

01;08

ПОЛУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВНУТРЕННИХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

© *М.Н.Преображенский, В.Н.Репин,
В.А.Козлов, Л.С.Костина*

Развитие методов и средств анализа внутренней структуры твердых тел традиционно является одним из важнейших направлений современного материаловедения. В физике полупроводников при исследовании кристаллов используются сравнительно глубоко разработанные и хорошо апробированные методы электронно-зондовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и томографии, просвечивающей ИК-фотометрии и т. д. В сравнении с этими известными методами сканирующая акустическая микроскопия (САМ) — один из сравнительно новых методов неразрушающего контроля твердотельных материалов. Отличительной особенностью САМ является то, что контраст изображения формируется благодаря различию механических свойств отдельных участков исследуемого объекта и существует принципиальная возможность получения информации о внутренней структуре материала [1].

Среди основных характеристик САМ наиболее важными являются его координатное разрешение и максимальная глубина, с которой может быть получена информация. Вполне очевидно [2,3], что эти две основные характеристики взаимопротиворечивы: для увеличения глубины проникновения излучения в акустическом микроскопе необходимо уменьшать частоту акустических волн, т. е. увеличивать длину волны и уменьшать координатное разрешение. В ряде случаев для повышения разрешения микроскопа используют поперечные волны, скорость которых ниже и длина волны меньше [4]. Однако выигрыш в этом случае незначителен, поскольку различие в скоростях распространения продольных и поперечных волн не превышает 50%, а техническая реализация данного варианта метода достаточно сложна.

Другой возможностью повышения разрешения САМ является использование высших гармоник, генерируемых в фокусе акустического преобразователя, для формирования контраста изображения с больших глубин [5,6]. Однако данный вариант метода является не изученным как теоретически, так и практически.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования САМ для получения изображений глубоко залегающих областей полупроводниковых структур с высоким геометрическим разрешением при работе САМ на высоких частотах.

В качестве тестовых образцов для исследований были использованы полупроводниковые структуры мощных запираемых тиристоров, изготовленные прямым твердофазным сращиванием кремниевых пластин с плоской и профилированной поверхностью [7,8]. Профилированная поверхность одной из сращиваемых пластин (интерфейс) была выполнена в форме утопленной под поверхность прямоугольной сетки. Схематическое изображение структуры приведено на рис. 1, а.

На высоких (0.8–2 ГГц) и низких (100, 200, 400 МГц) частотах экспериментально исследованы структуры, в которых интерфейс был расположен на глубине от 20 до 300 мкм. Радиусы кривизны низкочастотных линз составляли 2000, 500 и 180 мкм соответственно, что позволяло провести фокусировку на различную глубину. Радиус кривизны высокочастотных линз 40 мкм. Ход лучей в акустическом микроскопе при расположении центра линзы на глубине Z приведен на рис. 1, б. Как видно из рисунка, информация в этом случае поступает со слоя, расположенного от поверхности до некоторой максимальной глубины $Z_m \approx Z_n$, где n — акустический коэффициент преломления, равный отношению скоростей звука в иммерсионной жидкости и исследуемом образце. Согласно данному представлению изображение принципиально не может быть получено с большей глубины.

На рис. 2 приведены акустические изображения исследованных структур. Фотографии на рис. 2, а и б получены на частоте 400 МГц с фокусировкой на поверхность $Z_m = 0$ и интерфейс $Z_m = 20$ мкм соответственно при расположении интерфейса на глубине 20 мкм. Первый снимок практически не отличается от оптического, в то время как на втором отчетливо видны сетка на интерфейсе и неоднородности сращивания на ней. Оценки глубины проникновения для этого случая в соответствии с [3] дают значение порядка 15 мкм, что немного меньше реальной. Согласно геометрическим представлениям для данной линзы (радиус кривизны 180 мкм, апертурный угол 120°) максимальная глубина фокусировки в кремнии для объемных волн ограничивается свободным ходом линзы и может составлять до 25 мкм.

На частоте 1.5 ГГц при фокусировке на поверхность (рис. 2, в) для этого же образца наблюдается как структура, сформированная на самой поверхности, так и сетка,

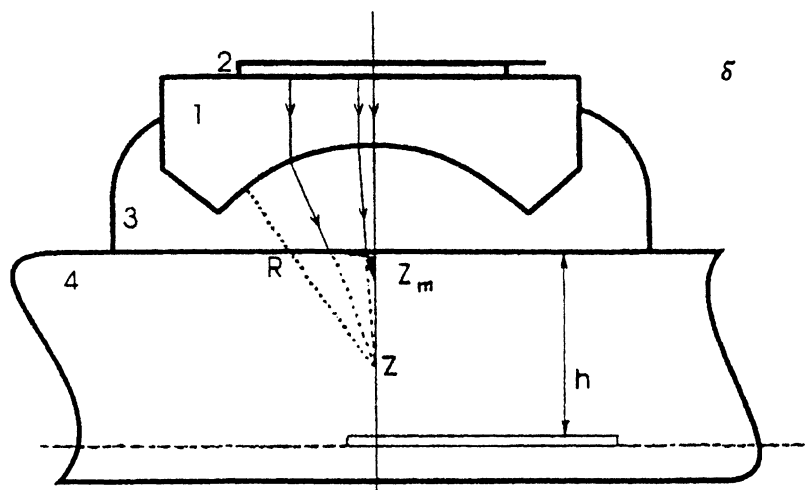
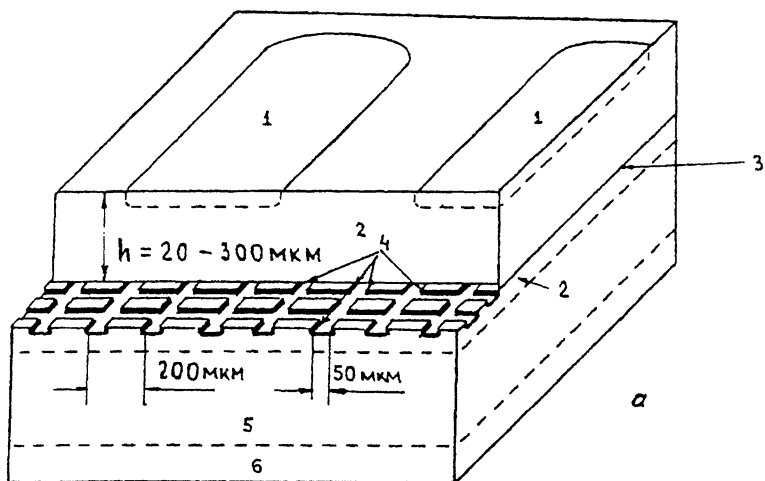


Рис. 1. а — схематическое изображение исследованной структуры: 1 — n^+ — эмиттер, 2 — p -база, 3 — интерфейс, 4 — p^+ -сетка, 5 — n -подложка, 6 — p^+ -эмиттер; б — ход лучей в акустической линзе со сферической преломляющей поверхностью: 1 — основание линзы, 2 — пленочный пьезопреобразователь, 3 — иммерсионная жидкость, 4 — образец, z — форма поверхности акустического преобразователя, обеспечивающая фокусировку на заданной глубине.

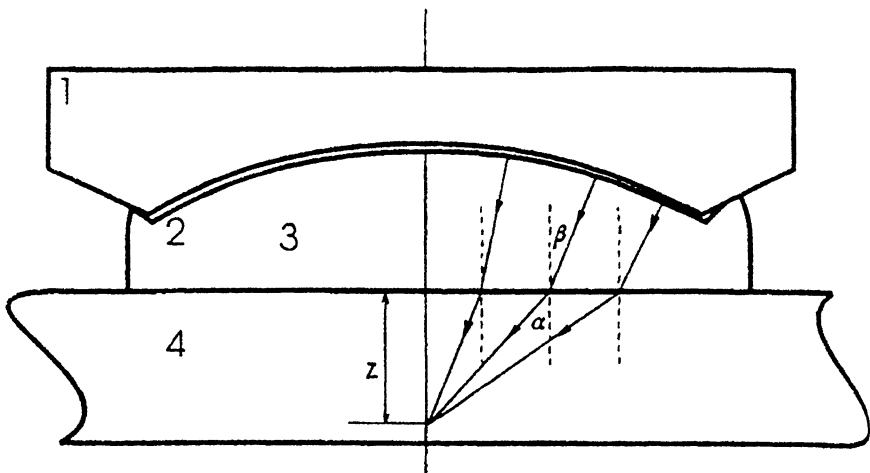


Рис. 1 (продолжение).

находящаяся на интерфейсе. Достаточно четкое изображение сетки наблюдается как при удалении линзы от поверхности, так и при ее приближении к образцу. Поскольку максимальная глубина фокусировки согласно геометрическим представлениям в данном случае не может превосходить 7 мкм (радиус кривизны 40 мкм, апертурный угол 120°), можно сделать вывод, что изображение сетки на интерфейсе сформировано несфокусированным излучением. В соответствии с результатами работы [3] глубина проникновения акустического излучения на этой частоте еще меньше и не должна превышать длины поверхностной рэлеевской волны, что составляет примерно 4 мкм. Таким образом, акустическая линза в этом случае, вероятно, работает как плоский поршневой преобразователь. Необходимо отметить, что изображение на частоте 1.5 ГГц, сформированное несфокусированным излучением, не обнаруживает отдельных деталей интерфейса и уступает в информативности изображению, полученному на частоте 400 МГц при фокусировке на интерфейс.

На рис. 2, з приведено изображение аналогичной структуры, расположенной на глубине 170 мкм, полученное на частоте 1.5 ГГц. Четкое контрастное изображение в этих случаях наблюдается при выборе времени задержки регистрации отраженного сигнала, соответствующем двойному прохождению акустического излучения верхней пластины. Сфокусированное изображение структуры, находящейся на данной глубине, может быть получено только на

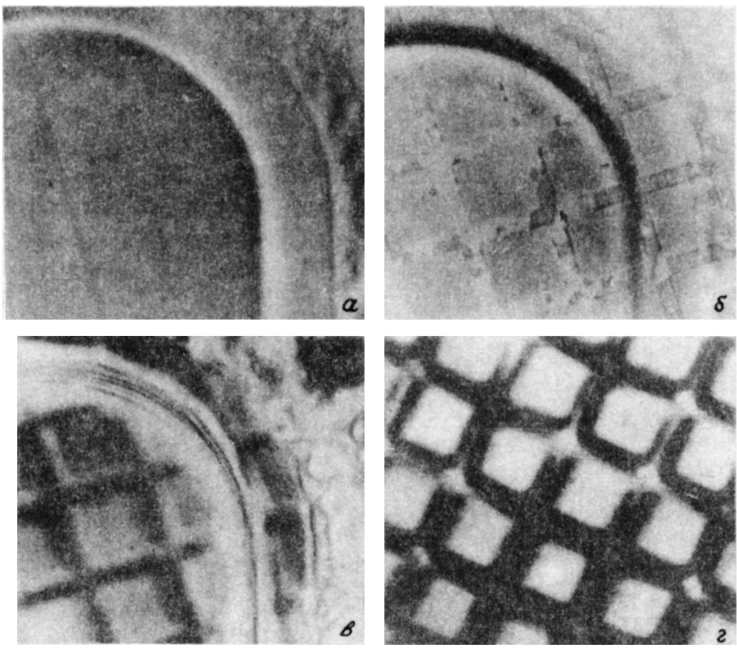


Рис. 2. Акустические изображения структуры: а — частота 400 МГц, фокусировка на поверхность; б — частота 400 МГц, фокусировка на интерфейс; в — частота 1.5 ГГц, фокусировка на поверхность (а-в — толщина верхней пластины $h = 20$ мкм); з — частота 1.5 ГГц, $h = 170$ мкм.

частоте 100 МГц (при радиусе кривизны линзы 2000 мкм), что соответствует разрешению порядка 50 мкм. Разрешение изображения, полученного на частоте 1.5 ГГц несфокусированным излучением, вероятно, можно оценить как разрешение плоского поршневого акустического преобразователя в дальней зоне [9], что составляет примерно 30 мкм и по порядку величины соответствует разрешению на частоте 100 МГц. С другой стороны, для повышения разрешения может быть предложен принципиальный акустический преобразователь, имеющий специальную форму поверхности, которая будет обеспечивать фокусировку на заданной глубине и работать на высоких частотах. Форма поверхности определяется из простых геометрических соображений (рис. 1, в) с учетом закона преломления $\sin \alpha = n \sin \beta$, где α — угол падения, а β — угол преломления акустического излучения на границе образец — иммерсионная жидкость. Пьезопреобразователь в этом случае необходимо наносить на фокусирующую поверхность.

Таким образом, в работе продемонстрированы некоторые возможности метода акустической микроскопии при исследовании внутренних структур твердотельных материалов. Представлены экспериментальные результаты, показывающие принципиальную возможность получения акустических изображений на высоких частотах 0.8–1.5 ГГц при исследовании глубоко залегающих структур. Полученные результаты позволяют сделать предположение о возможности конструктивного усовершенствования высококачественных линз САМ для получения изображения с большой глубины сфокусированным излучением с высоким разрешением.

Список литературы

- [1] *Briggs G.A.D.* // Repts. Progr. Phys. 1992. V. 55. N 7. P. 851–909.
- [2] *Кайно Г.* Акустические волны. М.: Мир, 1990. 652 с.
- [3] *Atalar A.* // IEEE transactions on sonics and ultrasonics: 1985. V. SU-32. N 2. P. 164–167.
- [4] *Zhang D., Crean G.M.* // Electronics letters. 21 st November 1991. V. 27. P. 2248–2250.
- [5] *Tan M.R.T., Ransom H.L., Jr., Cutler C.C., Chodorow M.* // Ultrason. Symp. Proc. Dallas, Tex., 14–16 Nov., 1984. V. 2. N.Y., 1984. P. 598–603.
- [6] *Germain L., Cheeke J.D.N.* // IEEE Ultrason. Symp. Denver, Colo, Oct. 14–16, 1987. Proc. V. 2. N.Y., 1987. C. 801–805.
- [7] *Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов В.А.* // Электротехника. 1992. В. 2. С. 58–64.
- [8] *Grekhov I.V., Kostina L.S., Belakova E.I., Rolnik I.A.* // Proc. of the 6th Int. Symp. on Power Sem. Dev. and IC. Davos, 1994. P. 233–236.
- [9] *Ермолова И.Е., Алешин Н.П., Потапова А.И.* Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля. М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
- [10] *Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов В.А.* // Физика и техника полупроводников. 1991. Т. 25. В. 2. С. 208–215.

Институт
микроэлектроники
РАН

Ярославль
Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
19 декабря 1994 г.
В окончательной редакции
17 января 1996 г.