

В. А. КРАСИЛЬНИКОВ, В. Е. ЛЯМОВ, И. Ю. СОЛОДОВ

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В КВАРЦЕ

Поскольку упругая волна Рэлея локализуется лишь в тонком слое вблизи поверхности, плотность упругой энергии в такой волне при прочих равных условиях больше, чем в объемной волне. Дисперсии же волны Рэлея не имеют. Поэтому нелинейные явления, в том числе генерация гармоник, благодаря нелинейным свойствам среды должны проявляться заметно при распространении таких волн.

Распространение поверхностных волн конечной амплитуды экспериментально изучалось в [1]. В этой работе были получены некоторые данные по генерации второй акустической гармоники для поверхностных волн в стали и алюминии. В [2] проведен теоретический анализ и получены некоторые экспериментальные результаты по генерации второй гармоники в монокристаллах кварца. Решением уравнения движения для поверхностных волн конечной амплитуды в кварце с учетом граничных условий на свободной поверхности в [2] получено следующее выражение для амплитуды смещения второй гармоники  $u_2(x)$ :

$$u_2(x) = u_1^2(0) k^2 x, \quad (1)$$

где  $u_1(0)$  — амплитуда волны основной частоты у излучателя ( $x=0$ ),  $k$  — волновое число для основной волны. Имеющийся в этом выражении численный коэффициент получен расчетом, исходя из данных для модулей упругости второго и третьего порядка для кварца в направлении оси  $y$ .

Нами экспериментально исследовалась генерация второй гармоники при распространении поверхностных волн в направлении оси  $y$  монокристалла кварца  $x$  — среза. Образец имел форму прямоугольной пластины размером  $160 \times 60 \times 5$  мм<sup>3</sup> с осью  $x$  кварца перпендикулярной плоскости пластины и осью  $y$  вдоль большей стороны.

Возбуждение поверхностной волны проводилось в импульсном режиме на основной частоте 11 мГц при помощи клинового преобразователя, на который подавался электрический сигнал максимальной мощностью около 20 вт, при эффективном напряжении на кварце порядка 200 в. Для приема поверхностной волны использовался пьезоэлектрический переменноразовый преобразователь, период решетки которого (полоски алюминия толщиной 0,5 мк, длиной 8 мм и шириной 70 мк) соответствовал длине поверхностной волны и составлял  $3 \cdot 10^{-2}$  см на основной частоте и соответственно в два раза меньшую величину на частоте второй гармоники. Приемные преобразователи, содержавшие 20 периодов решетки, изготовлялись на стеклянной пластине (толщина 2 мм, длина 30 мм, ширина 20 мм) и могли свободно перемещаться на поверхности образца. Ввиду отсутствия переходных акустических слоев обеспечивалась высокая точность определения относительной амплитуды сигнала. Потери на одно преобразование составляли для клина 40 дБ, для переменноразовых преобразователей на частотах 11 и 22 мГц, 40 и 45 дБ, соответственно.

При сравнительно высоких потерях на преобразование для поверхностных волн полная акустическая мощность сигнала основной частоты оказалась равной  $2 \cdot 10^{-3}$  вт.

В работе [3] для изотропного тела было показано, что акустическая энергия поверхностной волны при удалении от поверхности достигает максимума и убывает почти до нуля на расстоянии порядка одной длины волны. Распространяя данное положение на случай монокристалла кварца, получим оценку для максимальной плотности акустической энергии волны Рэлея  $0,5$  вт/см<sup>2</sup>.

Поверхностная волна, распространяющаяся в направлении оси  $y$  в плоскости  $yz$  кварца, соответствует обобщенно-релеевскому типу волн и может быть представлена в виде суперпозиции трех парциальных волн. Расчет компонентов вектора потока энергии для такой волны показывает, что в этом случае направления фазовой и групповой скоростей поверхностной волны не совпадают, и угол между ними составляет величину порядка  $-10^\circ$  [4]. Таким образом, пучок поверхностных волн при распространении вдоль оси  $y$  кварца должен отклоняться на определенный угол от первоначального направления<sup>1</sup>.

Для экспериментального определения этого угла снимались поперечные (в направлении оси  $z$ ) разрезы звукового поля на различных расстояниях от излучателя. Изме-

<sup>1</sup> На это в [2] не было обращено внимания.

ренный таким образом угол отклонения поверхностной волны от направления  $y$  оказался равным  $11^\circ$ .

На рис. 1 приводятся зависимости амплитуды второй гармоники от расстояния между преобразователями, снятые при перемещении приемного преобразователя с основной частотой 22 мГц под углом  $-11^\circ$  к оси  $y$  кварца, для различных значений входного электрического сигнала. Характерно, что при этом перемещении направление полосок электродов приемного преобразователя, а следовательно, и фронт волны остается все время перпендикулярным оси  $y$ . Поэтому фазовая скорость и волновой вектор совпадает с осью  $y$ , и распространение поверхностной волны определяется характеристиками кристалла в этом направлении.

Как видно, амплитуда второй гармоники практически линейно возрастает с увеличением расстояния и достигает некоторого насыщения при  $x \geq 10$  см. Следует отметить, что в [2] максималь-

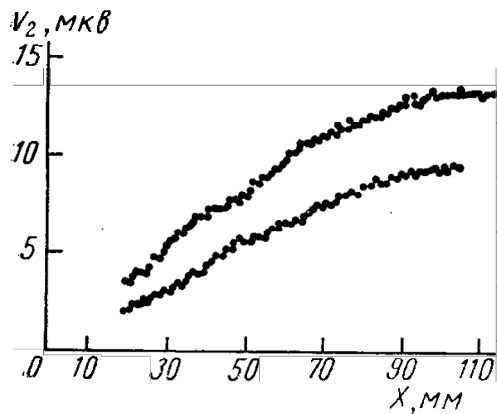


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала второй гармоники от расстояния между преобразователями

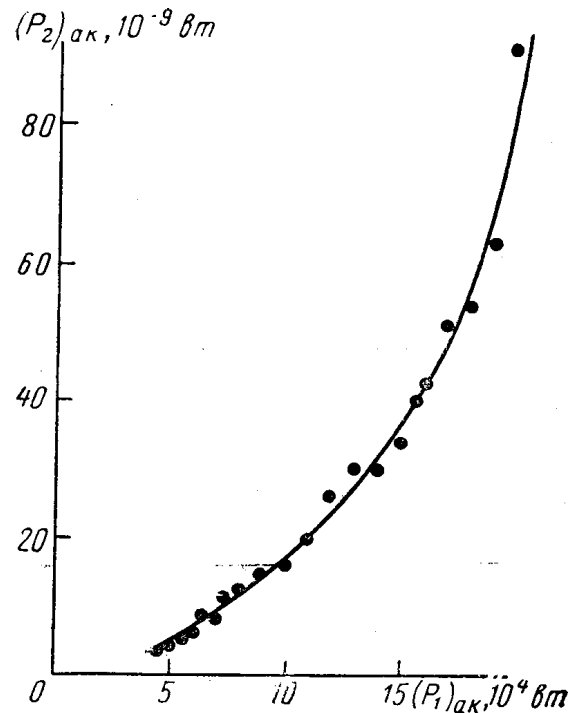


Рис. 2. Зависимость акустической мощности второй гармоники от мощности волны основной частоты

ное расстояние по оси  $y$  было 22 мм, и поэтому в этой работе не было достигнуто состояние стабилизации.

На рис. 2 показана зависимость акустической мощности второй гармоники от мощности сигнала основной частоты. Эта зависимость хорошо описывается формулой

$$p_2 = 2,5 \cdot 10^{-4} p_1^2 x^2, \quad (2)$$

численный коэффициент в которой имеет размерность  $1/\text{Вт см}^2$  и получен из (1) с учетом выражений для акустических мощностей. Данные рис. 2 позволяют получить нелинейное искажение волны, характеризуемое отношением  $u_2/u_1$ . Значение этого отношения для акустической мощности первой гармоники  $p_1 \sim 2 \cdot 10^{-3}$  Вт и  $x = 10$  см равно  $5 \cdot 10^{-3}$  и изменяется линейно в зависимости от входного напряжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rischbieter F. *Acoustica*, 18, 109, 1967.
2. Loren P. O. *J. Appl. Phys.*, 39, No. 12, 5400, 1968.
3. Викторов И. А. Реферат кандид. диссертации. М., Акустический ин-т АН СССР, 1958.
4. Coquin G. A., Tiersten H. F. *J. Acoust. Soc. Am.* 41, No. 4, part 2, 921—939, 1967.

Поступила в редакцию  
5.2 1970 г.

Кафедра  
акустика