

УДК 621.7:622.372.3

*Т.Б. Теплова, О.М. Гридин, Ю.С. Петронюк, В.М. Левин*

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КРИСТАЛЛОВ ПОСЛЕ МИКРОШЛИФОВАНИЯ НА СТАНОЧНОМ МОДУЛЕ С ЧПУ**

Семинар № 3

---

Современные требования полупроводниковой промышленности, микро-нанoeлектроники и медицины к стабильному качеству критически бездефектных выходных параметров обработанных алмазов, лейкосапфиров и других твердых высокопрочных материалов диктует необходимость автоматизации процесса их обработки, которую можно осуществить только на основе применения диагностирования в реальном времени параметров этого процесса. При непрерывном диагностировании параметров шлифования с получением оперативной достоверной и достаточной для последующего автоматического воздействия информации обеспечивается возможность получения заданных выходных параметров по точности геометрической форме (0,3 мкм) и по оптической характеристике чистоты поверхности ( $R_z$  менее 1 нм), необходимые для наукоемких изделий полупроводниковой промышленности.

Полупроводниковые микросхемы на лейкосапфировых подложках изготавливаются по эпитаксиально - планарной и диффузионно-планарной технологиям. В первом случае они реализуются на базе эпитаксиальных слоев, выращенных на подложках, выполняющих роль механического носителя, во втором случае, диффузия легирующих примесей осуществляется непосредственно в приповерхностную область подложек на заданную глубину. Качество поверхностного слоя подложек су-

щественно влияет на структурное совершенство эпитаксиального слоя. Наличие дислокаций, микротрещин приводит к образованию дефектов в этих слоях, причем их плотность, как правило, выше, чем в подложках. Дислокации и дефекты упаковки прорастают с подложки и наследуют ее отрицательные свойства, ухудшая эксплуатационные свойства микросхем. Традиционными способами обработки лейкосапфира является шлифование и полирование.

Методы обработки таких поверхностей предусматривают предварительную размерно-регулируемую обработку на двухсторонних торцешлифовальных станках свободным абразивом с получением размерной и геометрической точности в пределах 1–3 мкм.

Последующая доводочная обработка таких поверхностей со съемом припуска до 50 мкм на одну сторону основана на методе безразмерного «истирания кристаллической решетки» в условиях применения «агрессивных» поверхностно-активных веществ для удаления слоев нарушенных предшествующими механическими процессами обработки.

При этом точность геометрической формы и разброс размеров по толщине пластины лежит в пределах 5–10 мкм. Практикой установлено, что чем выше размерная и геометрическая точность обработки, тем выше процент выхода годных полу-

проводниковых приборов с каждой стороны обработанной пластины.

Отсутствие универсальных технологий обработки монокристаллов, отвечающих современным темпам усовершенствования электронных компонентов современных средств радиоэлектроники, космической и военной техники требует применения индивидуального подхода к выбору режимов, исключающих нарушение критических контролируемых параметров изделий.

Одним из способов механической обработки твердых минералов и кристаллов является шлифование в режиме пластичности. На шлифовальной установке, обладающей достаточной жесткостью и высокой точностью, позволяющей обеспечить малый съем материала и малую врезную подачу возможно создать условия для шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. При малой глубине резания и низких врезных подачах все хрупкие материалы могут обрабатываться в режиме пластического течения, а не хрупкого разрушения [1].

В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме, при этом обеспечивается чистота обработки поверхности, ранее достижимая только в нерегулируемых процессах, осуществляемых в режиме пластичности, таких как полирование и притирка.

При шлифовании хрупких материалов в режиме пластичности получается поверхность примерно с такими же характеристиками как после полирования или притирки, что позволяет получить высокотехнологичные изделия для нано- и микроэлектроники, медицины, а также ювелирных изделий. При этом в зависимости от цели применения обработанного материала могут быть использованы различные технологические приемы и режимы шлифования [2].

При применении твердых материалов для микроэлектроники большое значение имеет качество поверхностного и подпо-

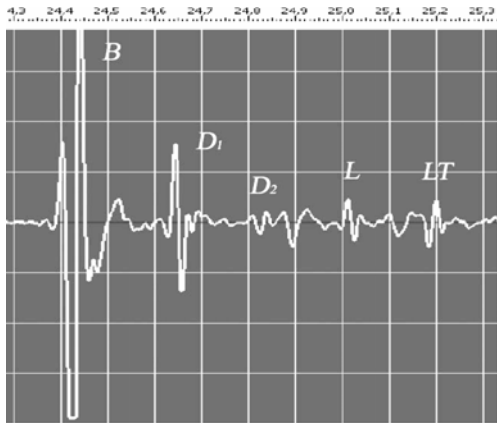
верхностного слоя. Исходя из этого одной из основных задач, наряду с достижением точности выходных размерных параметров, является выбор таких режимов микрошлифования, при которых при обработке не вносятся дополнительные дефекты как в поверхностном, так и в подповерхностном слоях, т.к. любые дополнительные нарушения сказываются на качестве изготовленных подложек и могут привести к отказам приборов, изготовленных на их основе [3].

В связи с этим ставится задача найти методы и средства контроля за качеством кристаллов после микрошлифования (желательно и в процессе шлифования). Для решения этой задачи были проведены исследования кристаллов до и после размерно-регулируемого микрошлифования на станочном модуле с ЧПУ АН15ф4 методом импульсной акустической микроскопии [4-6].

В основе метода импульсной акустической микроскопии лежат принципы радарной техники. Измерение скорости ультразвука основывается на том, что высокочастотный ультразвуковой зондирующий импульс отражается от передней и задней поверхности образца, а также от границы разделов и неоднородности внутри объема. Эхо-сигналы, отраженные от различных деталей объекта отличаются по амплитуде и времени задержки (рис. 1). Измерение временного интервала  $\tau_L$  между эхоимпульсами от задней и передней поверхности образца, при известной его толщине  $d$ , позволяют определить значение скорости продольного звука  $c_L$  в образце:

$$c_L = 2d/\tau_L. \quad (1)$$

Поскольку зондирующее излучение является фокусированным, т.е. зондирующий пучок содержит наклонно падающие компоненты, при взаимодействии их с твердотельным объектом, в нем возбуждаются также и поперечно поляризованные упругие волны. Распространение поперечных волн в образце обуславливает



**Рис. 1. Осциллограмма отраженных эхосигналов (O-scan):** В – сигнал, отраженный от поверхности образца; L – сигнал образованный продольной волной от задней стороны объекта; LT – сигнал, отраженный от задней стороны, обусловленный комбинированным распространением продольных и поперечных волн; D<sub>1</sub> и D<sub>2</sub> – импульсы отражения от дефектов

формирование эхо-импульса, время задержки  $\tau_T$  которого определяется скоростью поперечных волн  $c_T$ :

$$\tau_T = 2d/c_T. \quad (2)$$

Помимо этого в результате отражения продольных и поперечных волн от задней поверхности образца формируется смешанный LT-сигнал. Время задержки LT-сигнала определяется как:

$$\tau_{LT} = d/c_L + d/c_T, \quad (3)$$

и его измерение может служить источником дополнительной проверки для интерпретации пиков на осциллограмме эхоимпульсов (O-скане).

Система визуализации акустического микроскопа основывается на растровом принципе формирования изображений, и дает возможность получать изображения двух видов – В-скан и С-скан. В обоих случаях для формирования изображений используется система электронных ключей (электронные ворота), позволяющая выбирать из общего принятого эхосигнала, только часть или отдельный пик. В-скан – изображение, которое формируется при одномерном сканировании акустической линзы. При этом сигнал почти полностью помещается внутрь электронных ворот; амплитуда эхо-импульсов от передней (В) и задней поверхности (L, LT, T) образца, а также импульсы, возникающие при отражении от расположенных

вдоль линии сканирования внутренних дефектов (D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>), отображаются и, таким образом, получаем изображение поперечного сечения объекта. Координата  $x$  В-скана – соответствует положению линзы вдоль линии сканирования, координата  $y$  – соответствует положению импульса на временной шкале. Формирование С-скана происходит при двумерном сканировании акустического объектива. С помощью электронных ворот выделяется тот интервал времени, в который попадают эхо-импульсы с заданной глубины. Амплитуда или фаза сигнала, который оказывается внутри электронных ворот, от точки к точке отображается на экране компьютера с помощью градаций серого (или цветной палитры). Последовательное С-сканирование на разной глубине внутри объекта позволяет восстановить его трехмерную структуру.

Для измерения локальных упругих свойств и визуализации внутренней микроструктуры кристаллов сапфира и различного типа алмазов использовался широкополосный импульсный сканирующий акустический микроскоп (ШИАМ, Лаборатория акустической микроскопии, ИБХФ РАН). На рис. 2 приведена блок-схема установки. Условно, система акустического микроскопа представляет собой совокупность акустической линзы, механической системы сканирования акустической линзы, блока управления и компьютера. Акустический объектив представляет собой фокусирующий излучатель, который генерирует высокочастотный ультразвуковой зондирующий импульс. Фокусировка ультразвукового излучения достигается с помощью преломления на сферической по-

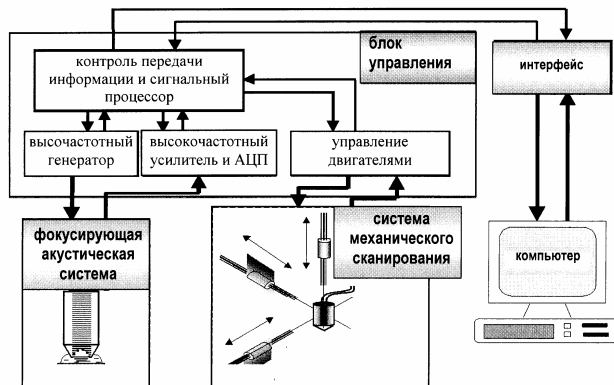


Рис. 2. Блок-схема импульсного отражательного акустического микроскопа

верхности буферного волновода. Основными важными характеристиками фокусированного зондирующего излучения являются рабочая частота  $f$  и длительность импульса  $t$ . Не менее важны геометрические параметры фокусированного пучка, в т.ч. угловая апертура  $\theta_m$ , которая определяет диаметр  $d$  и длину  $l_f$  фокальной перетяжки, от которых зависят латеральное разрешение и максимальная глубина видения. В наших экспериментах мы располагали акустическими объективами с угловой апертурой  $\theta_m = 11^\circ$  в воде и рабочей частотой 50 и 100 МГц. Это обеспечивало нам возможность проводить локальные измерения скорости звука внутри области диаметром 30 мкм.

В отражательном акустическом микроскопе короткий зондирующий импульс длительностью 30-40 нс генерируется высокочастотной акустической линзой, попадает на образец, отражается от него и принимается той же линзой. Регистрируемый после отражения сигнал оцифровывается и вместе с координатой точки зондирования запоминается в специально отве-

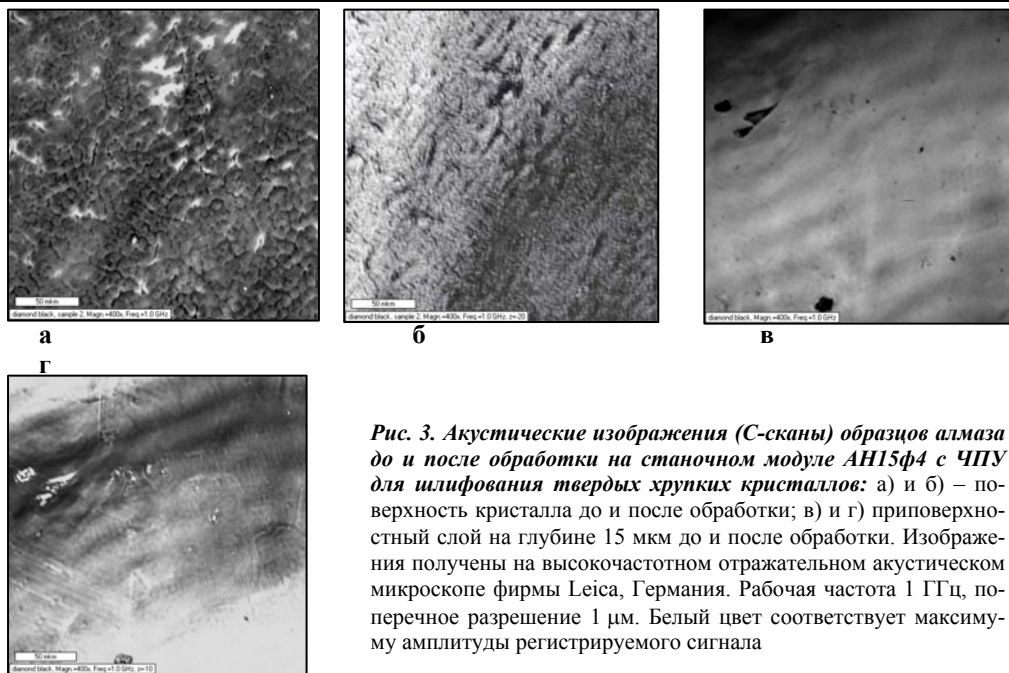
денной для этого памяти электронного блока микроскопа. Затем вся процедура повторяется в соседней точке, и так от точки к точке происходит накопление данных об упругой реакции изучаемого образца на ультразвуковое воздействие. Сканирование акустиче-

ской линзы по двум координатам  $x$  и  $y$  происходит с помощью шаговых двигателей, которые управляются электронным блоком с программного интерфейса пользователя.

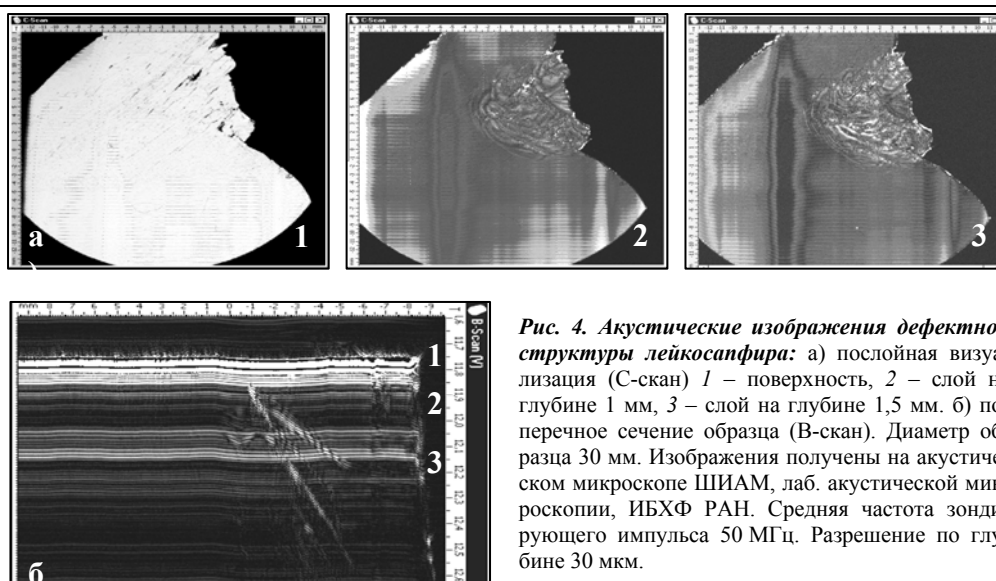
Достоверность измерения скорости звука микроакустическим методом определяется как аппаратными возможностями системы акустического микроскопа, так и систематической ошибкой, которая может возникать у оператора. При использовании импульсной техники для измерения скорости звука необходимым условием является то, что эхо-сигналы, отраженные от передней и задней поверхности образца разделяются по времени задержки. Скорость звука определяется с помощью измерения этого времени, а также толщины образца, как показано в (1-3). Время в системе акустического микроскопа ШИАМ определяется с точностью  $\pm 0,01$  мкс. Толщина в данном эксперименте определялась с помощью микрометра с точностью  $\pm 0,01$  мм. Такой набор средств позволяет проводить изме-

Значения скорости продольного звука в сапфире и поликристаллическом алмазе, измеренные методом акустической микроскопии

Кристалл	Толщина, мм		Скорость звука $c_L$ , км/с	
	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
лейкосапфир	$9,72 \pm 0,01$	$9,55 \pm 0,01$	$11,1 \pm 0,4$	$11,2 \pm 0,4$
алмаз	$0,86 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,01$	$17,3 \pm 0,5$	$17,2 \pm 0,5$



**Рис. 3.** Акустические изображения (С-сканы) образцов алмаза до и после обработки на станочном модуле АН15ф4 с ЧПУ для шлифования твердых хрупких кристаллов: а) и б) – поверхность кристалла до и после обработки; в) и г) приповерхностный слой на глубине 15 мкм до и после обработки. Изображения получены на высокочастотном отражательном акустическом микроскопе фирмы Leica, Германия. Рабочая частота 1 ГГц, поперечное разрешение 1 мкм. Белый цвет соответствует максимуму амплитуды регистрируемого сигнала



**Рис. 4.** Акустические изображения дефектной структуры лейкосапфира: а) послойная визуализация (С-скан) 1 – поверхность, 2 – слой на глубине 1 мм, 3 – слой на глубине 1,5 мм. б) поперечное сечение образца (В-скан). Диаметр образца 30 мм. Изображения получены на акустическом микроскопе ШИАМ, лаб. акустической микроскопии, ИБХФ РАН. Средняя частота зондирующего импульса 50 МГц. Разрешение по глубине 30 мкм.

рения с точностью до  $\pm 3\%$  по абсолютной величине.

Результаты измерения локальных упругих свойств и визуализации внутренней микроструктуры кристаллов сапфи-

ра и поликристаллического алмаза представлены в таблице и на рис. 3, 4.

Проведенные измерения локальных упругих свойств и визуализации внутренней микроструктуры кристаллов до и после микрошлифования, показали перспек-

тивность применения ультразвуковой микроскопии для оценки качества твердых материалов (в частности кристаллов), особенно подповерхностного слоя.

Кроме того, эти исследования подтвердили перспективность применения размерно-регулируемого микрошлифования на станочном модуле АН15ф4 с ЧПУ для шлифования твердых хрупких материалов (кристаллов). Представленные на рис. 4 акустические изображения показывают, что наличие различного типа дефектов и неоднородностей в объеме кристаллов могут быть эффективно обнаружены методами ультразвуковой микроскопии. Как

видно из рис. 3, в подповерхностном слое кристаллов не обнаружено новых привнесенных процессом обработки дефектов, т.е. качество подповерхностного слоя после обработки не ухудшилось.

Такая технология может обеспечить воспроизводимость результатов обработки наукоемкой продукции (светодиодов для экранов телевизоров, инжекционных лазеров с длиной волны 400 нм и других) в условиях автоматизированного производства с его приемлемой для потребителя стоимостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коньшин А.С., Сильченко О.Б., Сноу Б.Д.* Способ микрошлифования твердоструктурных материалов и устройство для его реализации. Патент РФ №2165837 от 27.04.2001.

2. *Теплова Т.Б.* Обоснование рациональных режимов шлифования алмазов при их огранке. Авт.-реф. диссертации на соискателя ученой степени кандидата технических наук МГТУ (Москва) – 2002.

3. *Коньшин А.С., Теплова Т.Б., Соловьев В.В.* Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ. – М: ГИ-АБ, №3

4. *Levin V.M., Petronyuk Yu.S., Ponevazh I.V.* Interaction of short pulses of focused ultra-

sound with interfaces and planeparallel objects, in *Acoustical Imaging, Vol.27*, Edited by W. Arnold and S. Hirsekorn, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Dordrecht & New York, 2004, pp.69-76.

5. *Закутайлов К.В., Левин В.М., Петронюк Ю.С.* Микроакустика и акустическая микроскопия – уникальные методы исследования локальных механических свойств материалов Тезисы докладов второй международной конференции по физике кристаллов «Кристаллофизика 21-го века», Москва/МИСиС, 2003.

6. *Petronyuk Yu.S., Levin V.M., Zygan V.N.* Microacoustical NDE of pyrocarbon materials for cardiovascular prosthetic application, *Annals of transplantation (Suppl.)*, 2004, v.9, №1a, pp.113-115.

### Коротко об авторах

*Теплова Т.Б.* – кандидат технических наук, докторант,

*Гридин О.М.* – доктор технических наук, профессор,

кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.

*Левин В.М.* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией,

*Петронюк Ю.С.* – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник,

лаборатория акустической микроскопии отдела химического материаловедения, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской Академии наук (ИБХФ РАН).





