

Акустическая микроскопия многослойных кристаллов микроэлектроникиЮ.С. Петронюк^{1,*}, Е.С. Мороков^{1,2,†}, В.М. Левин^{2,‡}, В.И. Зеленев³¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, д. 4³ОАО «Научно-исследовательский институт технологии и автоматизации производства»,
Россия, 124460, Зеленоград, Южная промзона, проезд 4806, д. 6

(Статья поступила 12.11.2014; Подписана в печать)

Показано, что методами импульсной акустической микроскопии, можно обнаруживать скрытые дефекты при производстве многослойных кристаллических чипов в процессе постепенного наращивания системы микрокристаллов. Предложенные методы позволяют выявлять дефекты адгезии, на границе между кристаллами, дефекты ультразвуковой пайки контактов, распределение и деформацию теплоотводящего слоя (полиимидной сетки), скрытые внутренние трещины кристаллов. Рабочая частота 50–100 МГц позволяет уверенно выполнять акустическую визуализацию с разрешением 30–50 мкм на глубине двух кристаллических слоев (2×690 мкм). Отображение структуры на большей глубине затруднительно из-за сильного преломления в кремнии наклонных компонент зондирующего фокусированного пучка, а также из-за многочисленных элементов внутренней структуры, образующих тень на изображениях нижерасположенных слоев.

PACS: 43.35.Zc

УДК: 534-8

Ключевые слова: ультразвуковая визуализация, неразрушающий контроль, микроэлектроника.

ВВЕДЕНИЕ

Электронные многокристалльные модули по сравнению со стандартными полупроводниковыми имеют значительные преимущества благодаря более коротким соединительным проводникам и меньшим габаритам. По этим причинам множество производителей электроники переходят от сборки печатных плат к многокристалльным модулям. Но, в связи с достаточно высокой стоимостью таких изделий, важным условием для успешного производства становится возможность обнаруживать дефекты и выявлять причины их появления [1].

3D технология в производстве микроэлектронных компонент является одной из новинок в современной электронике. Многокристалльные электронные модули формируются в виде стопки из отдельных кристаллов, которые электрически связаны. Новая производственная технология, безусловно, требует соответствующих методов неразрушающего контроля. Чаще всего два вида дефектов оказываются критическими: дефекты в электрическом соединении и механические дефекты кристаллической укладки, сборки и упаковки. В первом случае дефекты обнаруживаются посредством специальных электрических тестов. Во втором — дефекты не могут быть найдены электрически; они выявляются через какое-то время эксплуатации модуля; поэтому такие дефекты называют «скрытыми». Для выявления скрытых дефектов в электронной промышленности активно применяется импульсная акустиче-

ская микроскопия [2–5]. Но все же, современная микросхема содержит от 4 до 50 кристаллических слоев, необходимость осмотреть область контакта между слоями, а также целостность механической структуры модуля в целом остается проблемой. В этом случае импульсная акустическая микроскопия предлагает несколько методов контроля — эхограмма сигналов, В- и С-сканирование, 3D отображение. Данная работа посвящена особенностям акустической визуализации многокристалльных модулей, обсуждаются возможности и недостатки акустической инспекции высокого разрешения.

1. МЕТОДЫ И ОБРАЗЦЫ

Акустическая микроскопия позволяет исследовать внутреннюю структуру оптически непрозрачных объектов [2]. Основные принципы методов импульсной акустической микроскопии описаны в [6, 7]. Короткий фокусированный ультразвуковой импульс (50–200 МГц) распространяется в объекте исследования в виде продольных и поперечных волн, формируя эхо-сигнал, как показано на рис. 1. Выходной сигнал микроскопа содержит эхо-сигналы от внутренних границ раздела, которые различаются по времени задержки и могут использоваться для отображения внутренней структуры. На акустических изображениях наблюдаются структурные элементы, размер которых близок к длине волны зондирующего сигнала. В данной работе использовались акустические линзы с рабочей частотой 50 и 100 МГц. Фокусное расстояние акустических объективов было равно 13,5 и 5,5 мм, соответственно. Половина угла апертуры линз составляла 11° в дистиллированной воде, которая использовалась в качестве иммерсионной жидкости. Экспери-

*E-mail: jps7@mail.ru

†E-mail: es_morokov@yahoo.com

‡E-mail: levin1943@gmail.com

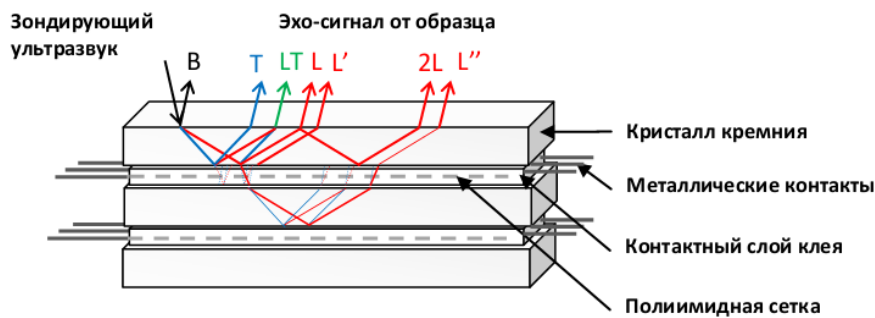


Рис. 1: Формирование импульсного эхо-сигнала при наблюдении структуры многокристалльного модуля; B — падающий импульс, L — эхо продольных волн от верхней пластинки кремния, T — эхо поперечных волн от верхней пластинки кремния, LT — эхо обусловленное трансформацией акустических мод, L' — эхо от поверхности второй пластинки кремния, $2L$ — эхо от дна верхней пластинки кремния, L'' — эхо от дна второго кристалла. Пунктиром показаны эхо-сигналы, эффективность возбуждения которых низкая

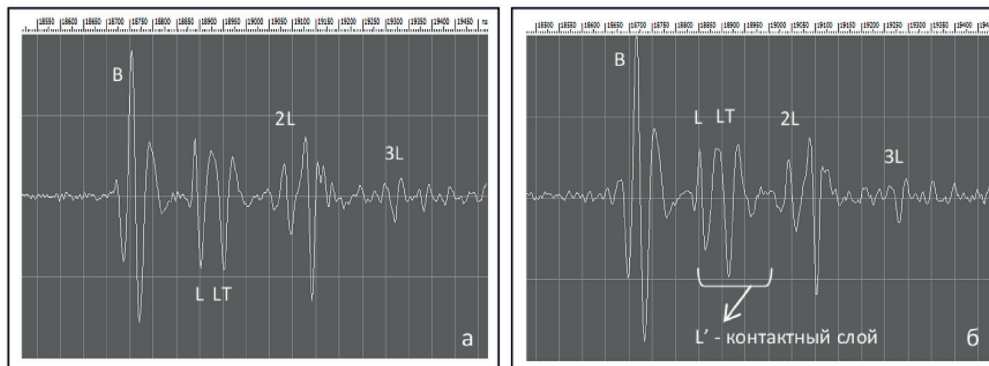


Рис. 2: Осциллограмма эхо-сигнала (А-скан) для отдельной пластинки кремния (а) и для структуры из двух пластин с контактным слоем между ними (б). B — отражение от поверхности, L , LT , $2L$, $2LT$, $3L$ — отражения от дна верхней пластины образца, обусловленные комбинированным распространением продольных и поперечных упругих волн. Скобкой обозначена зона, относящаяся к контактному слою (L')

менты проводились на акустическом микроскопе, разработанном в Институте биохимической физики имени Н. М. Эмануэля Российской академии наук.

Рабочие образцы многокристалльных электронных модулей были изготовлены в виде структуры из двух, трех и четырех кремниевых пластин ориентации (001), соединенных контактными слоями клея толщиной 50–60 мкм с/без полиимидной сеткой толщиной 30 мкм внутри. Площадь образцов составляла $9,5 \times 9,5$ мм²; толщина кремниевых пластин была 460 и 690 мкм.

Осциллограммы эхоимпульсов, акустическая визуализация в виде В и С-сканов применялись во время экспериментов. В режиме 3D скана полный эхо-сигнал запоминался в каждой точке площади сканирования, что позволило слой за слоем восстановить внутреннюю структуру образцов без потери данных.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение параметров 3D модуля, включая целостность слоев клея и контроль контактных площадок, было выполнено путем постепенного наращивания количества кремниевых пластин. Высокие значения скоростей звука в кремнии оказались причиной сильного преломления на границах слоев, что препятствовало эффективному распространению звука в объем образца. Наиболее ясная интерпретация акустических изображений достигалась на глубине не более первых двух контактных слоев, т. е. для контроля дефектов в кремниевом модуле из четырех кремниевых пластин необходимо было наблюдать образец с обеих сторон. На рис. 2 показаны осциллограммы эхо-сигнала, полученные для двух образцов: (а) отдельный кремниевый чип 690 мкм толщиной; (б) структура из двух кремниевых пластин с контактным слоем между ними.

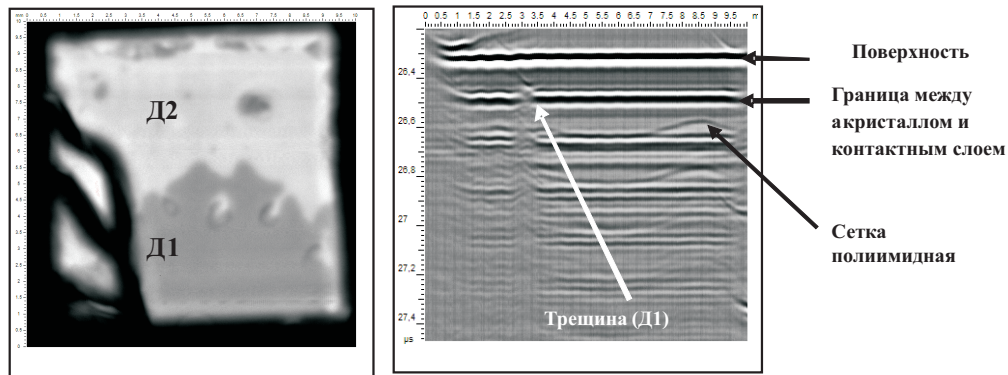


Рис. 3: Акустическое изображение поперечного сечения образца многослойного микроэлектронного модуля: а — изображение контактной области между кремниевыми пластинками (С-скан), б — поперечное сечение (В-скан). Д1 — трещина в кристалле, Д2 — отслоение внутри контактного слоя. Распределение полиимидной сетки внутри контактного слоя наблюдается в виде искривленной эхо-линии на В-скане

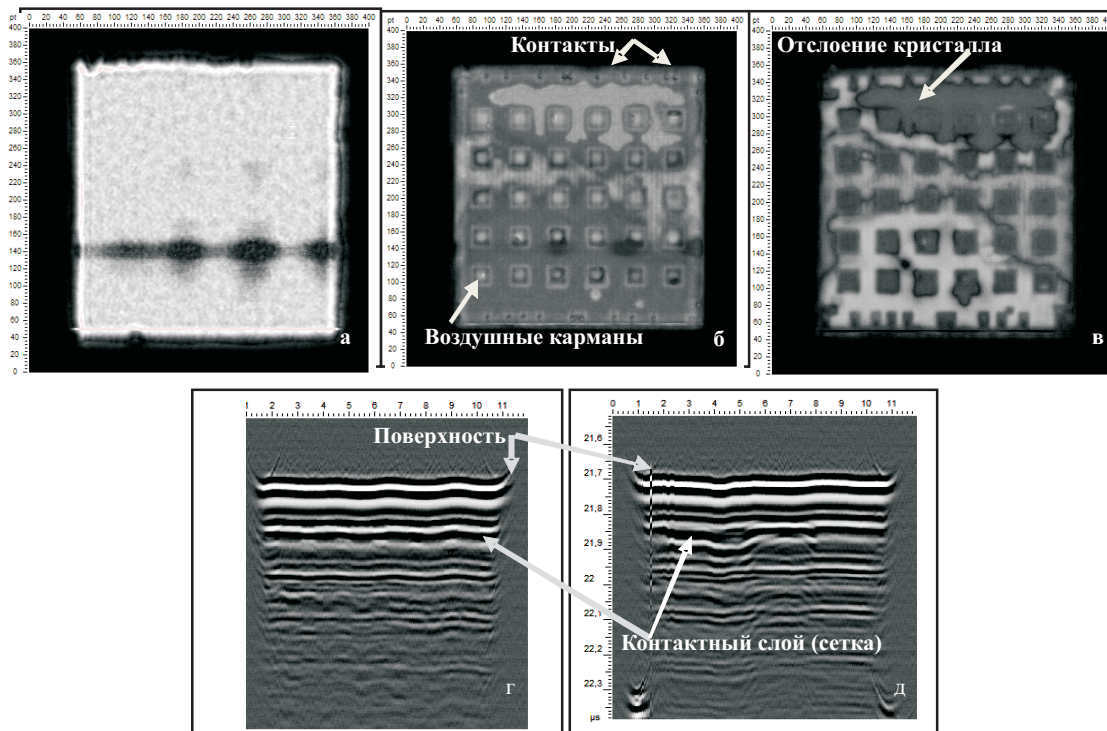


Рис. 4: Акустические изображения 3D микроэлектронного модуля: а — поверхность образца; б — граница между верхним кристаллом и контактным слоем; в — контактный слой; г и д — изображения, соответствующие поперечному сечению образца

На изображении эхо-сигнала для отдельной пластины (рис. 2а) можно выделить импульсы, отраженные от поверхности пластины и дна, а также их многократные переотражения, вызванные трансформацией акустических мод. На эхограмме сигнала для «сэндвич» структуры из двух склеенных пластин видно, что наличие множественных импульсов от верхней пластины маскирует эхо-сигналы от более глубоких слоев структуры электронного модуля, в т. ч. от контактного слоя (L').

Основные результаты послойной визуализации внутренней структуры образцов представлены на рис. 3, 4.

Была исследована структура из двух кремниевых пластин с контактным слоем клея, полиимидной сеткой в нем и алюминиевыми контактами. Эксперименты показывают, что метод позволяет визуализировать дефекты целостности контактного слоя и скрытые трещины в кристаллах. На акустических изображениях отчетливо наблюдается глубокая трещина (Д1, рис. 3а), которая распространяется от поверхности до дна верхней кремниевой пластины. Кроме того, на изображении контактного слоя наблюдается протяженная дефектная зона (Д2, рис. 3а) — яркая свет-

лая область, обусловленная высоким уровнем отражения зондирующего звука. Такой дефект свидетельствует о потере контакта на границе между кремниевыми пластинами, при этом становится невозможным визуализировать более глубокие слои, включая полиимидную сетку и контактные площадки. Протяженные дефекты маскируют изображения этих слоев. На поперечном сечении образца (В-скан, рис. 3б) волнообразные, наклонные и прерывистые линии указывают на наличие таких дефектов, как трещина в верхнем кристалле и замятия полиимидной сетки в контактном слое между пластинами.

Акустические изображения образца с деформированной полиимидной сеткой в контактном слое, приведены на рис. 4. На изображении контактного слоя акустический контраст оказывается неоднородным по всей площади образца: часть сетки наблюдается яркой, другая ее часть затемнена (рис. 4б). В более глубоком слое контраст изменяется на обратный (рис. 4в). Дефекты укладки изолирующей сетки также обнаруживаются посредством В-сканов (рис. 4г, д).

Помимо замятия полиимида в контактном слое, на С-сканах контактной зоны между двумя кремниевыми кристаллами наблюдаются отслоение кристалла и воздушные полости внутри ячеек сетки (Рис. 4б). Вдоль краев кристалла прослеживаются места сварки контактов. На изображении качественные контакты наблюдаются в виде темных пятен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных работ показывают, что импульсная акустическая микроскопия имеет потенциал как метод неразрушающего контроля 3D электроники. Метод позволяет визуализировать дефекты контактного слоя между рабочими кристаллами, в т. ч. дефекты целостности — пустоты и отслоения кристаллов, элементы изоляции (полиимидная сетка) и места ультразвуковой сварки, выявлять скрытые трещины кристаллов и дефекты 3D сборки модуля в целом. Специальной подготовки образцов для проведения акустической визуализации не требуется. Метод является иммерсионным; визуализация выполняется послойно, на первом этапе — через верхний кристалл на глубине первого клеевого соединения. Результаты экспериментов показывают, что глубина контроля существенно зависит от присутствия и количества дефектов в контактных слоях, в т. ч. толщины клея и однородности распределения полиимидной сетки. Целостность контактных слоев может быть определена исходя из общей площади наблюдаемых дефектов. Для более точного определения критериев качества сборки 3D микрорелектронного модуля, необходима дополнительная экспериментальная работа, включая акустическую визуализацию высокого разрешения образцов до и после механической и температурной нагрузки.

- [1] *Yacobi B.G., Martin S., Davis K., Hudson A., and Hubert M.* Journal of Applied Physics. **91**(10). P. 6227. (2002).
- [2] *Briggs, A.* Acoustic Microscopy. (Clarendon Press, Oxford, 1992).
- [3] *Moore, T.M.* Solid-State Electronics. **35**. N3. P. 411. (1992).
- [4] *Pfannschmidt G.* Characterization of electronic components in acoustic microscopy. In Advances in Acoustic Microscopy, ed. by Briggs A. and Arnold W. P. 1 (Plenum Press, New York, 1996).
- [5] *Crean G.M., Flannery C.M., Mathuna S.C.* Acoustic Microscopy Analysis of Microelectronic Interconnection

- and Packing Technologies. In Advanced in Acoustic Microscopy, ed. by Briggs A. P. 1. (Plenum Press, New York, 1995) P. 1.
- [6] *Gilmore R.S., Tam K.C., Young J.D., Howard D.R.* Phil.Trans.Royal Soc.Lond. **A320**. P. 215. (1986).
- [7] *Levin V.M., Petronyuk Y.S., Ponevazh I.V.* Interaction of short pulses of focused ultrasound with interfaces and planeparallel objects. In Acoustical Imaging. **27**. Edited by Arnold W. and Hirsekorn S. P. 69. (Kluwer Academic/Plenum Publishers, Dordrecht & New York. 2005).

NDT of multicrystal electronics by impulse acoustic microscopy technique

Y.S. Petronyuk^{1,2,a}, E.S. Morokov^{1,2}, V.M. Levin¹, V.I. Zelenov³

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia

²Institute of biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334, Russia

³CAS Key Laboratory of Energy Conversion Materials, Department of Materials Science and Engineering, Zelenograd, 124460, Russia E-mail: ^ajps7@mail.ru

It is shown that the method of pulsed acoustic microscopy can detect hidden defects in the multilayer crystal chips during the process of their build-up. The proposed methods allow identifying the adhesion defects at intercrystalline layer, defects of electrical contacts soldering, distribution and deformation of the heat-sinking layer (polyimide grid), and internal crystals cracks. The operating frequency of 50–100 MHz allows to perform acoustic imaging with a resolution of 30–50 mkm at the depth of two crystalline layers (2×690 microns). Visualization of the structure at a greater depth is difficult because of the strong refractive index in silicon, and also because of the numerous internal structure elements forming the shadows in the images of the lower layers.

PACS: 43.35.Zc

Keywords: ultrasonic imaging, non-destructive testing, microelectronics.

Received 12.11.2014

Сведения об авторах

1. Петронюк Юлия Степановна — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 333-76-74, e-mail: jps7@mail.ru.
2. Мороков Егор Степанович — младший научный сотрудник; тел.: (495) 137-83-47 e-mail: es_morokov@yahoo.com.
3. Левин Вадим Моисеевич — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 137-83-47, e-mail: levin1943@gmail.com.
4. Зеленев Владимир Иванович — канд. техн. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 731-04-04. e-mail: vzelenov@bk.ru.