

08

## **Нелинейное отражение поверхностных акустических волн от линии контакта твердых тел**

© Б.А. Коршак, Ю.Б. Коршак

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: jkorshak@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2007 г.

Представлены результаты экспериментального исследования нелинейных процессов, возникающих при взаимодействии поверхностных акустических волн с реальными трещиноватыми дефектами и контактной границей твердых тел. Приведены динамические характеристики для нелинейного отражения высших гармоник. Показано, что генерация третьей гармоники носит явно выраженный пороговый характер, динамические характеристики обладают гистерезисом, а эффективность нелинейного отражения зависит от длительности воздействия акустической волны на дефект. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что нелинейное отражение от контактной границы может служить адекватной моделью отражения от реального трещиноватого дефекта.

PACS: 43.25.+y

В последние годы в поле зрения исследователей попали новые типы аномально высоких нелинейностей: структурная нелинейность [1,2], гистерезисная нелинейность [3], контактная нелинейность [4], характерные для „неклассических“ материалов, в которых имеются включения, контактные границы, зерна и разнообразные дефекты сплошности, а также нанокристаллических материалов [5,6]. В таких материалах акустическая нелинейность определяется не молекулярной структурой среды, а динамикой макромасштабных элементов пространственной неоднородности — нелинейной упругостью границ зерен, контактов и дефектных включений [7]. Нелинейные свойства таких элементов и вызываемые ими нелинейные эффекты могут существенно отличаться от свойств „классических“ аналогов или даже не иметь таковых.

Помимо физического интереса в изучении „неклассических“ эффектов нелинейной акустики твердого тела такие исследования имеют

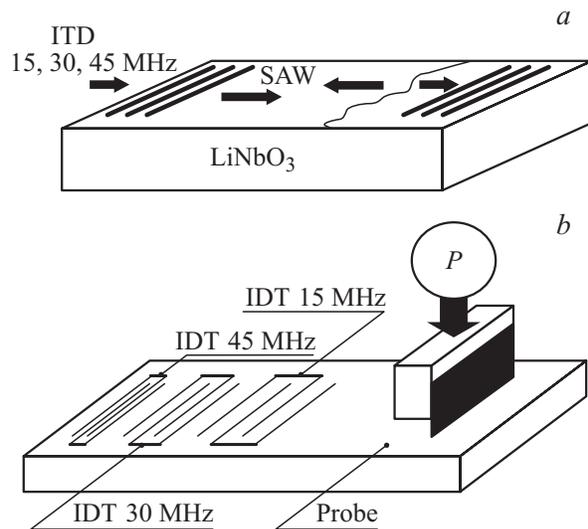
важное практическое значение, в частности в нелинейной акустодиагностике [8,9].

Большинство акустодиагностических методов и приборов основано на явлении отражения звука неоднородностями (дефектами) сплошности, информация о наличии которых обычно регистрируется в форме амплитудных или фазовых характеристик линейно отраженной волны основной частоты.

Однако отражение звука может быть существенно нелинейным и сопровождаться появлением высших гармоник или волн комбинационных частот в спектре отраженного поля. В этом случае возможно появление качественно новой информации о рассеивателе, связанной с его нелинейными акустическими свойствами. Подобные методы нелинейной отражательной акустодиагностики интенсивно развиваются в последние годы [2].

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению нелинейных эффектов, развивающихся при отражении поверхностных акустических волн (ПАВ) от трещиноватых дефектов и контактной границы твердых тел. Исследуемый тип „неклассической“ нелинейности носит название контактная акустическая нелинейность (КАН), и она характеризуется тем, что локализована в пространственной области меньшей длины акустической волны [10].

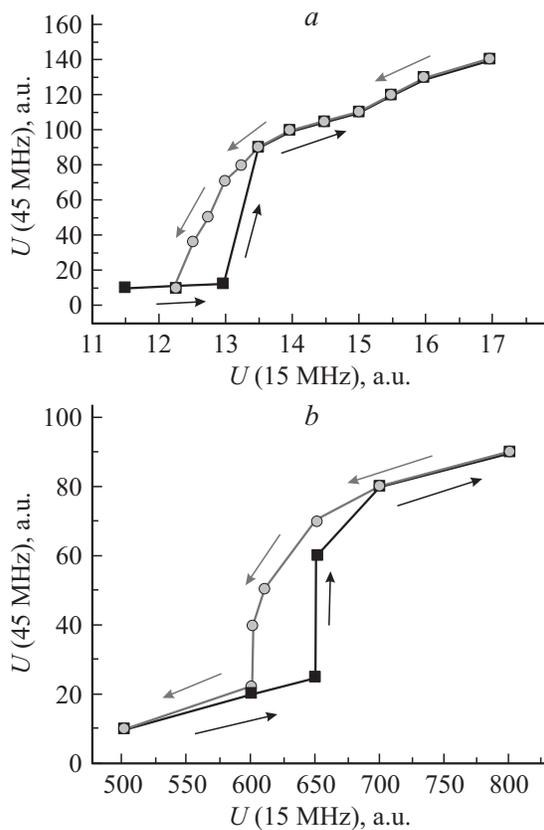
В качестве исследуемого объекта была выбрана трещина на поверхности подложки кристалла  $\text{LiNbO}_3$   $yz$ -среза (рис. 1, *a*). Образец представлял собой пластину прямоугольной формы ( $60 \times 12 \times 2$  мм). Апертура поверхностной трещины составляла около 10 мм. Трещина располагалась поперек образца и облучалась импульсами поверхностных волн длительностью 0,2–5  $\mu\text{s}$  и частотами 15, 30 и 45 МГц, возбуждение которых производилось встречно-штыревыми преобразователями (ВШП), нанесенными на поверхность кристалла. Развитие нелинейных процессов наблюдалось в поле отраженной от трещины волны. Используя различные ВШП в качестве излучателей и приемников, можно было исследовать генерацию высших гармоник и волн комбинационных частот. Кроме высших гармоник в отраженном поле наблюдалась генерация ПАВ на частотах  $\omega/2$  и  $3\omega/2$ , где  $\omega$  — частота падающей волны. На рис. 2, *a* представлена динамическая характеристика генерации ПАВ третьей гармоники. Из рисунка видно, что генерация носит явно выраженный пороговый характер. Объяснение подобного поведения динамической характеристики может быть сделано из предположения эквивалентности трещины системе связанных



**Рис. 1.** Схема расположения трещины на поверхности образца (*a*), схема расположения встречно-штыревых преобразователей (IDT) и акустоэлектронного зонда (PROBE) на поверхности образца (*b*). SAW — поверхностные акустические волны,  $P$  — внешнее давление.

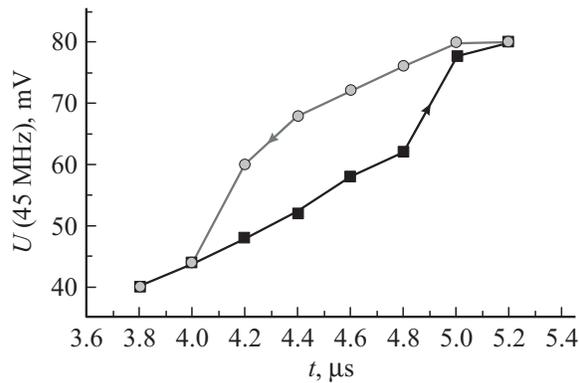
нелинейных осцилляторов. В этом случае генерация третьей гармоники соответствует нелинейному резонансу трещины. Необходимо отметить, что здесь наблюдался „жесткий“ режим возбуждения колебаний на третьей гармонике вынуждающей силы. Обратное движение по амплитуде выявляет гистерезисный характер, что можно объяснить наличием инерционности механических свойств нелинейных осцилляторов.

Исследование нелинейного отражения от трещины изрезанной формы является сложной задачей, так как фронт отраженных волн не является плоским. Поэтому целесообразно создать модель трещины, в которой отражающая граница была бы строго параллельна фронту падающей волны. В качестве такого нелинейно отражающего элемента использовался акустоэлектронный зонд, который представлял собой тонкую металлическую пластину толщиной  $\sim 7 \mu\text{m}$  и апертурой 8 mm. Зонд располагался перпендикулярно направлению распространения ПАВ и мог перемещаться вдоль поверхности кристалла (рис. 1, *b*).



**Рис. 2.** *a* — зависимости амплитуды третьей гармоники  $U(45 \text{ MHz})$ , генерируемой на трещине, от амплитуды сигнала основной частоты  $U(15 \text{ MHz})$ ; *b* — зависимости амплитуды третьей гармоники  $U(45 \text{ MHz})$ , отраженной от акустоэлектронного зонда, от амплитуды сигнала основной частоты  $U(15 \text{ MHz})$ . Стрелки ниже кривой соответствуют зависимостям амплитуды третьей гармоники от амплитуды сигнала основной частоты при увеличении  $U(\omega)$ , а стрелки выше кривой показывают ту же зависимость при уменьшении  $U(\omega)$ .

Таким образом, область контакта была много меньше длины волны ПАВ ( $240 \mu\text{m}$ ). Эффективность нелинейного отражения зависела от силы прижима зонда к поверхности кристалла и могла варьироваться с помощью



**Рис. 3.** Зависимости амплитуды сигнала  $3/2\omega$ , отраженной от акустоэлектронного зонда, от длительности падающего импульса ПАВ.

внешних нагрузок. Схема эксперимента по наблюдению нелинейного отражения аналогична предыдущему случаю. Как и при отражении от трещины, в отраженном от нелинейного контакта поле наблюдались волны комбинационных частот, второй и третьей гармоник, а также субгармоники. На рис. 2, *b* показана динамическая характеристика третьей гармоники, отраженной от акустоэлектронного зонда. Из рисунка видно, что, как и в случае нелинейного отражения от реального трещиноватого дефекта, отражение от акустоэлектронного зонда обладает порогом, при котором наблюдается резкое увеличение амплитуды отраженной третьей гармоники. Кроме того, динамическая характеристика нелинейного отражения от зонда также обладает гистерезисом. Возникновение пороговости и гистерезиса, характерных для трещиноватых дефектов, свидетельствует о схожих механизмах нелинейности, приводящих к такого рода отражению, а предложенная физическая модель хорошо описывает поведение реальных трещиноватых дефектов. Следует заметить, что динамические характеристики отраженных ПАВ на частотах  $\omega/2$  и  $3\omega/2$  также носили явно выраженный пороговый характер. На рис. 3 представлена зависимость амплитуды отраженного сигнала частотой  $3\omega/2$  от длительности падающего импульса. Данная зависимость, носящая также гистерезисный характер, показывает, что амплитуда отраженной волны не только является функцией амплитуды падающей волны, но и зависит от ее энергии. Такая зависимость может быть

объяснена возникновением динамической памяти, которая возникает при увеличении температуры контакта с увеличением длительности импульса падающей ПАВ [11].

Таким образом, экспериментально исследованы нелинейные эффекты, возникающие при взаимодействии поверхностных акустических волн с контактной границей твердого тела и реальными трещиноватыми дефектами. Выявленный специфический механизм нелинейного отражения определяется резонансными свойствами линии контакта. Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности рассматриваемой модели реальному трещиноватому дефекту.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта № 07-02-10201 Российского фонда фундаментальных исследований.

## Список литературы

- [1] Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990.
- [2] Руденко О.В. // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
- [3] Guyer R., Johnson P.A. // Phys. Today. April 1999. P. 30–36.
- [4] Ко Сел Лен, Солодов И.Ю. // Акустич. журнал. 1993. Т. 39. В. 2. С. 282–286.
- [5] Поздняков В.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 4. С. 46–51.
- [6] Поздняков В.А., Глезер А.М. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 1. С. 31–36.
- [7] Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Турна В., Гусев В.Э., Кастаньеде Б. // Акустич. журнал. 2005. Т. 51. В. 5. С. 633–644.
- [8] Ко Сел Лен, Северин Ф.М., Солодов И.Ю. // Акустич. журнал. 1991. Т. 37. В. 6. С. 1165–1169.
- [9] Северин Ф.М., Солодов И.Ю., Шкуланов Ю.Н. // Вестн. МГУ. 1988. Т. 29. № 4. С. 94–96.
- [10] Солодов И.Ю., Коршак Б.А., Баллад Е.М. // Сборник трудов семинара научной школы проф. В.А. Красильникова. М., 2002. С. 114–129.
- [11] Korshak B.A., Solodov I.Yu. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. N 1. P. 014303-1.