

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1972

УДК 534.222

И. Ю. СОЛОДОВ

## КОЛЛИНЕАРНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В КВАРЦЕ

Описана методика исследования нелинейного взаимодействия упругих поверхностных волн, распространяющихся в направлении оси  $y$  кварца  $x$ -среза. Для возбуждения и приема поверхностных волн в частотном диапазоне нескольких десятков мегагерц использовались противофазные пьезоэлектрические преобразователи. Наблюдалась генерация поверхностных волн суммарной и разностной частот. Исследована зависимость эффекта от мощностей взаимодействующих волн и расстояния взаимодействия. Проведена оценка параметра нелинейного взаимодействия поверхностных волн.

Изучение нелинейного распространения упругих поверхностных волн началось сравнительно недавно [1, 2]. К настоящему времени установлено, что при распространении поверхностных волн в кристаллах кварца и ниобата лития происходит эффективная генерация второй гармоники [2, 3, 4] и образование волн комбинационных частот [5].

В данной работе приводятся результаты экспериментального изучения коллинеарного взаимодействия упругих поверхностных волн, распространяющихся в направлении оси  $y$  кварца  $x$ -среза. Возбуждение и прием поверхностных волн производился с использованием пьезоэлектрических противофазных преобразователей.

Согласно [6] при распространении поверхностной волны вдоль оси  $y$  кварца имеется отличный от нуля угол между фазовой и групповой скоростью волны. Величина этого угла экспериментально может быть определена по смещению пучка поверхностных волн от направления  $y$ , в данном случае она равна  $-8^\circ$ . Поэтому для того, чтобы два пучка поверхностных волн, излучаемые преобразователями сигнала и накачки с частотами  $f_c$  и  $f_n$  соответственно в направлении оси  $y$  распространялись параллельно и непрерывно при этом взаимодействовали, оба эти преобразователя, а также приемный преобразователь, работающий на частоте  $f_k$ , располагались на одной прямой под углом  $-8^\circ$  к оси  $y$  (рис. 1).

Взаимодействующие поверхностные волны возбуждались преобразователями сигнала и накачки, которые изготовлялись непосредственно на поверхности кварцевого образца и содержали по 30 пар электродов длиной 8 мм, и периодом 145 и 75 мк. При фазовой скорости поверхностных волн в направлении оси  $y$   $-3,25 \cdot 10^5$  см/сек основные частоты этих преобразователей составляли 22,5 и 44 мГц. Приемный преобразо-

ватель, период решетки которого  $50 \text{ мк}$ , настраивался на суммарную частоту  $f_k = 66,5 \text{ мгц}$ . На излучающие преобразователи сигнала и накачки подавались электрические импульсы соответствующих частот мощностью порядка  $1 \text{ вт}$  и длительностью  $1-10 \text{ мксек}$ . Для подавления отражений поверхностных волн боковые стороны кварцевой пластинки покрывались поглотителем (слой пищеина). Одновременное

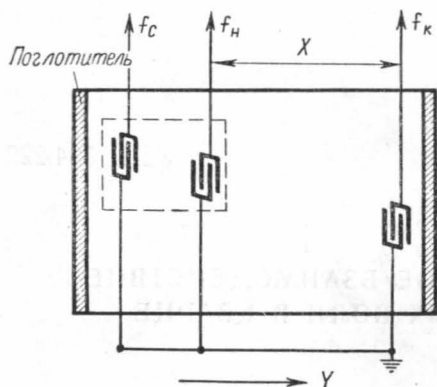


Рис. 1. Схема расположения преобразователей на поверхности образца

распространение акустических импульсов к приемному преобразователю достигалось введением задержки электрического импульса накачки относительно сигнала на время распространения поверхностной волны между преобразователями сигнала и накачки. При выполнении этого условия приемный преобразователь регистрировал появление поверхностной волны суммарной частоты. Помещая на поверхности образца в различных точках на пути распространения поверхностных волн каплю эфира, убедимся, что результирующая волна исчезает при перекрытии любого из взаимодействующих пучков поверхностных волн. Расстояние между центрами излучающих преобразователей было

равно  $30 \text{ мм}$ , при этом оптимальное время задержки импульса накачки изменялось от  $9$  до  $12 \text{ мксек}$  при различной длительности взаимодействующих импульсов. Такое изменение оптимальной задержки объясняется искажением формы акустических импульсов при излучении, протяженным в направлении распространения преобразователем. Акустические мощности поверхностных волн оценивались по измерениям электрической мощности входных сигналов и потерь на излучение. Для определения потерь при генерации поверхностных волн противофазным преобразователем предварительно измерялась величина потерь на двойное преобразование при использовании идентичных преобразователей в качестве излучателя и приемника. Половину этой величины составляют потери на излучение, зная которые нетрудно подсчитать акустическую мощность волны. Полученное таким образом значение акустической мощности поверхностной волны суммарной частоты равно  $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ вт}$  при расстоянии взаимодействия  $X = 40 \text{ мм}$  и акустической мощности сигнала  $6 \cdot 10^{-3} \text{ вт}$  и накачки  $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ вт}$ .

Для исследования зависимости амплитуды образованной поверхностной волны от величины расстояния взаимодействия  $X$  схема эксперимента несколько изменялась.

Оба излучающих преобразователя в этом случае изготовлялись на внутренней поверхности стеклянной пластины (на рис. 1 пунктир). Хотя при этом потери на преобразование увеличиваются в среднем на  $5-10 \text{ дб}$ , перемещая пластину по поверхности образца вдоль пучка распространяющихся волн, можно плавно изменять расстояние взаимодействия поверхностных волн сигнала и накачки.

Частота поверхностной волны сигнала  $f_c$  была равна  $11,5 \text{ мгц}$ . Преобразователь сигнала работал в непрерывном режиме.

Приемный преобразователь, рассчитанный на частоту  $f_k = 44 \text{ мгц}$ , наносился, как и прежде, на поверхность кварцевого образца. Используя поочередно два преобразователя поверхностных волн накачки с

частотами  $(f_n)_1 = 32,5$  мГц и  $(f_n)_2 = 55,5$  мГц, мы имели возможность наблюдать генерацию поверхностных волн суммарной  $f_k^+ = f_c + (f_n)_1$  и разностной  $f_k^- = (f_n)_2 - f_c$  частот.

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды выходного сигнала приемного преобразователя  $V_k^\pm$  от расстояния взаимодействия  $X$ . Из графиков видно, что амплитуда смещений поверхностных волн суммарной и разностной частот, полученных в результате взаимодействия волн сигнала и накачки, линейно возрастает с увеличением расстояния взаимодействия.

Подобные зависимости характерны для сред с малым затуханием, когда эффекты нелинейного искажения или взаимодействия преобла-

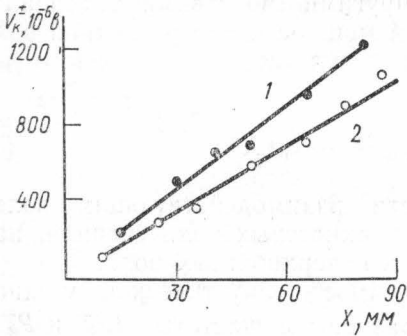


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения приемного преобразователя разностной (1) и суммарной (2) частоты от расстояния взаимодействия.  $1 - p_c \cdot p_n = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $2 - p_c \cdot p_n = 1,1 \cdot 10^{-4}$  вТ<sup>2</sup>

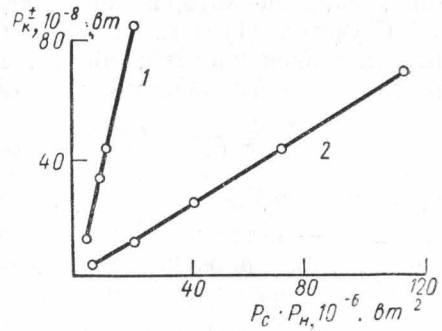


Рис. 3. Зависимость акустической мощности поверхностных волн разностной (1) и суммарной (2) частоты от величины произведения акустических мощностей взаимодействующих волн. Для обоих прямых  $X = 80$  мм

дают над потерями при распространении волн. Поэтому в условиях нашего эксперимента вполне оправданно пренебречь затуханием поверхностных волн.

Полагая, что взаимодействие упругих поверхностных волн подчиняется общим закономерностям взаимодействий «объемных» фононов [7], получаем выражение для амплитуды образующейся поверхностной волны суммарной частоты:

$$(u_0)_k^+ = \frac{\Gamma}{4} (u_0)_c (u_0)_n k_c k_n X. \quad (1)$$

Здесь  $(u_0)_c$ ,  $(u_0)_n$  — амплитуды поверхностных волн сигнала и накачки у излучателя<sup>1</sup>,  $k_c$  и  $k_n$  — волновые числа поверхностных волн сигнала и накачки соответственно. Коэффициент  $\Gamma$ , характеризующий эффек-

<sup>1</sup> Амплитуда поверхностной волны  $u_0$  определяется из общего выражения для смещений в поверхностной волне, распространяющейся вдоль оси  $y$  кварца  $x$ -среза:

$$\bar{u} = \sum_{n=1}^3 u_0 \bar{u}_n \exp [j(\omega t - ky - \beta_n kx)].$$

Здесь  $\beta_n$  — постоянные затухания смещений по глубине, а  $\bar{u}_n$  — относительные величины векторов смещений неоднородных волн, составляющих поверхностную волну.

тивность взаимодействия, определяется нелинейными свойствами исследуемого материала, в частности, он зависит от упругих модулей второго и третьего порядков кварца.

Запишем формулу (1) таким образом, чтобы в нее входили величины акустических мощностей поверхностных волн, которые наиболее удобно определять экспериментально. Для этого представим выражение акустической мощности поверхностной волны [8] следующим образом:

$$P = a\omega u_0^2, \quad (2)$$

где  $u_0$  — амплитуда поверхностной волны,  $\omega$  — частота поверхностной волны,  $l$  — ширина излучающего преобразователя,  $a$  — постоянная величина, значение которой определяется упругими свойствами материала.

С учетом (1) и (2) для акустической мощности поверхностной волны суммарной частоты, образующейся в результате коллинеарного нелинейного взаимодействия, получим

$$P_k^+ = \left(\frac{\Gamma}{4}\right)^2 \frac{l_k}{acl_c l_n} P_c P_n k_c k_n (k_c + k_n) X^2. \quad (3)$$

Здесь  $P_c$  и  $P_n$  — акустические мощности взаимодействующих волн,  $l_c$ ,  $l_n$  и  $l_k$  — значения ширины пучков поверхностных волн сигнала, накачки и суммарной частоты,  $c$  — скорость поверхностных волн.

Полученные экспериментально зависимости акустической мощности поверхностных волн суммарной и разностной частоты ( $P_k^+$  и  $P_k^-$ ) от величины произведения  $P_c P_n$  приводятся на рис. 3. Как видно, при фиксированном значении расстояния взаимодействия  $X$  отношение  $P_k(X)/P_c P_n$  остается постоянным для волн суммарной и разностной частот (согласно формуле (1)) и определяется величиной тангенса угла наклона прямых к оси абсцисс. Несколько большее значение этого отношения для волны разностной частоты может, по-видимому, объясняться более высоким значением частоты накачки ( $f_n$ ).

Данные рис. 2 и 3, а также результаты, полученные выше для взаимодействия поверхностных волн с частотами 22,5 и 44 мГц в импульсном режиме, позволяют по формуле (3) оценить величину параметра  $\Gamma$ .

Необходимое для такой оценки значение постоянной  $a$  определялось численным расчетом по известным величинам относительных смещений в поверхностной волне для кварца  $x$ -среза [9] и оказалось равным  $2,2 \cdot 10^5$  вт·сек/см<sup>3</sup>. Нормировка векторов смещений  $\bar{u}_n$  при этом выбиралась таким образом, чтобы величина  $u_0$  представляла собой амплитуду смещения в направлении оси  $y$ -кварца на поверхности образца.

Для обоих экспериментов значения параметра  $\Gamma$ , определенные из (3), оказываются практически совпадающими и равными  $0,8 \pm 0,4$ . Полученная величина нелинейного параметра кварца для поверхностных волн достаточно хорошо совпадает с рассчитанным в [2], исходя из данных для модулей упругости второго и третьего порядков кварца, значением  $\Gamma = 0,72$ .

Автор благодарен В. А. Красильникову и В. Е. Лямову за руководство работой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rischbieter F. *Acoustica*, **18**, 109, 1967.
2. Løren P. O. *J. Appl. Phys.*, **39**, No. 12, 5400, 1968.
3. Lean E. G., Tseng C. C., Powell C. G. *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 32, 1970.

4. Красильников В. А., Лямов В. Е., Солодов И. Ю. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроф., **11**, № 4, 470, 1970.
5. Lean E. G., Powell C. G., Kuhn L. Appl. Phys. Lett., **15**, No. 1, 10, 1969.
6. Coquin G. A., Tiersten H. F. J. Acoust. Soc. Am., **41**, No. 4, 921—939, 1967.
7. Moriamez M., Thery P., Bridoux E., Dellanoy M. Com. Rend., **268B**, 589, 1969.
8. White R. M. IEEE Trans. El. Dev., **ED-14**, 181, 1967.
9. Ingebrigtsen K. A., Tønning A. Appl. Phys. Lett., **11**, No. 9, 273, 1967.

Поступила в редакцию  
3.12 1970 г.

Кафедра  
акустики