АКУСТИКА

УДК 534.222

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Ф. М. Северин, И. Ю. Солодов, Ю. Н. Шкуланов

(кафедра акустики)

Экспериментально обнаружены нелинейные эффекты генерации второй гармоники и взаимодействия акустических волн при отражении звука от границы раздела твердых тел. Показано, что нелинейность границы ведет к эффективной генерации сдвиговых гармоник в изотропных телах.

Теоретические исследования эффекта генерации второй гармоники при отражении объемных акустических волн (ОАВ) на границах раздела твердых тел [1] показали, что наличие границы раздела может существенно увеличить эффективность нелинейных процессов. Однако экспериментальные подтверждения наличия нелинейных явлений при отражении звука, насколько известно авторам, в литературе отсутствуют. В настоящей работе сообщается о наблюдении эффектов генерации второй гармоники и взаимодействия ОАВ при отражении от границы раздела твердых тел, находящихся в акустическом контакте между собой.

Экспериментальные исследования генерации второй гармоники проводились для сдвиговых ОАВ вертикальной поляризации, отражающихся от границы стеклянной подложки. Возбуждение и прием ОАВ на основной частоте $\omega/2\pi=5$ МГц и второй гармонике (10 МГц) осуществлялись полуволновыми преобразователями из пьезокерамики и *YX*-кварца. Потери на излучение и прием составляли 7 и 20 дБ соответственно. Угол падения основной ОАВ на границу раздела выбирался равным 50°, что соответствует закритическому отражению продольной ОАВ, при котором эффективность генерации гармоники, согласно расчетам [1], значительно возрастает. На излучающий преобразователь ОАВ подавались радиоимпульсы длительностью 2—3 мкс с частотой заполнения 5 МГц и амплитудой напряжения до 20 В. Импульс отраженной ОАВ на частоте второй гармоники после усиления резонансным усилителем (полоса 2 МГц, $K_{ус}\simeq 55$ дБ) регистрировался на экране осциллографа.

При отражении ОАВ от свободной границы стекла сигнал второй гармоники не наблюдался. После помещения на поверхность подложки в область следа звукового пучка образцов различных нелинейных материалов (CdS, $LiNbO_3$) на экране осциллографа возникала серия отраженных импульсов второй гармоники. При этом требовалась оптическая полировка граничащих поверхностей, а акустический контакт вдоль границы раздела достигался плотным прижатием образцов к подложке. Использование даже тонких слоев жидкостей для создания акустического контакта приводило к значительному уменьшению амплитуды отраженной второй гармоники. Наиболее эффективная генерация второй гармоники при отражении наблюдалась для образцов CdS (ось *c* перпендикулярна границе). Наблюдаемая при этом релаксационная зависимость амплитуды второй гармоники от проводимости образца σ (рис. 1) типична для пьезополупроводников с концентрационной нелинейностью [2]; она показывает, что акустическая нелинейность границы раздела действительно определяется нелинейными свойствами отражающей среды. Нелинейность отражения также подтверждается динамическими характеристиками для отраженных волн основной частоты и второй гармоники, представленными на рис. 2. Согласно данным рис. 1 и 2, отраженная вторая гармоника обусловлена квадратичной деформацией приграничной области нелинейного материала под действием падающей волны основной частоты. Для такого механизма нелинейного отражения соотношение между амплитудами второй гармоники $U_{2\omega}$ и основной волны U_ω можно записать в виде [1]

$$U_{2\omega}=\frac{\Gamma_{отр}}{2}kU_\omega^2, \qquad (1)$$

где k — волновое число основной волны, а $\Gamma_{отр}$ — эффективный нелинейный параметр, величина которого определяется линейными и нелинейными свойствами граничащих сред и зависит от углов падения и преломления ОАВ на границе [1]. Обозначая деформации в отраженных ОАВ $S_{2\omega}$, S_ω, из (1) получаем, что параметр $\Gamma_{отр}=$

$=S_{2\omega}/S_{\omega}^2$ и, следовательно, имеет смысл нелинейного коэффициента отражения второй гармоники. Эта величина не зависит от амплитуды и частоты основной волны и может использоваться для количественной оценки акустической нелинейности границы раздела.

Для экспериментального определения нелинейного коэффициента отражения величины деформаций $S_{2\omega}$, S_{ω} рассчитывались по измерениям электрических мощностей импульсов и потерь на преобразование. Высокая эффективность отражения для образцов CdS ($\Gamma_{отр}=900\pm100$) обусловлена концентрационной нелинейностью пьезополупроводниковых кристаллов; при этом амплитуда второй гармоники достигала 0,2% от амплитуды основной волны при акустической мощности $P_{\omega}=0{,}18$ Вт. Для кристаллов $LiNbO_3$ акусти-

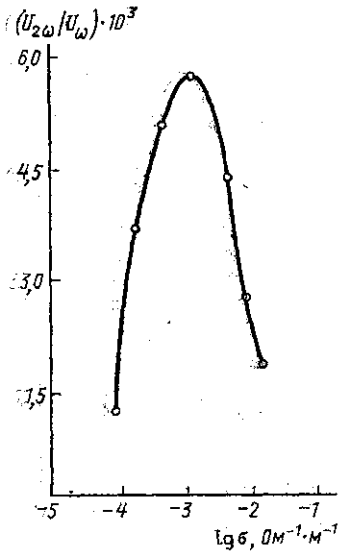

Рис. 1. Зависимость амплитуды второй гармоники от проводимости образца

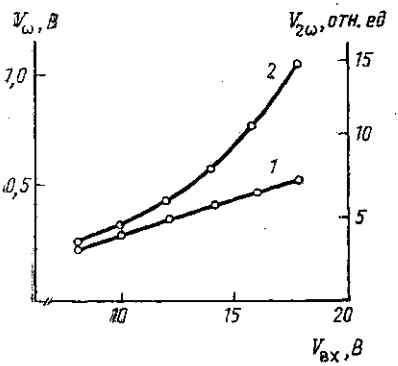

Рис. 2. Зависимость амплитуд сигналов основной частоты (*1*) и второй гармоники (*2*) от напряжения основной частоты на входном преобразователе

ческая нелинейность, определяемая упругим и пьезоэлектрическим механизмами, значительно ниже, чем в пьезополупроводниках [3], однако нелинейное отражение весьма эффективно ($\Gamma_{отр}=800\pm100$), поскольку реализуется в комбинации материалов «медленный—быстрый» в условиях, близких к полному внутреннему отражению [1]. Высокое нелинейное отражение наблюдалось также для пары образцов стекла с близкими акустическими характеристиками ($\Gamma_{отр}=120\pm20$). Это может быть связано с вкладом нелинейности контакта прижатых поверхностей образцов, а также с влиянием приграничных локальных напряжений, что подтверждается зависимостью нелинейного отражения от качества контакта материалов в этом случае: амплитуда основной отраженной ОАВ убывает, а второй гармоники — возрастает при увеличении усилия прижима образцов.

При высоком нелинейном отражении граница раздела может быть использована для реализации и других акустических нелинейных эффектов. Нами исследовалась возможность наблюдения взаимодействия неколлинеарных ОАВ с образованием волны суммарной частоты на границе. Если две сдвиговые ОАВ равных частот падают на границу под равными углами с противоположных сторон по отношению к нормали, то результатом их взаимодействия может быть ОАВ удвоенной частоты, генерируемая перпендикулярно границе. В эксперименте использовались две последовательности мощных радиоимпульсов ($V\simeq150$ В, длительность 2—5 мкс, $\omega/2\pi=18$ МГц) с регулируемой задержкой друг относительно друга. При задержке импульсов на излучающих преобразователях, соответствующей встрече основных ОАВ в области нелинейной границы (стекло — CdSe), приемный преобразователь регистрировал серию сдвиговых ОАВ удвоенной частоты (36 МГц), отраженных от гра-

ниц образцов (рис. 3). Для амплитуд импульсов серии наблюдалась зависимость от проводимости CdSe, аналогичная изображенной на рис. 1, что указывает на концентрационный механизм генерации волны суммарной частоты в результате нелинейной деформации приграничной области CdSe. Экспериментальные оценки возникающих деформаций дают значение нелинейного коэффициента отражения (взаимодействия) волн суммарной частоты в этом случае: $\Gamma_{вз}=20\pm2$. Отметим, что указанный эффект взаимодействия реализует операцию свертки сигналов ОАВ основной частоты «чисто» акустическим способом. Эффективность такого конвольвера с акустическим выходом по данным эксперимента составляет $C=10\lg(P_{2\omega}/P_{\omega}^2)=-95$ дБ/мВт.

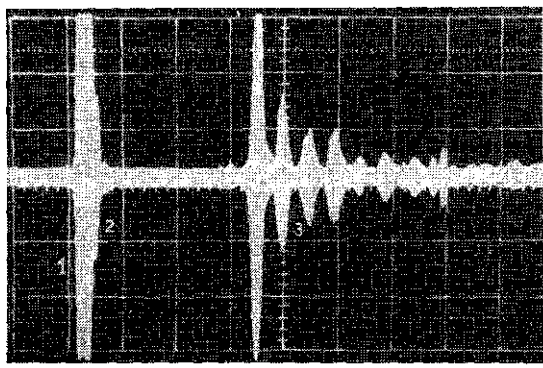

Рис. 3. Осциллограмма импульсов удвоенной частоты (*3*), возникающих в результате взаимодействия импульсов ОАВ равных частот (*1*, *2*)

Таким образом, обнаруженная нелинейность акустического отражения дает возможность наблюдения широкого класса нелинейных эффектов взаимодействия упругих волн на границах раздела твердых тел и может быть использована для практической реализации нелинейных устройств обработки сигналов и новых методов акустической диагностики поверхности твердых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Shui Y., Solodov I. Yu.//Proc. II Acoust. Conf. WESTPA. Hong Kong. 1985. B1-6. P. 188. [2] Можаев В. Г., Солодов И. Ю.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1980. **21**, № 4. С. 46. [3] Лямов В. Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М., 1983.

Поступила в редакцию
02.03.88