интервала длин волн, в котором изгибная волна имеет звуковой характер и является медленной, отмечалось в работе [5] при исследовании волн Лэмба в пластине (рассматриваемой ориентации) сильно анизотропного кристалла с малым модулем C_{44} (параметр анизотропии $\eta \gg 1$). В таких кристаллах ($C_{44} \rightarrow 0$)

смягчение продольных упругих волн происходит в пластине другой ориентации — срединная плоскость должна совпадать с плоскостью (110) при распространении волны вдоль [110]. В такой геометрии законы дисперсии длинноволновых ($kd \ll 1$) симметричной и антисимметричной мод будут иметь вид

$$\omega_s^2 \left(1 + \frac{2\rho s'}{\rho d} \right) = \frac{k^2}{\rho} \left[\frac{4C_{44}(C_{11}+C_{12})}{(C_{11}+C_{12}+2C_{44})} + \frac{2(g'+h')}{d} \right], \quad (3)$$



$$\omega_a^2 \left(1 + \frac{2\rho s'}{\rho d} \right) = \frac{k^2}{\rho} \left[\frac{k^2 d^2}{3} \cdot \frac{C_{44}(C_{11}+C_{12})}{(C_{11}+C_{12}+2C_{44})} + \frac{2g'}{d} \right]. \quad (4)$$

Штрихи отмечают значения соответствующих капиллярных параметров на грани (110). При произвольных значениях kd вблизи сегнетоэласти-

ческого фазового перехода со смягчением моды V_{T1} дисперсионные зависимости для безразмерных фазовых скоростей волн Лэмба в пластине рассматриваемой геометрии имеют вид, аналогичный приведенному на фигуре с точностью до замены η на $1/\eta$.

Отметим, что вывод об аномалии распространения продольных упругих волн вблизи собственного сегнетоэластического фазового перехода справедлив и для тонких стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 202 с.
2. Красильников В. А., Крылов В. В. К теории гиперзвуковых поверхностных волн в твердых телах // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 5. С. 732–734.
3. Андреев А. Ф., Косевич Ю. А. Капиллярные явления в теории упругости // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. Вып. 4(10). С. 1435–1443.
4. Косевич Ю. А., Сыркин Е. С. Критерий существования и свойства глубоко проникающих волн Рэля в кристаллах // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. Вып. 6(12). С. 2221–2229.
5. Косевич Ю. А., Сыркин Е. С. Упругие волны в пластинах сильно анизотропных кристаллов // Акуст. журн. 1985. Т. 31. Вып. 5. С. 610–614.

Всесоюзный научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума

Поступило в редакцию 25.VI.1986.

УДК 551.463

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ОТКАЗОВ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Мендус В. И., Постнов Г. А.

При расчете антенны с длительным сроком службы приходится учитывать возможность выхода из строя части элементов антенны. В литературе неоднократно исследовалось влияние отказа элементов антенны на диаграмму направленности последней. Применительно к гидроакустическим антеннам это сделано в работе [1]. Общий анализ эффективности сложных систем с учетом возможности отказов элементов проведен в работе [2]. В ней предлагается с целью упрощения задачи по отдельности анализировать внешнюю эффективность, определяемую помехоустойчивостью, и внутреннюю, определяемую надежностью. Однако если помехоустойчивость существенно зависит от параметров, описывающих надежность элементов системы, то такое разделение провести не удастся. Так, в рассматриваемой здесь задаче об обнаружении сигналов на фоне шумов океана с использованием многоэлементной антенны помехоустойчивость существенно зависит от числа и положений вышедших из строя элементов антенны. Поэтому в данном случае целесообразно использовать модель, в которой эффективность системы для всех возможных ситуаций может