

УДК 548.0 : 539.37

© 1992 г. НАУМЕНКО Н. Ф.

ОТТЕКАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ С КВАЗИПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В КРИСТАЛЛЕ ТЕТРАБОРАТА ЛИТИЯ

С помощью численных методов расчета установлено, что обнаруженные ранее в $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ квазиобъемные поверхности акустические волны (ПАВ) являются оттекающими. Рассчитаны их основные характеристики: скорости и коэффициенты затухания на свободной и металлизированной поверхности, коэффициенты электромеханической связи, температурные коэффициенты задержки. Найдены ориентации с минимальным затуханием амплитуды на свободной и металлизированной поверхности. Подтверждено преимущественно продольный характер поляризации. Обнаружена термостабильная ориентация.

Тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ — сравнительно новый пьезоэлектрический материал, сразу же привлекший к себе внимание разработчиков акустоэлектронных устройств на поверхностных и объемных акустических волнах благодаря удачному сочетанию термостабильности характеристик акустических волн и возможности их эффективного пьезоэлектрического возбуждения [1, 2]. Другая важнейшая особенность этого кристалла — ярко выраженная анизотропия упругих свойств, следствием которой, в частности, является существование в нем множества ориентаций, в которых могут распространяться не только обычные ПАВ, но и псевдоповерхностные (оттекающие) волны с большей скоростью. Среди них обнаружены и термостабильные [3].

Исследование акустической анизотропии кристалла, включающее поиск линий особых волн [4, 5], показало наличие в $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ таких плоскостей и направлений в них, вдоль которых могут распространяться, практически не затухая, квазиобъемные волны с продольной поляризацией [6]. Скорость таких волн не только выше скорости ПАВ, но и значительно превышает скорости обеих квазипоперечных приповерхностных объемных акустических волн (ППОАВ) для заданной ориентации и составляет более 7000 м/с. В [6] для исследования этих волн использовалась функция эффективной диэлектрической проницаемости. Анализ особенностей функции для найденных ориентаций тетрабората лития подтвердил наличие в них слабозатухающих квазиобъемных волн, распространяющихся с различной скоростью вдоль свободной (неметаллизированной) и металлизированной поверхности кристалла. Однако вопрос о структуре и характере затухания волн остался открытым. Цель настоящей работы — дальнейшее исследование этих волн с помощью известных численных методов решения граничной задачи.

Известно, что распространяющаяся вдоль оси x в плоскости $z=0$ акустическая волна со скоростью, превышающей предельную скорость для ПАВ [4], в некоторых случаях может быть точным решением граничной задачи, если ее волновое число k комплексно:

$$k = k_0(1+j\delta). \quad (1)$$

Подставляя неоднородную плоскую волну

$$u = u_0 \exp[j(kx - \omega t)] \exp(jk\alpha z) \quad (2)$$

с волновым числом (1) в уравнение движения и пьезоэлектрического состояния кристалла, можно найти такие значения k_0 и δ , при которых соответствующая линейная комбинация парциальных волн удовлетворяет механическим и электрическим граничным условиям на поверхности пьезоэлектрического кристалла. Такие псевдоповерхностные волны получили также название оттекающих, так как общее решение граничной задачи включает как неоднородные парциальные волны с комплексным коэффициентом затухания амплитуды по глубине α , так и однородные с действительным α . Последние уносят энергию волны с поверхности в глубь кристалла, и вследствие «оттекания» энергии происходит затухание амплитуды волны по мере ее распространения. Коэффициент затухания B обычно измеряется в децибеллах на длину волны λ (dB/λ) и связан с коэффициентом δ соотношением

$$\lg B \approx \lg \delta + 1,73.$$

На рис. 1 изображено сечение поверхности рефракции кристалла $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}$, плоскостью (110). Эта плоскость является сагиттальной для всех ориентаций, определяемых углами Эйлера $(45, \theta, 90^\circ)$. На рис. 1 приведено положение осей x и z , параллельных соответственно направлению распространения и нормали к поверхности кристалла для ориентации $(45, 41, 90^\circ)$. Для квазипродольной волны с волновым вектором \mathbf{k}_0 поток энергии параллелен поверхности. Очевидно, что квазиобъемное решение задачи со скоростью, близкой к $v_0 = \omega/k_0$, где ω — циклическая частота, кроме квазипродольной, должно включать еще две однородные парциальные волны с волновыми векторами \mathbf{k}_1^+ и \mathbf{k}_2^+ . Для ориентации $(45, 41, -90^\circ)$ это \mathbf{k}_1^- и \mathbf{k}_2^- . На рисунке эти два вектора практически совпадают. Однако вследствие симметрии плоскости (110) быстрая поперечная волна с волновым вектором \mathbf{k}_2^\pm поляризована вдоль нормали к сагиттальной плоскости и является самостоятельным решением. Псевдоповерхностная трехпарциальная волна со скоростью, близкой к v_0 , состоит из двух неоднородных парциальных волн и одной однородной — медленной квазипоперечной ОАВ, поляризованной в плоскости (110) и уносящей энергию с поверхности в глубь кристалла.

На рис. 2 приведены зависимости от угла θ скоростей всех ППОАВ, имеющих векторы потока энергии, параллельные поверхности, для ориентаций $(45, \theta, 90^\circ)$. Появление «лишних» ППОАВ при $\theta = 0 - 16^\circ$ и $57 - 90^\circ$ связано с отрицательной кривизной внешней полости поверхности рефракции в окрестности направлений [001] и [110]. При решении граничной задачи в заштрихованных интервалах появляется дополнительная однородная парциальная волна с поляризацией в сагиттальной плоскости. На рис. 2 приведены также зависимости от угла θ скоростей ПАВ и оттекающих волн. Последние обнаружены в интервале $\theta = 35 - 67^\circ$ (рис. 3). Для всех указанных ориентаций оттекающая волна имеет несколько меньшую скорость, чем квазипродольная ППОАВ. На металлизированной поверхности минимальное затухание ($B = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ dB}/\lambda$) должно наблюдаться для угла $\theta = 46,5^\circ$, а на свободной поверхности коэффициент B не превышает $10^{-4} \text{ dB}/\lambda$ в интервале углов $\theta = 40 - 46^\circ$. Несмотря на различие векторов \mathbf{k}_1^+ и \mathbf{k}_1^- , для ориентаций $(45, \theta, 90^\circ)$ и $(45, \theta, -90^\circ)$ скорости и коэффициенты B одинаковы.

На рис. 3 приведены рассчитанные с помощью соотношений [7]

$$k_v^2 = 2/v_0(v_0 - v_m), \quad (3)$$

$$k_e^2 = -2\varepsilon_s(\infty) [s_0 \partial \varepsilon_s / \partial s]_{s=s_0}^{-1} \quad (4)$$

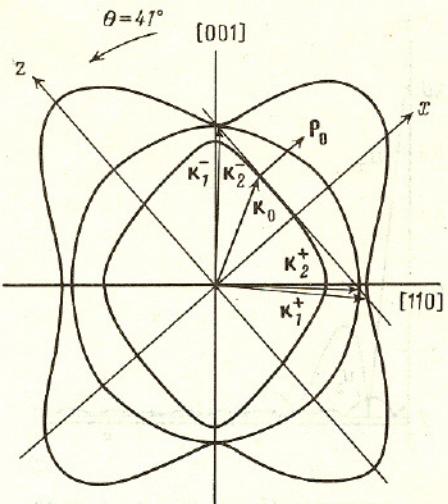


Рис. 1

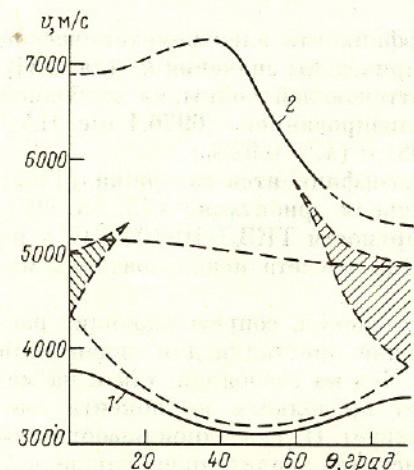


Рис. 2

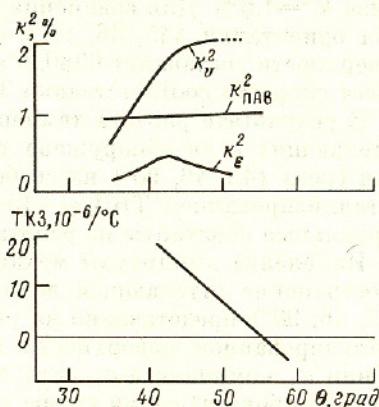
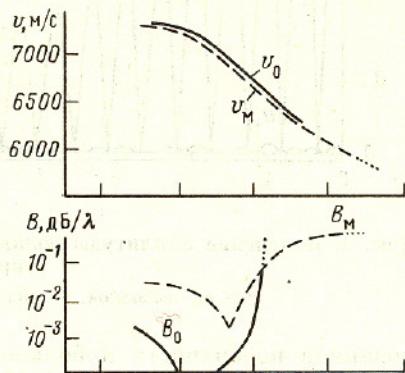


Рис. 3

Рис. 1. Сечение поверхности рефракции тетрабората лития плоскостью (110)

Рис. 2. Скорости поверхностных (сплошная линия 1), оттекающих (сплошная линия 2) и приповерхностных объемных акустических волн (штриховая линия) для ориентации $(45, \theta, 90^\circ)$ тетрабората лития

Рис. 3. Зависимость характеристик оттекающих волн от угла θ для ориентаций $(45, \theta, 90^\circ)$ тетрабората лития

зависимости для коэффициентов электромеханической связи оттекающих волн. Здесь $\epsilon_s(s)$ — функция эффективной диэлектрической проницаемости, s — обратная скорость волны, $v_0 = 1/s_0$ и v_M — соответственно скорости на свободной и металлизированной поверхности. Разница в значениях k^2 , полученных с помощью соотношений (3) и (4), объясняется большим вкладом квазипродольной ППОАВ в функцию эффективной диэлектрической проницаемости и обусловлена малым различием в скоростях ППОАВ и оттекающей волны. Можно выделить ориентацию $(45, 46, 90^\circ)$ благодаря сочетанию слабого затухания оттекающей волны на свободной и металли-

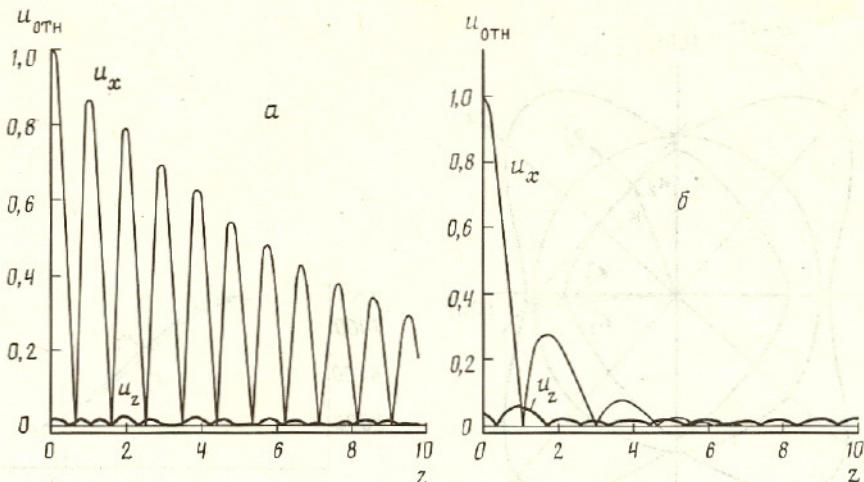


Рис. 4. Изменение амплитуды волны для ориентации (45, 46, 90°) по глубине кристалла
а — на свободной, б — на металлизированной поверхности

зированной поверхности и большого коэффициента электромеханической связи $k_v^2 = 1,6\%$. Для сравнения на рис. 3 приведены значения k^2 для ПАВ. Для ориентации (45, 46, 90°) скорость оттекающей волны на свободной поверхности составляет 6980,2, а на металлизированной — 6926,1 м/с. ПАВ имеет скорости соответственно 3095,3 и 3081,0 ($k_v^2 = 0,92\%$).

В результате расчета температурных коэффициентов задержки (ТКЗ) оттекающих волн обнаружена термостабильная ориентация (45, 55, 90°). Для среза (45, 46, 90°) на свободной поверхности ТКЗ₀ = $10 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, а на металлизированной ТКЗ_м = $-15 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Для расчета использовались материальные константы из работы [2].

Изменение амплитуды механических смещений, сопровождающих распространение оттекающей волны, по глубине кристалла для ориентации (45, 46, 90°) представлено на рис. 4, а, б. Как на свободной, так и на металлизированной поверхности преобладает продольная компонента смещений u_x , компонента u_z мала, а u_y отсутствует. На свободной поверхности глубина проникновения волны в объем кристалла значительно больше, чем на металлизированной, где вся энергия волны сосредоточена в приповерхностном слое толщиной 4–5λ.

Таким образом, найденные в тетраборате лития оттекающие волны с квазипродольной поляризацией соединяют в себе высокую скорость распространения, большую пьезоактивность и термостабильность, превосходя по совокупности параметров известные ориентации кварца, ниобата лития и tantalата лития.

Список литературы

1. Shorrocks N. H., Whatmore R. W., Ainger F. W., Young I. M. // Proc. IEEE Ultrason. Symp. Chicago, 1981. P. 337.
2. Shiosaki T., Adachi M., Kawabata A. // Proc. 6th IEEE Internat. Symp. Appl. Ferroelectrics. Bethlehem, 1986. P. 455.
3. Murota M., Shimizu Y. // Proc. IEEE Ultrason. Symp. Montreal, 1989. P. 291.
4. Альшиц В. И., Логе Е. // Кристаллография. 1979. Т. 24. С. 4122.
5. Альшиц В. И., Любимов В. Н., Науменко Н. Ф. и др. // Кристаллография. 1985. Т. 30. С. 213.
6. Науменко Н. Ф. // Кристаллография. 1992. Т. 37. С. 427.
7. Милсон Р., Рэйли Н., Рэдбруд М. // Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение / Под ред. Г. Мэттьюза. М., 1981. С. 54.

Московский институт
стали и сплавов

Поступила в редакцию
09.03.1992