

ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Выпуск 8

СЕРИЯ — ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

1985

УДК 621.391.26 : 534.24

*В. С. БОНДАРЕНКО, Н. Ф. НАУМЕНКО, В. С. ОРЛОВ,
Е. Б. УМЫСКОВА*

АНАЛИЗ И УЧЕТ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В УСТРОЙСТВАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Приповерхностные объемные акустические волны являются одним из основных источников ложных сигналов в устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Рассматривается метод анализа этих волн в произвольно ориентированном звукопроводе, позволяющий определить как относительные частоты возбуждения этих волн встречно-штыревым преобразователем, так и уровень их возбуждения. Эффективность метода проверяется на примере некоторых срезов кристалла ниобата лития, используемых в устройствах обработки сигналов на ПАВ. Анализируется влияние приповерхностных волн на амплитудно-частотные характеристики данных устройств и описываются методы его учета при их проектировании.

Как известно, встречно-штыревые преобразователи (ВШП), широко используемые для возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ), генерируют также и объемные акустические волны (ОАВ) [1]. Диаграмма направленности ВШП зависит от частоты излучения и с увеличением последней направление максимального излучения ОАВ отклоняется вглубь кристалла. Такие волны попадают на нижнюю нерабочую грань звукопровода и при специальной обработке этой грани (нанесении рассеивающих рисок, пазов, акустических поглотителей и т. п.) могут быть поглощены или рассеяны в объем кристалла [1, 2]. Однако часть объемных волн, для которых поток энергии параллелен поверхности звукопровода, получившая название «приповерхностных ОАВ» (ПОАВ), не попадает на нижнюю грань. Распространение и детектирование этих волн приемным ВШП устройства вызывает появление ложных сигналов во временной области и паразитных полос пропускания в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) устройства. При этом возрастает уровень боковых лепестков АЧХ и ухудшается избирательность устройства в целом.

Для уменьшения уровня ложных сигналов, связанных с распространением ПОАВ, используются различные конструктивные методы. Большинство из них предназначено для разделения сигналов во входном и выходном каналах и основано на локализации энергии ПАВ в тонком приповерхностном слое кристалла. Например, для переизлучения ПАВ в параллельный канал используются многополосковые ответители, а для поворота акустического пучка ПАВ в плоскости распространения применяются специальные отражающие элементы [1]. Вследствие однородного распределения энергии ОАВ по объему звукопровода, они слабо взаимодействуют с многополосковыми ответителями.

ми и отражающими элементами и основная их часть не попадает на выходной ВШП.

К основным недостаткам конструктивных методов снижения уровня ложных сигналов относятся увеличение размеров звукопровода, ведущее к росту его стоимости, а также, как правило, увеличение вносимых потерь. Поэтому наиболее эффективным средством уменьшения влияния ПОАВ на характеристики устройств обработки сигналов на ПАВ является выбор ориентации звукопровода со слабым возбуждением этих волн.

Характеристики ПОАВ в каждом конкретном случае определяются, с одной стороны, физическими свойствами звукопровода, с другой — конструктивными параметрами устройства на ПАВ: размерами звукопровода, типом используемых для излучения и приема ПАВ ВШП, их протяженностью, апертурой и т. д. Если пренебречь эффектом дифракции, то структура приповерхностных волн может быть найдена в результате решения двумерной граничной задачи и будет определяться, прежде всего, формой сечения волновой поверхности кристалла сагиттальной плоскостью заданной ориентации относительно кристаллографических осей. Исследование акустической анизотропии кристалла позволяет не только анализировать характеристики ПОАВ в известных срезах, но и осуществлять поиск новых срезов с заданным уровнем возбуждения этих волн.

В квазистатическом приближении характеристики ПОАВ можно найти, решая с учетом граничных условий на поверхности кристалла систему динамических уравнений для пьезоэлектрической среды [2]

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} &= c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} - e_{klj} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k \partial x_j} \quad (i = 1, \dots, 3), \\ e_{jlk} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_j} + \mathcal{E}_{ij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и для вакуума

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = 0, \quad (2)$$

где ρ — плотность среды;

u_i — компоненты вектора смещения точки вдоль i -й оси;

c_{ijkl} , e_{klj} и \mathcal{E}_{ij} — компоненты тензоров упругой жесткости, пьезоэлектрических констант и диэлектрической проницаемости соответственно;

φ — электростатический потенциал.

Как показано в [3], задача анализа спектра акустических волн является самосогласованной и приводит к интегральному уравнению, аналитическое решение которого в общем случае получить не удается. Метод численного решения этой задачи для произвольной ориентации кристалла был предложен авторами [2] и основан на определении функций Грина, характеризующих излучение бесконечно протяженных линейных источников. Протяженность ВШП при этом считается бесконечной вдоль оси Y , нормальной по отношению к направлению распространения ПАВ. Для нахождения решения системы (1, 2) была введена вспомогательная функция эффективной диэлектрической проницаемости ($\mathcal{E}_{\text{ДП}}$) $\mathcal{E}_{\varphi}(s)$, связывающая между собой Фурье-образы танген-

циальной компоненты напряженности $\bar{E}_\tau(s)$ и нормальной компоненты индукции $\bar{D}_n(s)$ электрического поля на поверхности следующим образом:

$$\bar{D}_n(s) = -i \mathcal{E}_{\text{эф}}(s) \bar{E}_\tau(s),$$

где $s=1/V$ — обратная фазовая скорость. Метод ЭДП является развитием импедансного подхода к решению граничных задач, предложенного Ингебригтсеном [4], и позволяет сформулировать краевую задачу как электростатическую. Особенности функции ЭДП имеют определенный физический смысл и отражают вклад акустических волн различных типов, возбуждаемых ВШП, в формирование его частотной характеристики.

Для идеального диэлектрика ЭДП — действительная константа, для пьезоэлектрика — это комплексная функция, причем ее мнимая часть определяет потери энергии на излучение в объем кристалла. Особенности функции, наблюдаемые при некоторых значениях аргумента s_k ($k=1, \dots, K$), связаны с генерацией акустических волн различного типа с соответствующими скоростями $V_k = 1/s_k$. Значение $s=s_0$, для которого $\mathcal{E}_{\text{эф}}=0$, отвечает скорости ПАВ на свободной поверхности, а полюс функции $\mathcal{E}_{\text{эф}}(s)$ в точке $s=s_\infty$ — скорости ПАВ на металлизированной поверхности. Разрывы производной $d\mathcal{E}_{\text{эф}}/ds$ в некоторых точках характеризуют возбуждение ПОАВ, причем конкретный вид функции в окрестности точки s_∞ зависит от ориентации звукопровода и, в свою очередь, определяет свойства ПОАВ — эффективность их пьезоэлектрической связи с электрическим полем ВШП и скорость их затухания при распространении вдоль поверхности звукопровода.

Для расчета ЭДП в некоторых срезах кристалла ниобата лития использовался метод, предложенный в [2], однако решение системы (1, 2) было представлено несколько в ином виде:

$$\bar{U}_i = \sum_{n=1}^4 A_n \bar{U}_i^{(n)} \exp(-j \alpha_n k_x) \quad (i = 1, \dots, 4),$$

где n — номер парциальной волны, k_x — продольная компонента волнового вектора, α_n и A_n — соответственно коэффициенты затухания и амплитудные коэффициенты парциальных волн, $\bar{U}^{(n)}$ — обобщенный вектор поляризации n -й парциальной волны с компонентами: $\bar{U}_i^{(n)} = \bar{u}_i^{(n)}$ при $i=1, \dots, 3$, $\bar{U}_4^{(n)} = \varphi^{(n)}$.

Это позволило получить характеристический полином системы (1, 2) в виде многочлена с действительными коэффициентами, что существенно упростило процедуру численного поиска его корней α_n . В результате было получено следующее выражение для ЭДП:

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \mathcal{E}_0 - \frac{k}{|k|} \frac{\sum_{n=1}^4 A_n [(\alpha_n e_{3k3} + e_{3k1}) U_k^{(n)} - (\alpha_n \mathcal{E}_{33} + \mathcal{E}_{31}) U_4^{(n)}]}{\sum_{n=1}^4 A_n U_4^{(n)}}, \quad (3)$$

где k — волновой вектор, а для определения величин α_n и $U_i^{(n)}$ необходимо решить систему (1) относительно \bar{U}_i при заданном значении s .

На рис. 1 представлены полученные в результате расчета функции ЭДП для двух срезов ниобата лития, наиболее широко применяемых в устройствах на ПАВ, YZ и $yx\bar{l}/127,86$. Для расчета использовались

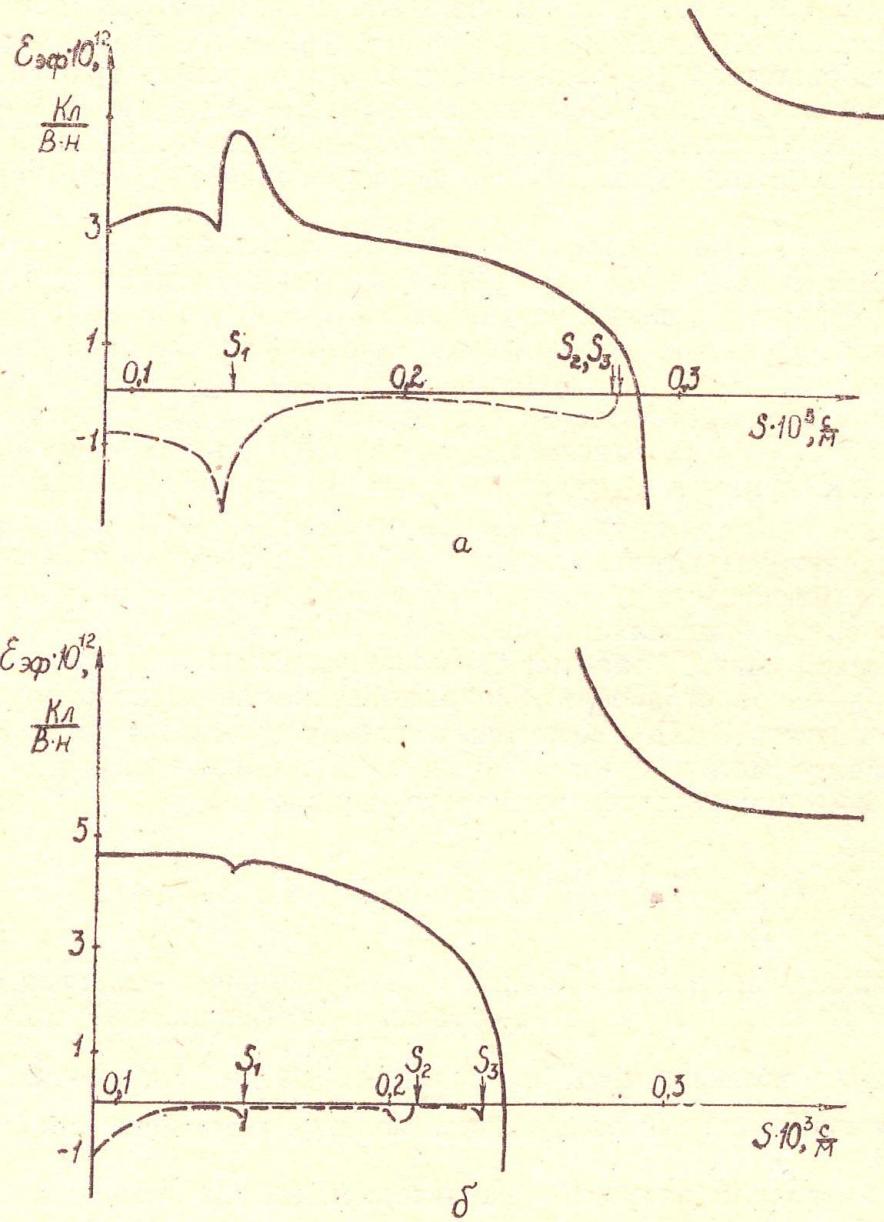


Рис. 1

значения материальных констант из [5]. Стрелками на оси абсцисс указаны точки, соответствующие скоростям ПОАВ различной поляризации \bar{U}_i . Из рисунка видно, что если для YZ-среза одна из ПОАВ (точка s_2) непьезоактивна, то для среза $yxl/127,86$ все три волны генерируются ВШП, хотя эффективность их генерации мала, что соответствует экспериментальным данным [6].

Используя функции ЭДП, можно рассчитать распределение электрических полей и заряда в ВШП. Для этого потенциал ϕ в точке x

может быть представлен с помощью функций Грина $G(x)$ в виде интеграла [2]

$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x - x') \sigma(x') dx',$$

где

$$G(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s \omega \mathcal{E}_{\text{шф}}(s)} \exp(-j\omega s x) ds; \quad (4)$$

$\sigma(x)$ — плотность заряда в точке x ; ω — циклическая частота.

Применительно к расчету ВШП это выражение означает, что разность потенциалов на i -й паре электродов выходного ВШП, возникающую в результате приема сигнала, излученного входным ВШП, можно вычислить, используя функцию Грина и зная распределение заряда $\sigma(x)$. Расчет многоэлектродного преобразователя с учетом реального распределения заряда требует больших затрат машинного времени. Поэтому с целью учета влияния ПОАВ на характеристики устройства будем при их расчете использовать метод приближения δ -источников [7]. В этом случае уравнение (4) упрощается:

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^{K} G(x - x_k) \quad (5)$$

и задача сводится к вычислению функций Грина. Заметим, что предложенная в [2] аппроксимация функций Грина не всегда возможна, особенно для тех срезов, в которых могут возбуждаться квазиперечные ПОАВ с близкими по величине скоростями, так как не удается в этом случае разделить их вклады в ЭДП. Функция Грина определялась поэтому численным интегрированием. Такой подход хотя и связан с некоторым увеличением времени счета, дает более точные результаты для многих практически важных срезов, в том числе для $yx/127,86$ -среза ниобата лития.

На рис. 2 представлены функции Грина для ПОАВ в анализируемых срезах ниобата лития. Для YZ -среза начиная с малых расстояний от источника излучения можно различить вклады в функцию двух волн со скоростями, отличающимися друг от друга примерно в два раза, что соответствует точкам s_1 и s_3 на рис. 1, а. Для среза $yx/127,86^\circ$ функция Грина представляет собой результат сложения трех затухающих синусоид.

Используя (4), для модели δ -источников можно рассчитать АЧХ фильтра на ПАВ с учетом влияния ПОАВ. Передаточная функция фильтра, состоящего из двух ВШП, характеризуемых координатами электродов x_{1i} и x_{2j} ($i=1, \dots, N_1$, $j=1, \dots, N_2$) и функциями аподизации (изменения перекрытий) $f_1(x_{1i})$ и $f_2(x_{2j})$ соответственно, имеет вид

$$H(i\omega) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} G(x_{1i} - x_{2j}) f_1(x_{1i}) f_2(x_{2j}). \quad (6)$$

Расчетные АЧХ двух фильтров на ПАВ, для которых в качестве подложек использованы YZ и $yx/127,86^\circ$ -срезы ниобата лития, приве-

дены на рис. 3. Сплошной линией показан вклад в АЧХ ПАВ, а штриховой — вклад в нее ПОАВ. Расстояние между ВШП составляет в обоих случаях ~ 3 мм, а период структуры $d=20$ мк. Функция аподизации

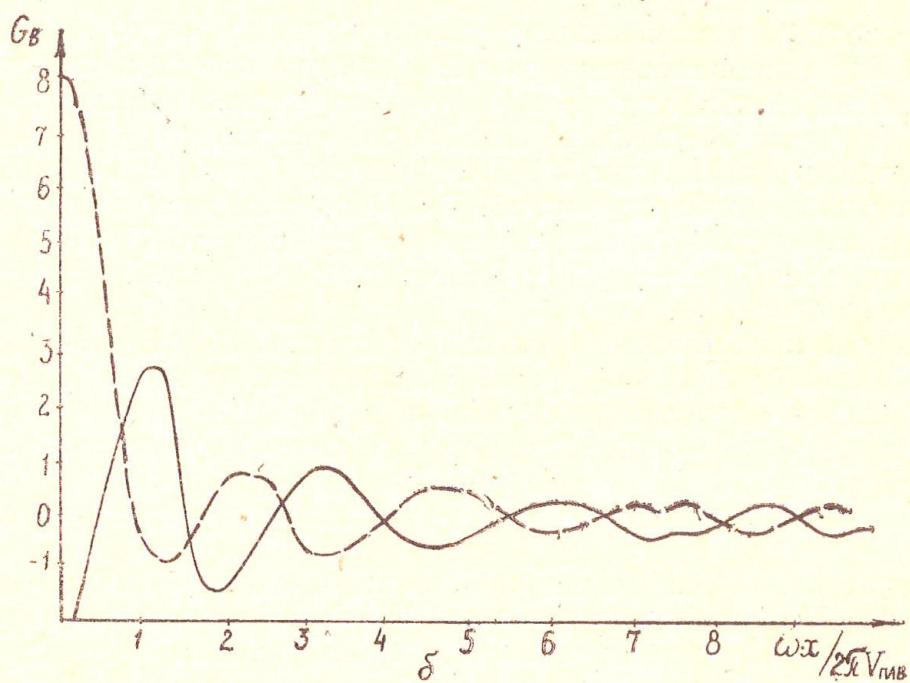
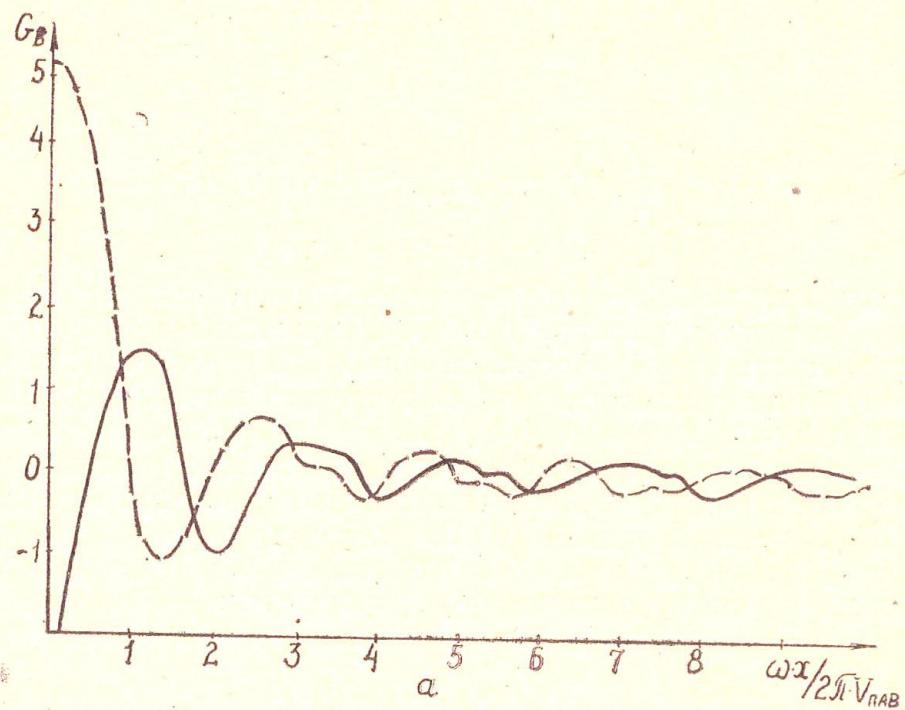


Рис. 2. а, б

для первого ВШП с числом электродов $N_1=20$ совпадает с известной функцией Кайзера. Второй ВШП — широкополосный и практически не влияет на форму АЧХ.

В обоих случаях наибольший уровень ложных сигналов связан с возбуждением и распространением квазипродольной волны, скорость которой в 2,1 раза больше скорости ПАВ для YZ-среза и лишь в

1,6 раза для $yxI/127,86$ -среза. В первом случае уровень паразитного сигнала на соответствующей частоте составляет -30 дБ по отношению к ПАВ, во втором -42 дБ. Уровень сигнала для медленной квазипоперечной волны в первом случае -38 дБ, во втором -46 дБ. На рис. 3, б можно различить также небольшое повышение уровня сигнала на

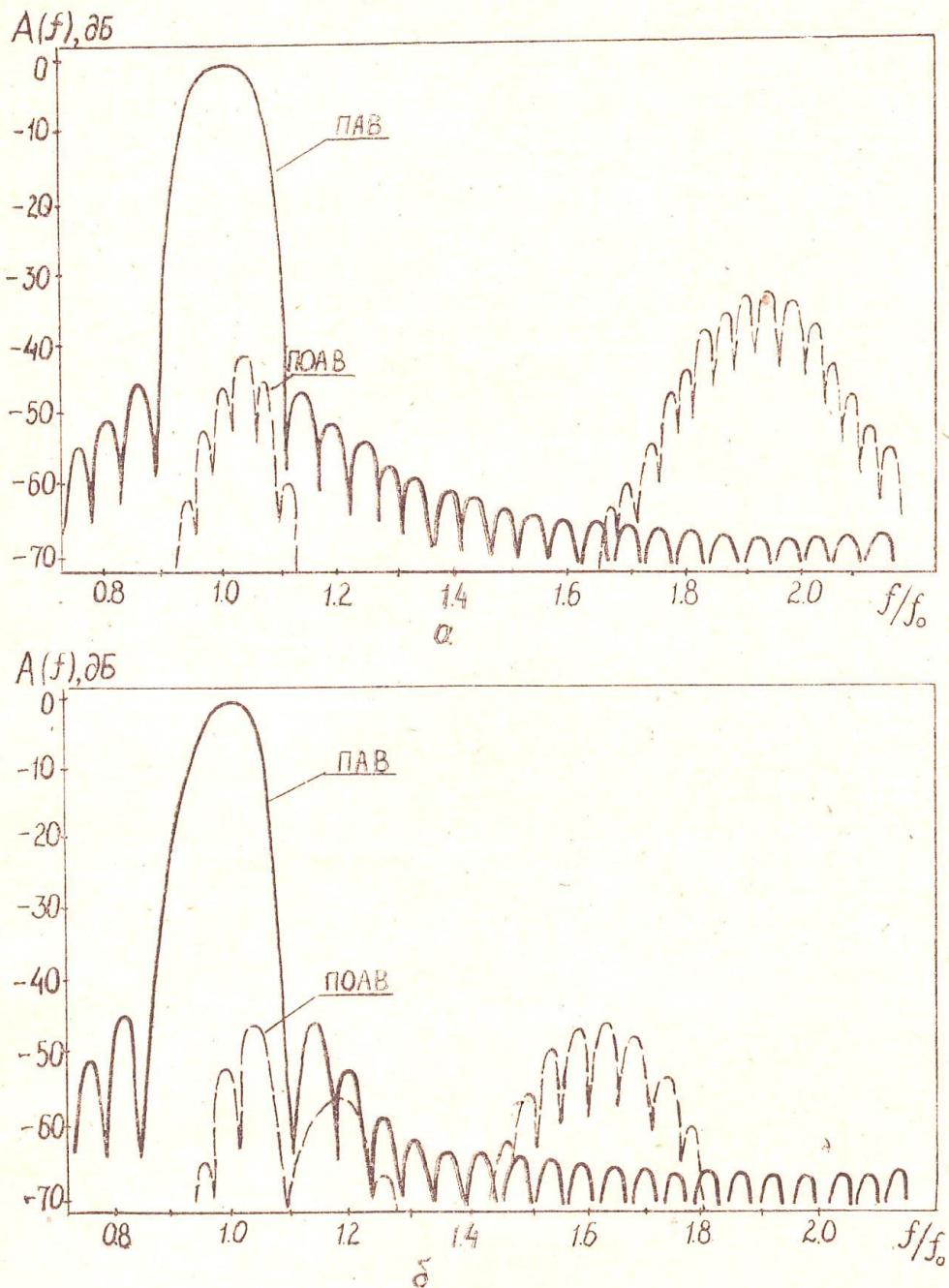


Рис. 3. а, б

частотах $f = (1,10—1,25)f_0$ (где f_0 — частота синхронизма для ПАВ), обусловленное распространением быстрой квазипоперечной волны.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующий вывод: если при разработке устройств на ПАВ необходимо обеспечить низкий уровень боковых лепестков АЧХ в интервале частот до $1,6 f_0$, можно использовать в качестве подложки пластину YZ-среза, если же задан более широкий диапазон рабочих частот, то лучше применить

yxl/127,86-срез. Следует, однако, отметить, что относительный уровень ПОАВ зависит от расстояния между ВШП, особенно для YZ-среза, где медленная поперечная волна поляризована вертикально по отношению к поверхности звукопровода и вследствие этого быстро затухает при распространении. Этот уровень может несколько измениться и в результате неодинакового влияния рассогласования импедансов ВШП и нагрузки на ПАВ и ПОАВ. Кроме того, в реальных устройствах уровень боковых лепестков АЧХ может повыситься из-за неполного поглощения «глубоких» ОАВ, попадающих на выходной ВШП после отражения от нижней грани звукопровода.

В целом полученные расчетные АЧХ хорошо согласуются с результатами экспериментов (см., например, [2, 6]), а разработанная методика численного расчета АЧХ устройств на ПАВ с учетом ПОАВ, проиллюстрированная на примере двух срезов ниобата лития, универсальна и может быть использована для анализа характеристик устройств, выполненных на основе любого пьезоэлектрического материала произвольной ориентации, а также для синтеза устройств с низким уровнем паразитных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mitchell R. F. Spurious bulk wave signals in acoustic surface wave devices. — Proc. Ultrasonics Symposium. Milwaukee, 1974, p. 313—320.
2. Milsom R. F., Reilly N. H. C., Redwood M. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers — IEEE Trans, 1977, v. SU-24, № 3, p. 147—166.
3. Emtage P. R. Self-consistent theory of interdigital transducers. — J. Acoust. Soc. Am., 1972, v. 51, № 4, pt. 1, p. 1142—1155.
4. Ingebrigtsen K. A. Surface waves in piezoelectrics. — J. Appl. Phys., 1969, v. 40, № 7, p. 2681—2686.
5. Warner A. W., Onoe M., Coquin G. A. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3 ш). — J. Acoust. Soc. Am., 1967, v. 42, № 6, p. 1223—1231.
6. Сибаяма, Яманути, Сато, Мэгуро. Оптимально повернутый Y-срез кристалла LiNbO_3 для подложек фильтров на поверхностных акустических волнах. — ТИИЭР, 1976, т. 64, № 5, с. 27—29.
7. Tancell R. F. Analytic Design of Surface Wave Bandpass Filters. — Proc. Ultrasonics Symposium, New York, 1972, p. 215—217.

Статья поступила в редакцию 28 декабря 1984 г.