TOM 37

1991

Вып. 6

УДК 534.222 © 1991 г.

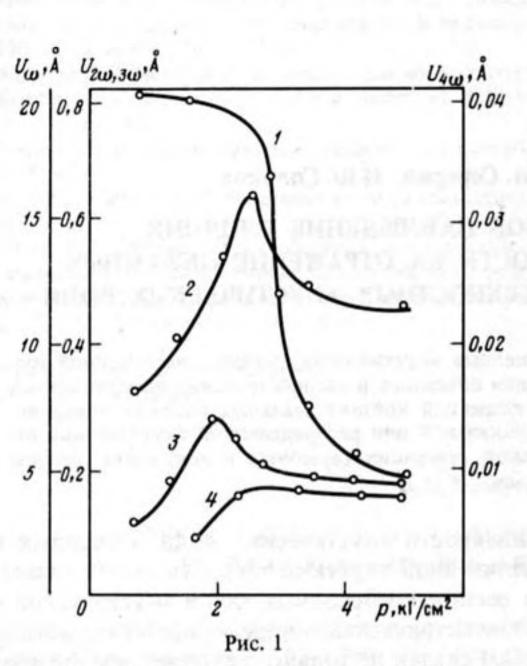
Ко Сел Лен, Ф.М. Северин, И.Ю. Солодов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ОТРАЖЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Экспериментально изучаются нелинейные акустические свойства несклеенной границы раздела твердых тел при отражении объемных и распространении поверхностных акустических волн. Обнаружено, что поджатый контакт реальных плоских поверхностей тел может служить источником локальной или распределенной акустической нелинейности, приводящей к эффективной генерации гармоник и искажению формы профиля объемных и поверхностных волн.

Исследования различных типов нелинейности акустических волн в твердых телах начались одновременно с появлением нелинейной акустики твердого тела в начале 60-х годов. К настоящему времени изучено несколько основных типов акустической нелинейности твердых тел: решеточная, пьезоэлектрическая, концентрационная, магнитоупругая [1]. Интерес к этим исследованиям связан не только с выяснением физических механизмов взаимодействия волновых полей различной природы, но и с повышением эффективности нелинейных устройств обработки сигналов, а также нуждами нелинейной акустодиагностики. В этом плане заслуживает внимания акустическая нелинейность контакта поверхностей твердых тел, которая может быть связана с движением несклеенной границы раздела ("хлопающая" нелинейность) [2], герцовской нелинейностью [3] и другими причинами. Экспериментально проявления подобной, так называемой контактной нелинейности для реальных плоских границ раздела отмечались в [4, 5]. В данной работе впервые сообщается об экспериментальном исследовании акустических свойств несклеенной границы раздела твердых тел при отражении объемных и распространении поверхностных акустических волн.

В эксперименте использовалась схема нелинейного отражения сдвиговых волн вертикальной поляризации [5], падающих под углом 45° на поверхность стеклянной подложки. Их возбуждение осуществлялось полуволновыми кварцевыми преобразователями с основной частотой 19,8 МГц, на которые подавались радиоимпульсы соответствующей частоты длительностью 1-3 мкс и амплитудой до 700 В. Для шигокополосного приема отраженной волны применялся электродинамический преобразователь [6], представляющий собой алюминиевый электрод шириной 1-2 мм и толщиной ~ 1000 Å, напыленный на соответствующую грань подложки. Область контактной нелинейности создавалась при помещении стеклянного образца на поверхность подложки в области отражения звукового пучка. Контактирующие поверхности подложки и образца оптически полировались, тщательно очищались и прижимались друг к другу с усилием, контролируемым с помощью динамометра. Подложка с прижатым к ней образцом помещалась в однородное магнитное поле с индукцией ~ 1 Тл, ориентированное перпендикулярно плоскости приемной грани, что позволяло регистрировать импульсы электрического напряжения, возникающего на концах электродов преобразователя. После усиления широкополосным усилителем ( $\mathcal{K}_{yc} \gg 25$  дБ,  $\Delta f = 0.005-400$  МГц) их можно было наблюдать на экране осциллографа. Набором резонансных усилителей  $(\mathcal{H}_{yc} > 30-50 \text{ дБ}, \Delta f \simeq 5 \text{ МГц})$  из этого сигнала можно было выделять высшие гармо-



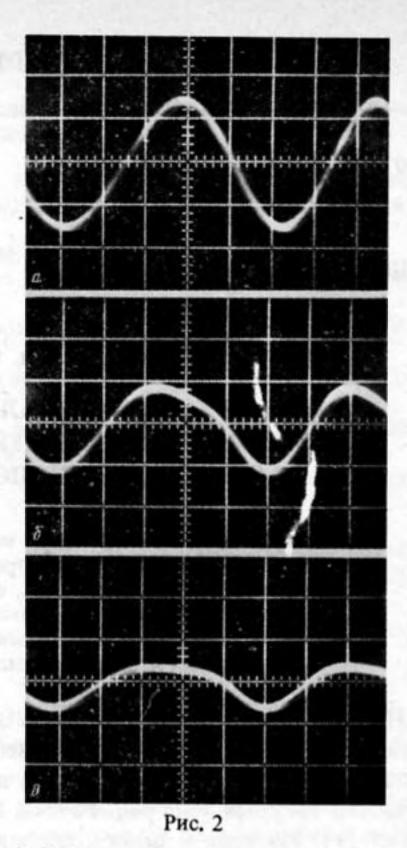


Рис. 1. Зависимости амплитуд основной (1) и высших (2, 3, 4) гармоник отраженных сдвиговых волн от давления прижима образца к подложке

Рис. 2. Искажение формы гармонической SV-волны, отраженной от области контактной нелинейности:  $a-p=0,2; \ \delta-2,4; \ s-3,5 \ \kappa]$  /см<sup>2</sup>

ники, амплитуды которых также регистрировались на осциллографе. Измерения амплитуд импульсов при заданной величине магнитного поля позволяли определять абсолютные величины колебательной скорости и смещения отдельных спектральных компонент отраженного поля.

По такой методике проводились наблюдения отраженных от границы стекло—стекло основной волны и высших гармоник (вплоть до четвертой) при различных давлениях прижима образцов (рис. 1). Из рисунка видно, что возрастание амплитуд гармоник начинается в области открытого зазора между телами ( $p < 2 \ \mbox{к} \Gamma/\mbox{cm}^2$ ), когда амплитуда отраженной волны основной частоты велика и практически не изменяется. При этом очевидно, что контакт образца и подложки осуществляется лишь на отдельных участках в вершинах микрошероховатостей их поверхностей. Оптимальные условия развития контактной акустической нелинейности реализуются в начальной фазе перехода зазора из открытого состояния в закрытое, когда значительно увеличивается число контактных вершин шероховатостей, но каждый микроконтакт лишь слегка поджат, о чем свидетельствует незначительное уменьшение амплитуды основной отраженной волны. При дальнейшем увеличении давления ( $p \gg 3 \ \mbox{к} \Gamma/\mbox{cm}^2$ ) контактная область окончательно закрывается и поэтому обеспечивает линейный акустический контакт между телами, что сопровождается резким уменьшением амплитуды основной отраженной волны, вследствие прохождения падающей волны в образец.

Следует отметить также, что величины амплитуд всех гармоник находятся практически в пределах одного порядка, что существенно отличает контактную акустическую нелинейность от материальной (решеточной) нелинейности твердых тел. Высокий

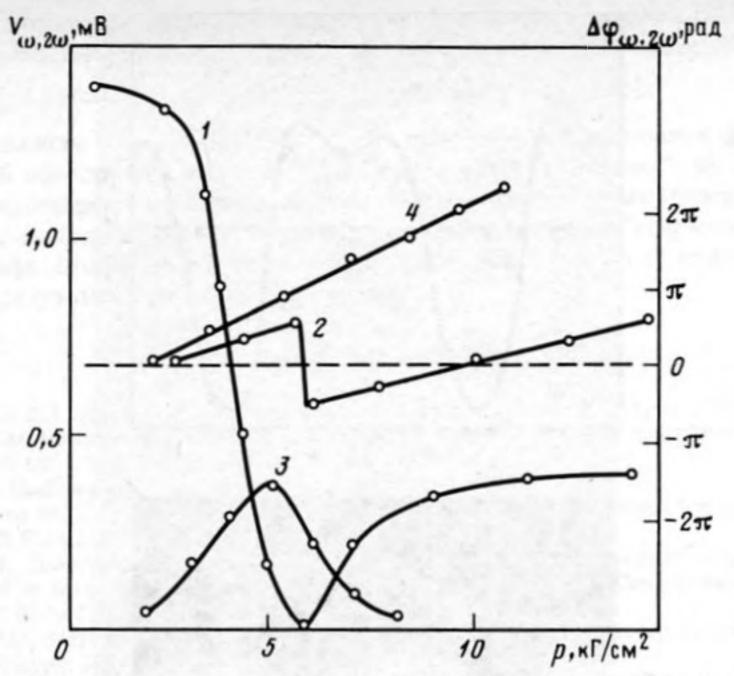


Рис. 3. Зависимости амплитуд и сдвига фаз первой (соответственно 1 и 2) и второй (3 и 4) гармоник ПАВ, прошедшей через область контактной нелинейности от давления

абсолютный уровень гармоник в отраженной волны ( $U_{2\omega}/U_{\omega} \sim 10\%$ ) должен приводить к нелинейным изменениям ее формы. Возникающее искажение выходного сигнала электродинамического преобразователя, соответствующее нелинейным искажениям профиля колебательной скорости в отраженной волне, можно наблюдать непосредственно на осциллографе. Рисунок 2 содержит несколько таких осциллограмм, соответствующих различным давлениям прижима образца к подложке. Видно, что с увеличением давления возрастает несимметрия верхнего и нижнего полупериодов, проявляющаяся как в изменении их амплитудных значений, так и в различии длительностей. Верхний полупериод соответствует движению поверхности подложки "внутрь" ее объема, т.е. процессу раскрытия зазора. Поэтому полученный профиль волны отражает медленное раскрытие зазора и быстрое его закрытие, что соответствует особенностям "хлопающей" нелинейности границы раздела, отмеченным в [2].

Описанные выше закономерности характерны для локальной контактной нелинейности при вертикальной поляризации акустического поля, имеющей место для 45-градусного отражения SV-волн. Более общий случай распределенной контактной нелинейности может быть реализован с использованием поверхностных акустических волн (ПАВ), обладающих к тому же не только нормальной, но и тангенциальной компонентами смещений. Изучение нелинейных эффектов для ПАВ в условиях контактной нелинейности проводилось в подложке YZ-LiNbO3 с нанесенными на ее поверхность встречно-штыревыми преобразователями на частоту 15 МГц, на которые подавались импульсы электрического напряжения соответствующей частоты амплитудой до 20 В. Для приема ПАВ применялся электромагнитный зонд [7], выполненный в виде иглы из вольфрама с радиусом закругления конца не более 10 мкм. Зонд обеспечивал практически точечный широкополосный прием в полосе до ~60 МГц с потерями ~ 65 дБ. Локальность приема также необходима во избежание интегрирования сигналов гармоник ПАВ, генерируемых за счет материальной нелинейности подложки в той части апертуры пучка, которая находится вне области контакта. Отметим, что диаметр контактного пятна, образующегося при поджатии полированных поверхностей образца и подложки не превышал 3 мм при апертуре пучка ПАВ  $\simeq 10$  мм.

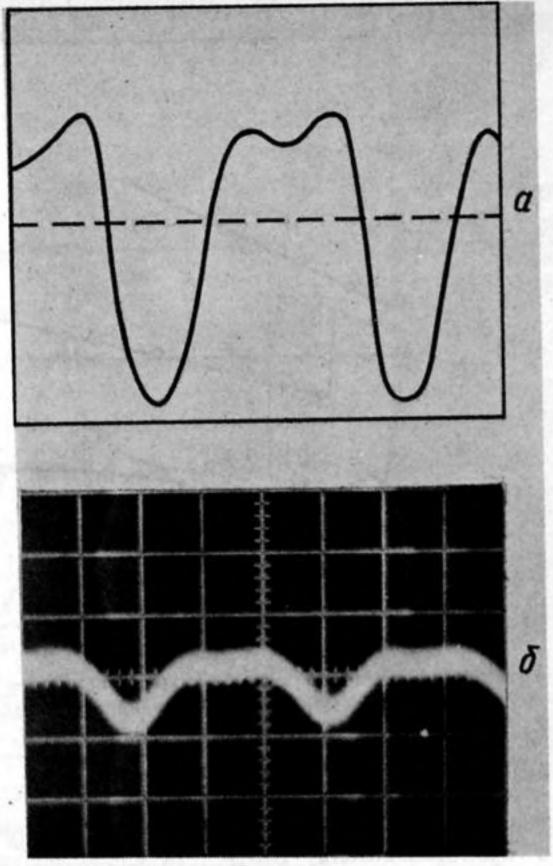


Рис. 4. Искажение формы гармонической ПАВ на контактной нелинейности при p=4,8 к $\Gamma/\text{см}^2$ : a- теория,  $\delta-$  эксперимент

Полученные экспериментально зависимости амплитуд и сдвигов фаз первой и второй гармоник ПАВ, прошедших через область нелинейного контакта, от давления прижима стеклянного образца к подложке показаны на рис. 3. Аналогично случаю объемных волн в области поджатого контакта (p < 5 кГ/см²) наблюдается эффективная генерация второй гармоники ПАВ, сопровождающаяся уменьшением амплитуды ПАВ основной частоты. При  $p > 10 \ \kappa \Gamma / \text{см}^2$  формируется закрытый контакт, о чем свидетельствует стабилизация амплитуды ПАВ основной частоты; его линейность подтверждается отсутствием ПАВ второй гармоники в этой области давлений. Однако в отличие от случая объемных волн по данным рис. З амплитуда основной волны, прошедшей через нелинейный контакт, уменьшается до нуля (при  $p \simeq 6 \ {\rm K} \Gamma/{\rm cm}^2$ ) и скачком изменяет фазу на  $\pi$ , что свидетельствует об интерференции ПАВ с дополнительной волной, возникающей в области нелинейного контакта. Поскольку, согласно нашим измерениям, скорость сдвиговой волны в образце стекла  $v_t \simeq 3.61 \cdot 10^3$  м/с выше скорости ПАВ в YZ-LiNbO<sub>3</sub> ( $v \cong 3,43 \cdot 10^3 \text{ м/c}$ ), то такая волна может быть либо связанной ПАВ в образце стекла, либо волной Стоунли на границе раздела. Детальное исследование структуры возникающих в этом случае линейных волн будет выполнено отдельно, однако ясно, что в этих условиях контактная нелинейность связана с ангармонизмом колебаний обеих поверхностей границы, и, согласно рис. 3, оказывается настолько высокой, что ведет к практически полной трансформации пограничной волны во вторую гармонику.

Полученные амплитудные и фазовые характеристики контактной нелинейности указывают на сильные нелинейные искажения формы первоначально гармонической ПАВ.

При учете только двух первых гармоник для оценки формы профиля ПАВ в условиях контактной нелинейности можно воспользоваться простым соотношением:

$$V(p,t) = V_{\omega}(p)\sin[\omega t + \Delta\varphi_{\omega}(p)] + V_{2\omega}(p)\sin[2\omega t + \Delta\varphi_{2\omega}(p)].$$

С использованием в нем данных рис. З нетрудно рассчитать временную форму выходного сигнала в области сильного нелинейного искажения ПАВ (рис. 4, a). Для экспериментального наблюдения искажения формы ПАВ, прошедшей через область контактной нелинейности, выходной сигнал зонда после широкополосного усиления наблюдался на осциллографе. Полученные при этом формы колебаний (рис. 4, б) показывают хорошее согласие результатов расчета и эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.

 Richardson J.M. Harmonic generation at an unbonded interface. I. Planar interface between semi-infinite elastic media // Int. J. Eng. Sci. 1979. V. 17. № 1. P. 73-85.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. С. 244.

 Buck O., Morris W.L., Richardson J.M. Acoustic harmonic generation at unbonded interface and fatigue cracks // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. № 5. P. 371-373.

 Северин Ф.М., Солодов И.Ю., Шкуланов Ю.Н. Экспериментальное наблюдение нелинейности отражения звука от границы раздела твердых тел // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. астрон. 1988. Т. 29. № 4. С. 94-96.

6. Михайлов И.Г., Шутилов В.А. Об абсолютных измерениях ультразвуковых полей в твердых телах // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С. 98-103.

7. Nakagawa Y., Yamanouchi K., Shibayama K. DC-effects in elastic surface waves // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. Nº 4. P. 160-162.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Поступила в редакцию 20.02.91

## Ko Sel Len, F.M. Severin, I.Yu. Solodov

## FOR BULK AND SURFACE ACOUSTIC WAVES

The results of the experimental research of nonlinear acoustic properties of nonstuck solid interface during reflection of bulk and propagation of surface acoustic waves are presented. In the experiment vertically polarized shear waves with frequency 19,8 MHz incident at 45° onto the surface of glass substrate are used. The contact acoustic nonlinearity area is formed by pressing another glass sample to the surface of the substrate. The surfaces in the contact are optically polisehed, thoroughly cleaned and pressed together by an external force. At the optimal magnitude of the force the efficient generation of four harmonics is observed. It is also accompanied by essential distortion of reflected waveform, registered with wideband electrodynamic transducer.

The influence of contact acoustic nonlinearity on surface acoustic waves is investigated for 15 MHz fundamental frequency surface wave generated with interdigital transducers in YZ-LiNbO, substrate. Similar to the bulk wave case efficient second harmonic generation for partially opened contect gap is observed accompanied by force dependent phase shifts of fundamental surface wave and its second harmonic. Surface wave distortion is observed in a good agreement with theoretical estimations.