АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXI 1985 Вып. 4

УДК 534.231.1

ФОКУСИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ $LiNbO_3$

Бородий Ю. Н., Гранкин И. М., Непочатых Ю. В.

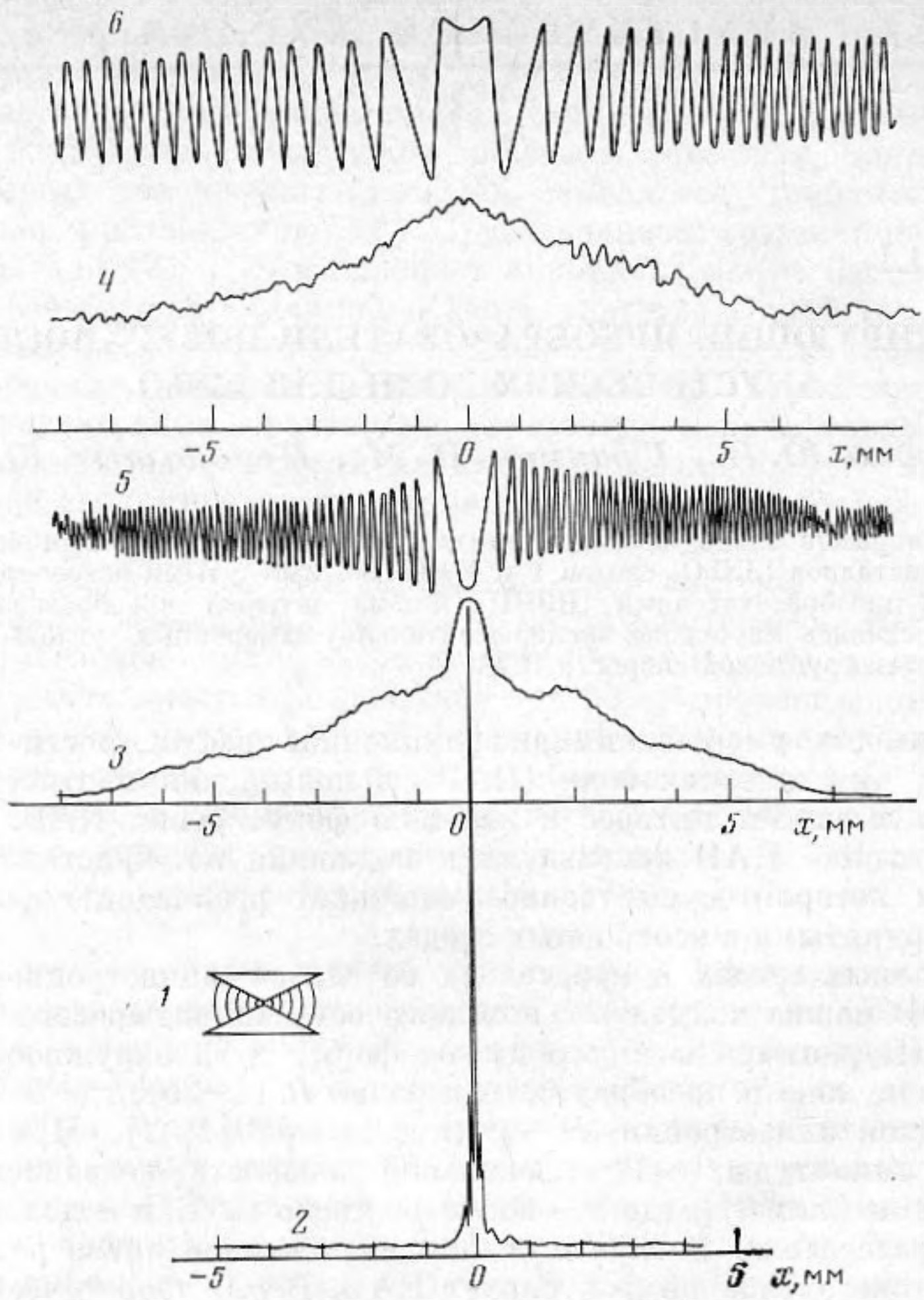
Экспериментально исследовано фокусирование ПАВ на поверхностях кристаллов $LiNbO_3$ срезов Y и $Y+127{,}86°$ изогнутыми встречно-штыревыми преобразователями (ВШП). Форма штырей преобразователей рассчитывалась на основе экспериментально измеренных угловых зависимостей групповой скорости ПАВ.

Необходимость уменьшения дифракционной расходимости пучка поверхностных акустических волн (ПАВ) и повышения плотности мощности в волне вызывает интерес к явлению фокусировки ПАВ. Наиболее широко в технике ПАВ используются подложки из кристалла $LiNbO_3$, анизотропия которого существенно усложняет реализацию фокусировки методами, принятыми в изотропных средах.

В изотропных средах и кристаллах со слабой анизотропией фокусирование ПАВ можно получить с помощью встречно-штыревого преобразователя (ВШП), штыри которого имеют форму дуги окружности. Фокусное расстояние такого преобразователя равно $R/(1-2b)$, где b — параметр параболической анизотропии, R — радиус штыря [1, 2]. При этом распределение амплитуды ПАВ в фокальной плоскости не зависит от b и имеет вид $|\mathrm{sinc}\,(kxa/R)|$, где k — волновое число ПАВ, a — половина апертуры преобразователя. В случае сильно выраженной анизотропии преобразователь такого типа не фокусирует ПАВ. В [2] теоретически показано, что в этом случае необходимо использовать ВШП, штыри которого имеют форму участка кривой групповых (лучевых) скоростей.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование фокусирующих преобразователей ПАВ для Y и $Y+127{,}86°$ срезов $LiNbO_3$. Кривая групповых скоростей $V(\theta)$ для любого среза может быть рассчитана по методике [2]. Тогда координаты точек штыря фокусирующего ВШП в прямоугольной системе координат xoy с началом в точке фокуса определяются по формулам $x=V(\theta)f\sin\theta/V_0$, $y=V(\theta)f\cos\theta/V_0$, где f — фокусное расстояние, $V_0=V(0)$ — скорость ПАВ в направлении оси y. Однако необходимые для расчета физические константы $LiNbO_3$, измеренные различными авторами, существенно отличаются. Это вызывает необходимость более тщательного исследования кривых скоростей для конкретного материала. Нами была разработана методика экспериментального определения кривых групповых скоростей с помощью лазерного зонда [3], позволяющего с высокой точностью измерить скорость ПАВ в заданном направлении.

Как известно [4], поверхность групповых скоростей представляет собой геометрическое место точек, до которых за единицу времени дойдут колебания, возбужденные в начальный момент времени точечным источником. Эта поверхность является также поверхностью равных фаз, так как все ее точки начинают колебаться в один и тот же момент времени. Лазерный зонд позволяет измерить фазу ПАВ в любой точке звукопровода, а следовательно, и координаты точек волнового фронта на любом расстоянии от точечного источника. Таким образом, измерив скорость ПАВ в каком-нибудь одном направлении и зная координаты кривой равных фаз, можно рассчитать значения скорости в других направлениях. Пусть точечный источник ПАВ находится в начале координат, x_i, y_i — координаты i-й точки кривой равных фаз, V_0 — измеренное значение ско-



Фиг. 1. *1* – малоапертурный ВШП, *2* – амплитуда ПАВ в фокусе малоапертурного ВШП, *3*, *4* – амплитудные, *5*, *6* – фазовые распределения ПАВ в сечениях, перпендикулярных оси малоапертурного ВШП, на расстояниях $100\lambda_0$ и $600\lambda_0$ (в масштабе 3 : 1) от фокуса малоапертурного ВШП

рости в направлении оси y и y_0 – ордината точки пересечения кривой с осью y. Тогда значение групповой скорости в направлении, определяемом углом

$$\theta = \mathrm{arctg}\,(x_i/y_i),\quad V(\theta) = V_0(x_i^2+y_i^2)^{1/2}/y_0. \qquad (1)$$

Все реальные источники ПАВ обладают конечными размерами, поэтому необходимо установить, какой из преобразователей лучше моделирует точечный источник и обеспечивает при этом возбуждение ПАВ с амплитудой, достаточной для проведения измерений. С этой целью исследованы несколько типов малоапертурных ВШП, в результате чего установлено, что наиболее целесообразным является использование структуры вида *1* (фиг. 1). Распределение поля, создаваемого таким малоапертурным ВШП на поверхности Y-среза $LiNbO_3$, представлено на фиг. 1 (ось ВШП совпадает с осью Z пластины). Периодические изменения фазы ПАВ на 360° соответствуют переходу с одного волнового фронта на другой. Малоапертурный ВШП состоял из 30 пар концентрических электродов с периодом 40 мкм и имел угол раскрытия 70°.

Такие преобразователи были изготовлены на исследуемых пластинах $LiNbO_3$ размером 32×20×1,5 мм³. ПАВ возбуждались на частотах 87 МГц на Y – и 96 МГц на Y+127,86° срезах $LiNbO_3$. Преобразователи согласовывались с помощью индуктивностей. Края звукопроводов покрывались акустическим поглотителем.

Таблица 1

Зависимость групповой скорости ПАВ от угла относительно оси Z для Y – $LiNbO_3$

θ, град.	V, м/с	θ, град.	V, м/с	θ, град.	V, м/с
0	3485,6	7,1959	3462,6	14,6	3441,4
0,23766	3485,5	7,4387	3461,8	14,851	3440,9
0,47535	3485,3	7,682	3461,0	15,102	3440,5
0,71313	3484,9	7,9256	3460,1	15,353	3440,1
0,951	3484,3	8,1694	3459,3	15,605	3439,6
1,189	3483,6	8,4136	3458,3	15,857	3439,2
1,4272	3482,9	8,658	3457,5	16,11	3438,8
1,6654	3482,2	8,9025	3456,7	16,363	3438,4
1,9038	3481,4	9,1475	3455,8	16,616	3438,0
2,1424	3480,7	9,3926	3455,0	16,87	3437,6
2,3812	3479,8	9,6378	3454,3	17,123	3437,3
2,6201	3479,0	9,8831	3453,6	17,377	3437,0
2,8592	3478,1	10,128	3453,0	17,632	3436,7
3,0984	3477,2	10,374	3452,3	17,887	3436,3
3,3378	3476,5	10,621	3451,5	18,143	3435,8
3,5772	3475,7	10,867	3450,8	18,398	3435,5
3,8169	3474,9	11,114	3450,1	18,655	3435,2
4,0569	3474,1	11,361	3449,4	18,912	3434,8
4,2972	3473,1	11,608	3448,7	19,169	3434,4
4,5376	3472,2	11,856	3448,0	19,426	3434,2
4,7781	3471,4	12,104	3447,3	19,683	3434,0
5,019	3470,4	12,353	3446,7	19,94	3433,8
5,2599	3469,6	12,601	3446,1	20,198	3433,6
5,501	3468,8	12,85	3445,5	20,456	3433,5
5,7424	3467,9	13,098	3445,0	20,715	3433,3
5,984	3467,0	13,347	3444,5	20,974	3433,2
6,2259	3466,1	13,597	3443,9	21,233	3433,1
6,4682	3465,2	13,847	3443,3	21,493	3433,0
6,7107	3464,3	14,098	3442,7	21,753	3433,0
6,9532	3463,4	14,348	3442,0	22,013	3433,0

Исследовалось по пять образцов каждого из срезов. Измеряемые образцы устанавливались на двухкоординатном столике зонда и ориентировались. Система ориентации держателя образца лазерного зонда позволяла точно установить соответствие направления кристаллографических осей выбранным направлениям перемещения. Далее измерялась скорость ПАВ в направлении продольной оси звукопровода (ось y), а также фаза ПАВ на расстоянии $600\lambda_0$ от центра ВШП (λ_0=40 мкм – длина ПАВ в осевом направлении). Здесь образец перемещался в перпендикулярном направлении (ось x) с постоянным шагом 100 мкм. После каждого перемещения вдоль оси x коррекцией положения подложки по оси y устанавливалось прежнее значение фазы, а соответствующее значение y фиксировалось. Измерения проводились при температуре 22±2° С.

Анализ кривых равных фаз, измеренных на различных образцах, показал, что между ними существует расхождение, увеличивающееся с ростом угла θ, причем для четырех из пяти образцов Y-среза и трех из пяти повернутого среза отличие ординат соответствующих точек кривых было меньше $\lambda_0/3$. Для остальных образцов такое отклонение достигало $(1{,}5\div 2)\lambda_0$, что можно объяснить более существенным отличием их физических свойств и неточностью ориентации пластин в процессе изготовления.

Следует отметить, что диаграмма направленности ВШП типа 1 (фиг. 1) на повернутом срезе у́же, чем на срезе Y, поэтому кривую равных фаз для него удалось снять в меньшем диапазоне углов. Значения скорости, измеренные в направлениях кристаллографических осей Z и X исследованных срезов, составили соответственно 3485,6±1,4 м/с и 3976,4±1,6 м/с. Рассчитанные по (1) угловые зависимости скорости для половин кривых, симметричных относительно осей Z и X соответствующих срезов, приведены в табл. 1, 2. Эти данные являются усредненными по соответствующим группам образцов, причем образцы с существенным отличием кривой равных фаз во внимание не принимались.

Используя приведенные данные, можно рассчитать форму штырей фокусирующих преобразователей ПАВ с отношением апертуры к фокусному расстоянию до ~0,75 для $YZ-$ и ~0,63 для $Y+127{,}86°$, $X-LiNbO_3$. Нами исследовались фокусирующие ВШП с фокусным расстоянием 24 мм, апертурой 15,2 мм и периодом 50 мкм, имеющие по 10 пар штырей, форма которых соответствовала полученной экспериментально кривой групповых скоростей.

Фокусирующие ВШП были сформированы на тех же пластинах, для которых были измерены участки кривых скоростей. Лучшее качество фокусирования получено на тех образцах, где форма кривой скоростей наиболее близка к форме штырей ВШП. Результаты измерений акустических

Таблица 2

Зависимость групповой скорости ПАВ от угла относительно оси X для $Y+127{,}86°-LiNbO_3$

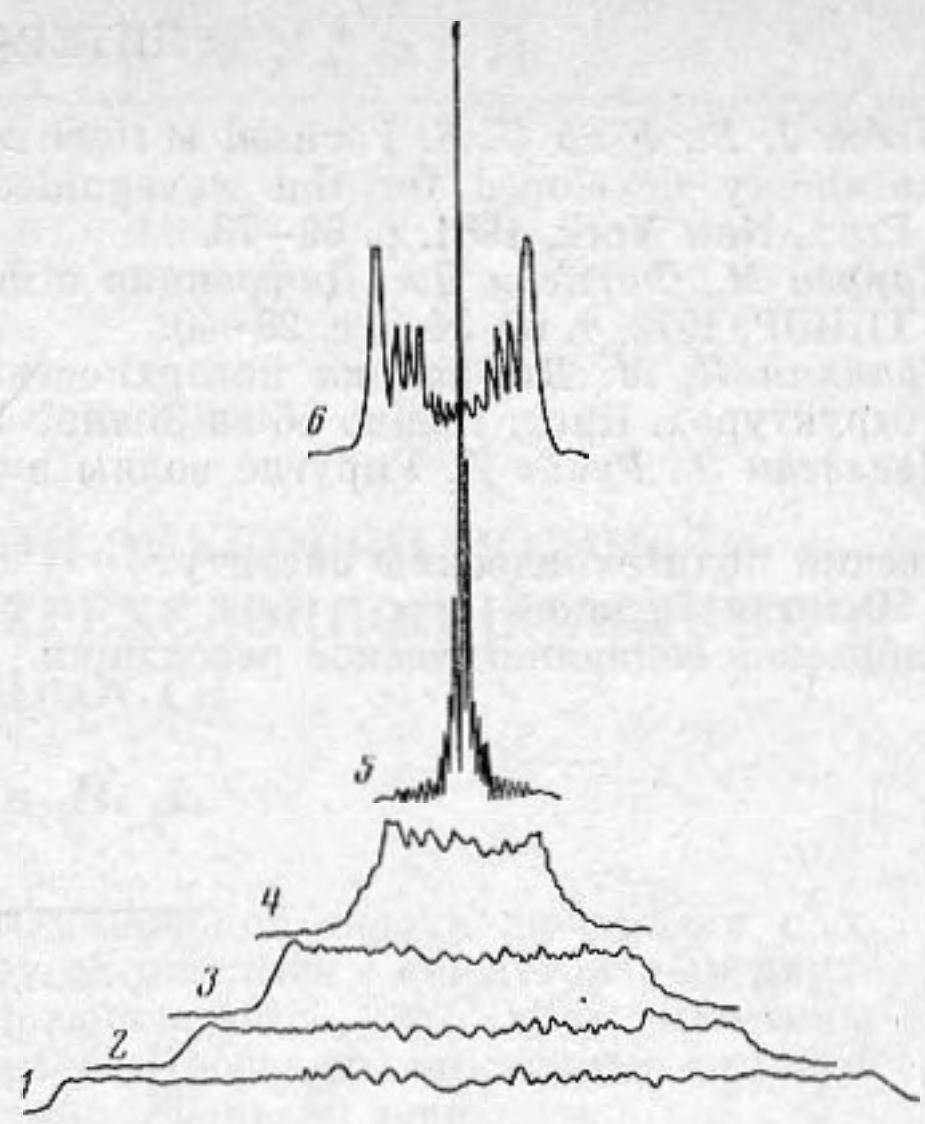
θ, град.	V, м/с	θ, град.	V, м/с	θ, град.	V, м/с
0	3976,4	6,7042	3954,8	13,819	3866,0
0,23761	3976,2	6,9492	3952,3	14,084	3862,5
0,47524	3976,0	7,1947	3949,8	14,35	3859,0
0,71289	3975,9	7,4409	3947,1	14,616	3855,5
0,95056	3975,8	7,6877	3944,4	14,883	3852,0
1,1882	3975,8	7,9352	3941,6	15,152	3848,3
1,426	3975,7	8,1834	3938,7	15,421	3844,7
1,6637	3975,6	8,4322	3935,7	15,691	3841,0
1,9016	3975,5	8,6819	3932,6	15,962	3837,4
2,1394	3975,4	8,9322	3929,4	16,234	3833,9
2,3773	3975,2	9,1834	3926,1	16,506	3830,5
2,6154	3974,9	9,4354	3922,8	16,779	3827,0
2,8536	3974,6	9,6878	3919,5	17,053	3823,5
3,092	3974,1	9,9406	3916,3	17,329	3819,9
3,3306	3973,5	10,194	3913,0	17,605	3816,3
3,5694	3972,9	10,448	3909,8	17,882	3812,7
3,8084	3972,1	10,703	3906,7	18,16	3809,1
4,0476	3971,3	10,958	3903,5	18,44	3805,6
4,2872	3970,4	11,214	3900,3	18,719	3802,1
4,527	3969,3	11,471	3897,1	19,0	3798,5
4,7672	3968,2	11,728	3893,8	19,282	3795,0
5,0077	3967,0	11,987	3890,4		
5,2486	3965,6	12,246	3886,9		
5,4898	3964,2	12,506	3883,5		
5,7315	3962,7	12,767	3880,1		
5,9736	3961,1	13,028	3876,7		
6,2163	3959,3	13,291	3873,0		
6,4599	3957,2	13,555	3869,5		

полей фокусирующих ВШП приведены на фиг. 2, 3. На этих же фигурах для сравнения представлены амплитудные профили ПАВ на расстоянии 24 мм от преобразователей, штыри которых имеют форму дуги окружности с радиусом 24 мм. Как видно, такие преобразователи не обладают фокусирующими свойствами. Распределение амплитуды ПАВ в фокальной плоскости фокусирующих ВШП близко к функции $|\mathrm{sinc}\, x|$ с повышенным уровнем боковых лепестков. Для всех образцов наблюдалась асимметрия боковых лепестков, что связано, очевидно, с неточностью ориентации осей ВШП относительно осей звукопроводов. В распределениях амплитуды ПАВ в фокальной плоскости, приведенных на фиг. 2, 3, ширина главных лепестков составила $2{,}5\lambda_0$ для $YZ-$ и $2{,}1\lambda_0$ для $Y+127{,}86°$, $X-LiNbO_3$. Эти значения меньше расчетного значения $\sim 3{,}2\lambda_0$, полученного из классической волновой теории для изотропной среды. Результаты наших исследований подтверждают расчеты [2], показывающие, что у преобразователей в форме поверхности групповых скоростей размер фокального «пятна» может оказаться меньшим, чем у эквивалентного преобразователя, имеющего форму дуги окружности и расположенного на изотропной поверхности.

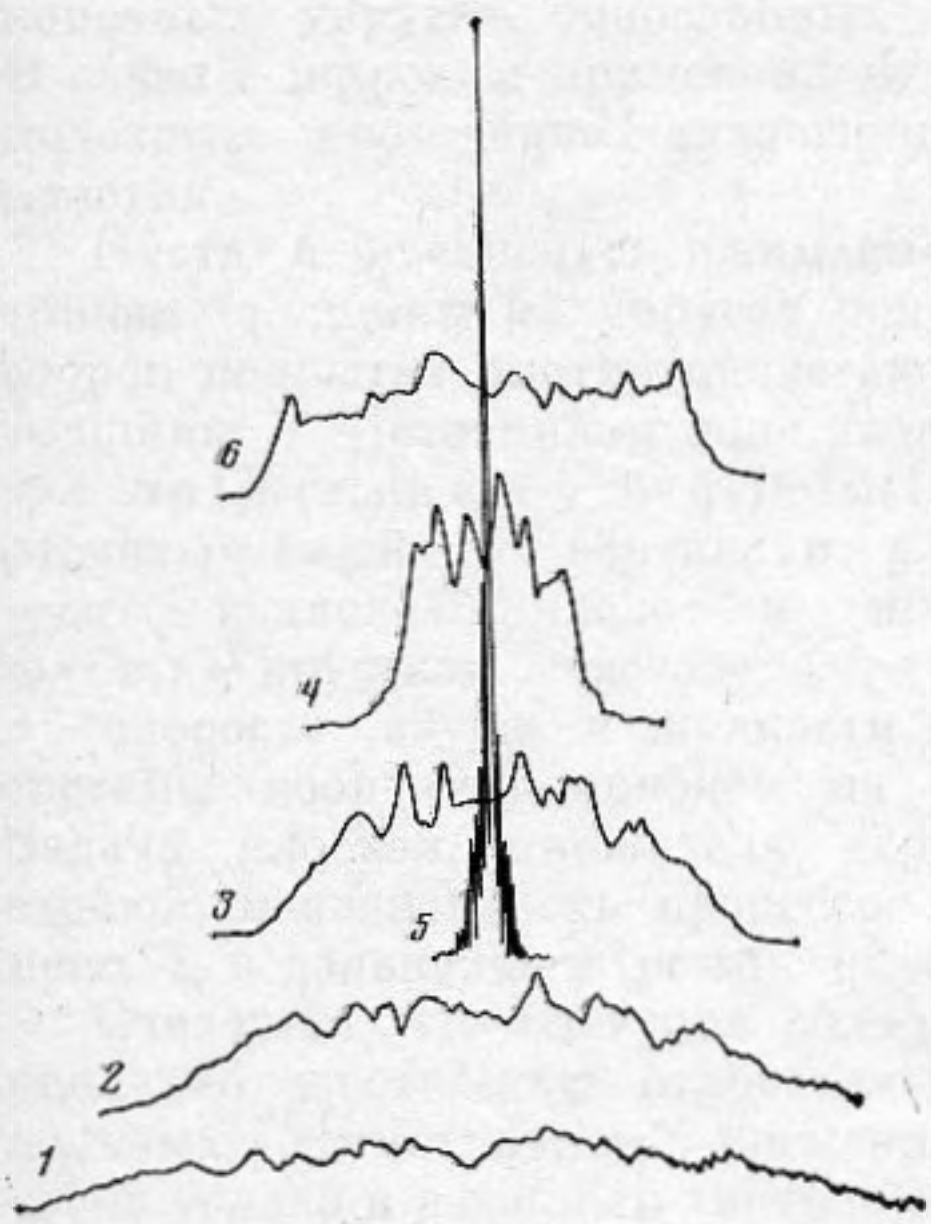
Фиг. 2. *1–5* – амплитудные профили ПАВ на расстояниях 5, 10, 15, 20 и 24 мм от ВШП со штырями в форме кривой групповых скоростей на $YZ-LiNbO_3$, *6* – то же на расстоянии 24 мм от ВШП со штырями в форме дуги окружности

Фиг. 3. *1–5* – амплитудные профили ПАВ на расстояниях 5, 10, 15, 20 и 24 мм от ВШП со штырями в форме кривой групповых скоростей на $Y+127{,}86°$, $X-LiNbO_3$, *6* – то же на расстоянии 24 мм от ВШП со штырями в форме дуги окружности

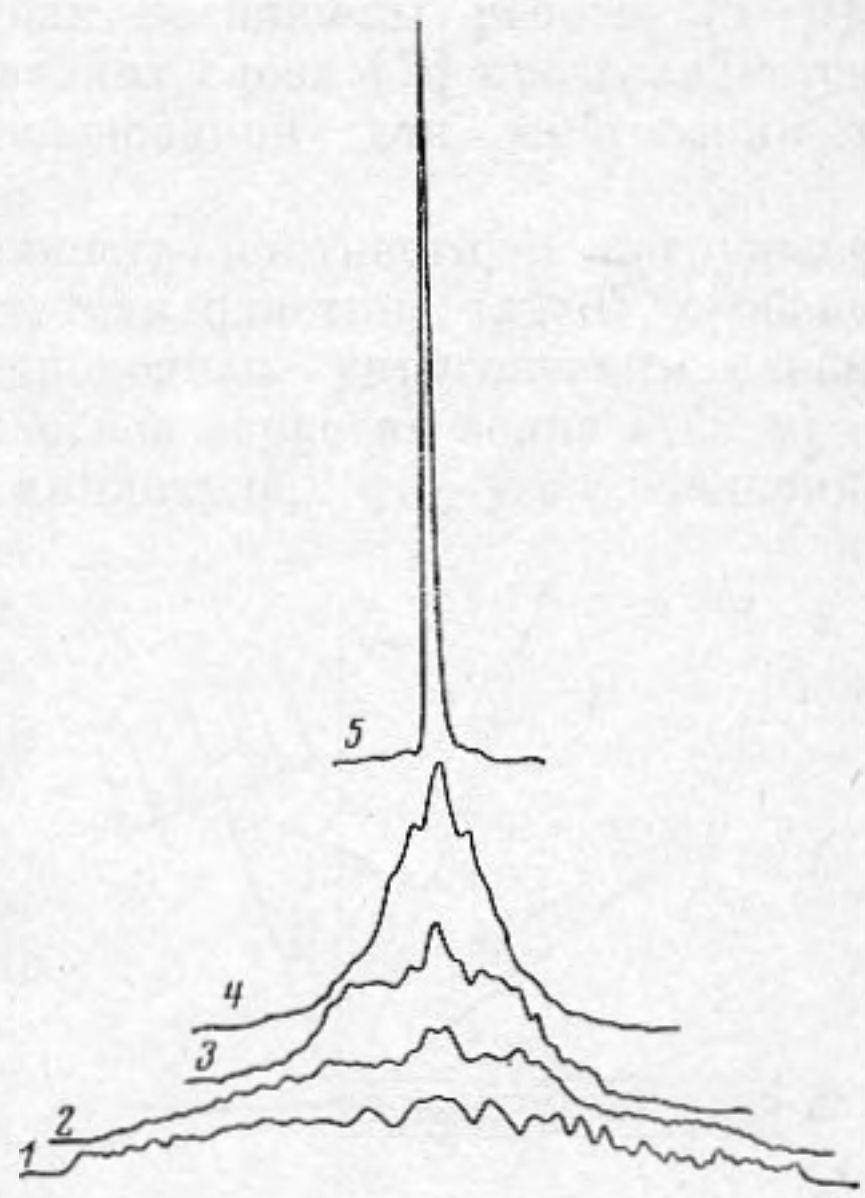
Фиг. 4. *1–5* – амплитудные профили ПАВ на расстояниях 5, 10, 15, 20 и 24 мм от аподизированного ВШП со штырями в форме кривой групповых скоростей на $YZ-LiNbO_3$



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

В фокальной плоскости боковые лепестки амплитудного распределения ПАВ имеют значительный уровень. Это уменьшает концентрацию энергии ПАВ в области фокуса и вызывает необходимость поиска путей подавления боковых лепестков. С этой целью нами изучено распределение амплитуды ПАВ фокусирующих ВШП на Y срезе – $LiNbO_3$, аподизация которых обеспечивает взвешивание амплитуды возбуждаемой ПАВ по функции Хэмминга $\psi(x)=0{,}54+0{,}46\cos(kxa/\pi)$, где x – координата вдоль оси, перпендикулярной оси ВШП. Результаты измерений показали (фиг. 4), что ширина главного лепестка фокального распределения возросла при этом в 3 раза, однако уровень боковых лепестков был значительно ниже, чем у неаподизированных ВШП. Это показывает перспективность такой аподизации для некоторых практических приложений.

Таким образом, полученные результаты показывают эффективность фокусирующих преобразователей со штырями в форме кривой групповых скоростей для устройств, изготовленных на подложках с сильно выраженной анизотропией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Green J. B., Kino G. S.* Focused surface wave transducers on anisotropic substrates: a theory developed for the waveguided storage correlator.– In: Ultrason. Symp. Proc., New York, 1981, p. 69–73.
2. *Харузи М., Фарнелл Дж.* Дифракция и фокусировка в анизотропных кристаллах.– ТИИЭР, 1972, т. 60, № 8, с. 28–40.
3. *Гранкин И. М.* Дифракция поверхностных акустических волн на периодических структурах. Киев: Изд-во об-ва Знание УССР, 1982. 24 с.
4. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982, 424 с.

Киевский политехнический институт
им. 50-летия Великой
Октябрьской социалистической революции

Поступила в редакцию
1.III.1984