

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ ИЗ LiNbO_3

А. А. Адхамов, А. Н. Шкляр, В. С. Бондаренко, Л. М. Слуцкий,
В. С. Орлов

Методом рентгеновской съемки «на отражение» визуализирована поверхностная акустическая волна (ПАВ), распространяющаяся по подложке из ниобата лития. Микрофотометрированием рентгенограмм получены поперечные и продольные профили пучка ПАВ. Проведен качественный анализ амплитуд пучка ПАВ в зависимости от величины амплитуды сигнала. Обнаружено неравномерное возрастание амплитуд ПАВ на выходном преобразователе при прохождении по образцу ПАВ большой интенсивности.

Необходимость изучения ПАВ, распространяющихся в анизотропных пьезоэлектрических кристаллах, вызывается постоянным повышением требований к параметрам акустоэлектронных устройств: линий задержки, фильтров (полосовых, оптимальных, сжатия), корреляторов и т. д. При этом наибольший интерес представляют попытки экспериментального наблюдения дифракции ПАВ. В основном такие исследования связаны с использованием лазерного [1, 2] и электрического [3] зондов. Электрическое зондирование позволяет измерять локальные электрические поля, связанные с волной, и, таким образом, получать амплитуды электрического потенциала поверхностной волны.

Целью настоящей работы явилось исследование с помощью методов рентгеновской топографии дифракционных эффектов пучка ПАВ, распространяющихся с различной амплитудой по кристаллической подложке из LiNbO_3 . Методы рентгеновской топографии были успешно применены при исследовании объемных волн [4-7]; область распространения ПАВ (при использовании съемки «на отражение») выделяется на рентгенограмме кристалла, образуя зону повышенного контраста; этот эффект, связанный с уменьшением экстинкции при наличии искажений в кристаллической решетке, может быть количественно оценен в рамках динамической теории рассеяния рентгеновских лучей [8-10].

По Като [9], интенсивность рентгеновских лучей, рассеянных решеткой кристалла, искажение которой задано вектором смещения \mathbf{u} , равна

$$J = C_1 [(A + 4)^{1/2} E(k) - 2(A + 4)^{-1/2} K(k)], \quad (1)$$

где $k = \left(\frac{A}{A + 4}\right)^{1/2}$, $A = C_2 f^2$, $K(k)$, $E(k)$ — комплексные эллиптические функции 1-го и 2-го порядков соответственно; C_1 и C_2 — константы, связанные с данным типом деформации в кристалле; f — функция Като.

Для деформаций типа «чистый изгиб» или «чистое изменение межплоскостного расстояния» функцию f можно, как было показано в [10], представить в виде

$$f = \frac{2\pi}{\sin 2\theta_B} [u_{1,22} \cos^2 \theta_B - u_{1,11} \sin^2 \theta_B] (gu), \quad (2)$$

где g — вектор дифракции, $u=(u_1, 0, 0)$ — вектор смещения, Θ_B — угол Брэгга, $u_{1,22}$ и $u_{1,11}$ — градиенты деформации типов «чистый изгиб» и чистое изменение межплоскостного расстояния соответственно.

Для колебаний сдвига по контуру кварцевой пластинки ДТ-среза было найдено, что [4]

$$\left. \begin{aligned} J &\cong C_1 \left(\frac{\pi}{2}\right) \left[1 + \frac{3}{16} f^2\right] \text{ для малых смещений,} \\ J &\cong C_1 \left(\frac{\pi}{2}\right) f \text{ для больших } f, u. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Если изображение кристалла фиксируется на рентгеновской пленке, то аналогичные соотношения можно записать для плотностей почернения пленки (при $D \leq 1$, $D \sim J$ [11])

$$\left. \begin{aligned} D &\propto f^2 \text{ при малых } f, u, \\ D &\propto f \text{ при больших } f, u. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, механические смещения, возбуждаемые в решетке кристалла при прохождении пучка ПАВ, можно характеризовать плотностью почернения рентгенотопограммы кристалла. Необходимо отметить, что величина механических смещений в пучке ПАВ однозначно не определяется степенью почернения рентгеновской топограммы кристалла и связь эта с учетом некоторых приближений [4] носит сложный характер. Надежно установлено, однако [4, 5], что интенсивность монотонно возрастает с увеличением искажения решетки.

При возбуждении ПАВ в кристалле возникают смещения, соответствующие основной и побочным модам, их гармоникам, а также отраженной ПАВ; в результате интегральная интенсивность J отражает сложное деформированное состояние поверхности кристалла.

Методика эксперимента и экспериментальные результаты

Исследование поверхностных волн рентгенотопографическим методом возможно при условии использования съемки на отражение («по Брэггу»). Используя острофокусный источник, Шульц [12] изучал дефекты поверхности монокристаллов. В описываемом эксперименте для исследования ПАВ была применена схема съемки по Шульцу. Источником полихроматического излучения служила острофокусная (размер фокусного пятна — 40×40 мкм) рентгеновская трубка БСМ-1 (Мо), съемка производилась на аппарате «УРС-0.02» ($V_a=35$ кВ, $i_a=0.35$ мА). Поверхностная акустическая волна возбуждалась в широкополосном фильтре со средней частотой 35 МГц, конструктивно выполненном на подложке YZ-среза ниобата лития. Структурная схема исследований ПАВ в кристалле рентгенотопографическим методом дана на рис. 1.

В описываемом эксперименте (изображение фиксировалось на плоской пленке) наблюдается деформирование изображения на рентгенотопограмме [13]: отношение ширины к длине образца на рентгенотопограмме равно 2 : 1, в исследуемом образце — 1 : 2. Область распространения ПАВ в кристалле резко выделяется на общем фоне рефлекса рентгенотопограммы (рис. 2, б). Полученные рентгеновские топограммы кристаллов, в которых были возбуждены ПАВ (рис. 2), фотометрировались на микрофотометре ИФО-451; сечение светового пятна при фотометрировании равнялось 0.3×0.03 мм², скорость записи микрофотограмм — 200 мм/мин, при масштабе записи 2 : 1. Зона колебаний фотометрировалась в двух взаимно перпендикулярных направлениях для определения профилей пучка ПАВ, соответствующих ее амплитуде. Разрешение при фотометрировании вдоль оси пучка равнялось $\lambda/3$, перпендикулярно пучку — 3.3λ .

Вдоль оси пучка было снято 12—13 микрофотограмм с интервалом 1 мм, поперек пучка — 8—9 микрофотограмм с интервалом 2 мм (рис. 3). В переводе на реальные размеры кристалла интервалы составили 3λ и

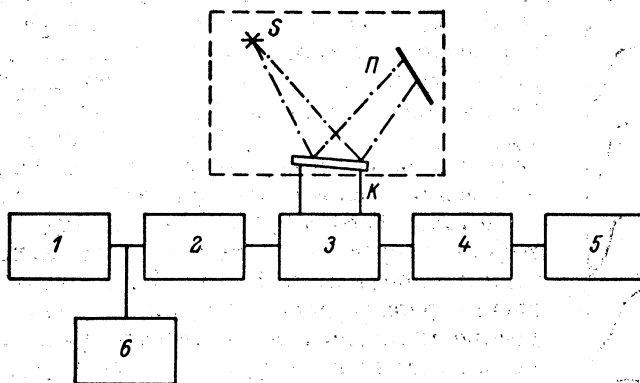


Рис. 1. Структурная схема исследования ПАВ в кристаллах методом рентгеновской топографии.

1 — генератор стандартных сигналов, 2 — усилитель, 3 — блок нейтрализации статической емкости ВШП, 4 — согласующая детекторная головка с выходным сопротивлением 75 Ом, 5 — вольтметр, 6 — частотомер, S — источник рентгеновских лучей, K — кристалл, П — рентгеновская пленка.

20λ соответственно. Учитывая принятые приближения, можно считать, что построенные проекции отображают усредненные во времени смещения кристаллической решетки в различных областях поверхности подложки. Увеличение электрического сигнала на входе фильтра приводит

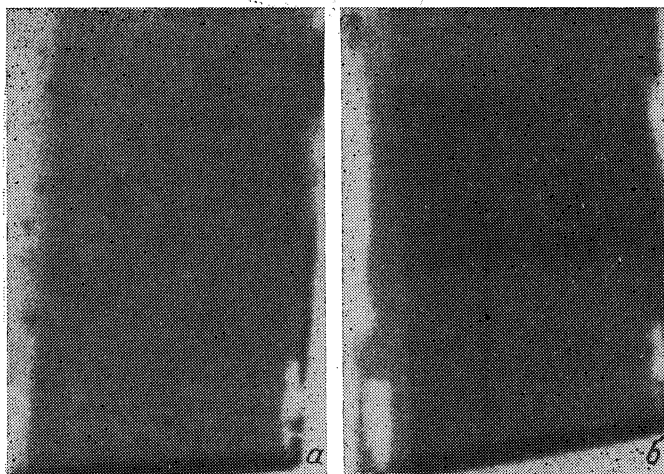


Рис. 2. Рентгеновские топограммы кристаллического фильтра на ПАВ (YZ — срез LiNbO_3 плоскость (012)).

a — исходное состояние, б — возбуждение ПАВ. $\nu=35$ МГц, $U_{\text{вх}}=1.06$ В.

к возрастанию амплитуд смещений поверхности (рис. 4). При этом наблюдается линейная зависимость плотности почернений (амплитуд) от величины электрического сигнала практически для всех профилей пучка ПАВ в интервале $U_{\text{вх}}=0 \div 0.8$ В. Исключение составляет кривая профиля № 6 (на границе центральной части звукопровода и выходных ВШП), нелинейность которой обусловлена, вероятно, дифракцией в области выходных ВШП. По мере увеличения $U_{\text{вх}}$ (>0.8 В) линейность кривых почернения как функций $U_{\text{вх}}$ нарушается и в дальнейшем наблюдается выравнивание

(насыщение) всех кривых почернения. (Абсолютная величина почернения ($D-D_0$) рассчитывалась по графической характеристике фотометрического клина микрофотометра ИФО-451 с пределами измерения оптической плотности от 0 до 2,56 ед.). Аналогичная картина наблюдалась в исследованиях, касающихся объемных волн [4, 5]: по мере увеличения деформации решетки кристалл становится «идеально несовершенным» и интегральная интенсивность стремится к постоянному пределу: $J_{\text{макс}}=J_k$ (J_k — интенсивность, рассчитанная на основе кинематической теории рассеяния [8]), а также нарушается условие пропорциональности: $i_c \propto u$ (i_c — пьезоток). Интерес, на наш взгляд, представляет эффект возрастания смещения на выходном ВПП (кривая профиля № 8, рис. 4). По-видимому, нарушение равномерного затухания амплитуды ПАВ, распространяющейся по пьезоэлектрической подложке со сложной структурой электродов, связано

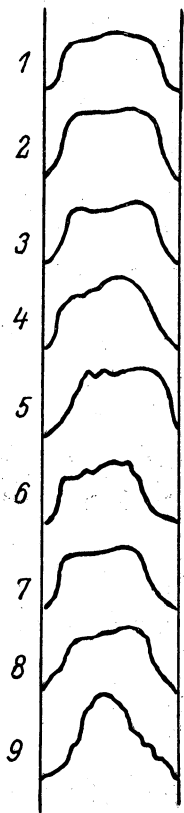


Рис. 3.

Рис. 3. Картина поперечных профилей почернения пучка ПАВ.

Микрофотометрирование поперек пучка велось в направлении от входного ВПП к выходному (кривые на рисунке — сверху вниз); при этом профили №№ 1—4 относятся к входному ВПП, №№ 5—6 — к центральной части звукопровода, №№ 7—9 — к выходному ВПП. $U_{\text{вых}}=0.9$ В.

Рис. 4. График зависимости плотности почернения $\bar{D}=D-D_0$ рентгенограммы подложки фильтра (поперечные профили пучка ПАВ, D_0 — оптическая плотность вуали) от амплитуды электрического сигнала.

Цифрами обозначены номера профилей.

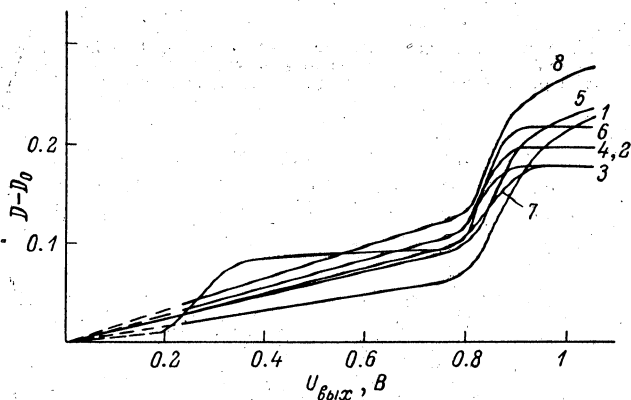


Рис. 4.

с суммированием амплитуд от сигналов чередующихся штырей преобразователей. Авторы [2] отмечают, что в ряде случаев принятый сигнал по существу увеличивается дифракцией.

Описанная в статье методика может быть использована для изучения распределения амплитуд смещений ПАВ на поверхности подложки, обусловленных дифракцией, отражением, побочными модами колебаний и т. д. Методика позволяет исследовать влияние неоднородностей в виде преобразователей, экранов и других элементов на параметры распространяющихся ПАВ с целью совершенствования конструкции и технологии изготовления акустоэлектронных устройств обработки сигналов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Э. Дж. Слободник — м.л. ТИИЭР, 64, 10, 1976.
- [2] P. Mitchell, R. Stevens. Wave Electronics, 1, 201, 1974/75.
- [3] P. J. Hagon, K. M. Lakin. US. Symp. Proc. JEEE Cat. N 74 CHO, 896—1 SU, p. 341, 1974.

- [4] K. Nagata. *J. Appl. Phys.*, 38, 3312, 1967.
- [5] У. Спенсер. В кн.: *Физическая акустика*, т. 5, с. 134—191. М., Мир, 1973.
- [6] Б. К. Казуров и др. В сб.: *Аппаратура и методы рентгеновского анализа*, вып. 3, с. 209. Л., 1968.
- [7] В. Шин, С. Ф. Травкина, В. Н. Стасевич. *Электронная техника*, сер. 9, вып. 6, 10, 1969.
- [8] Р. Джеймс. *Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей*. М., ИЛ, 1950.
- [9] N. Kato. *J. Phys. Soc. Japan*, 19, 971, 1964.
- [10] U. Bonse. *Zs. Phys.*, 177, 85, 1964.
- [11] К. Миз, Т. Джеймс. *Теория фотографического процесса*. Л., Химия, 1973.
- [12] L. G. Schulz. *Trans. AIME*, 200, 1082, 1954.
- [13] Л. И. Мелешко, Е. И. Соснина. В сб.: *Несовершенства кристаллического строения*, 34, с. 92. Киев, Наукова думка, 1971.

Физико-технический институт
им. С. У. Умарова АН ТССР
Душанбе

Поступило в Редакцию
24 апреля 1980 г.
В окончательной редакции
19 декабря 1980 г.