

УДК 621.385.833

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю.Ф. ВЕРТИНСКИЙ*, С.С. ВОЛКЕНШТЕЙН, А.А. ХМЫЛЬ

*УП «КБТЭМ-СО»

пр. Партизанский, 2, Минск, 220033, Беларусь

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 10 октября 2011*

Для выявления конкретной причины появления мерцающего отказа полупроводникового прибора с большим сроком хранения были применены разрушающие и неразрушающие методы контроля и диагностики неразъемных соединений, в том числе: лазерная фотоакустическая микроскопия, лазерная эллисометрия, визуальный контроль, испытание прочности межсоединений на отрыв. Визуализированное на лазерных фотоакустических топограммах разрушение внутренней структуры полупроводникового кристалла данного прибора подтвердилось при проведении диагностики различных приборов в аналогичном корпусе с длительным вылеживанием при хранении. Инициаторами такого рода деградации монтажной конструкции приборов являются концентраторы напряжений в дефектном слое возникающим по периметру кристаллов при воздействии режущего инструмента на стадии разделения полупроводниковых пластин традиционным способом сквозного разделения. Для минимизации этого нежелательного явления предлагается оптимальный вариант сквозного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы.

Ключевые слова: изделия электронной техники и микроэлектроники, эксплуатационная надежность, неразрушающий контроль и диагностика, лазерная фотоакустическая микроскопия.

Введение

Эксплуатационная надежность изделий электронной техники и микроэлектроники опирается на вершину пирамиды, в основании которой находится умственный труд разработчика, его концепции, расчеты и подготовка производства, на которой ступеньками располагается технологическую реализацию, включающая в себя сумму взаимозависимых факторов: качество материалов, степень совершенства оборудования, технологическую дисциплину, и на самой вершине – грамотное применение готового изделия в составе электронной аппаратуры. В этой цепи звеньев нет более или менее значимых – есть только самые слабые, которые, в конечном счете, определяют уровень надежности готового изделия. И очевидно, что наличие одного бракованного элемента в электронной аппаратуре чревато катастрофическими последствиями для всей конструкции, особенно в условиях сильных перегрузок, экстремального воздействия внешней среды, ограниченного запаса рассчитанной надежности. Таким образом, надежность является заложницей громадного количества факторов и их взаимосвязей. Это, по большому счету, имеет отношение ко всей современной техногенной среде. И чтобы эта «вторая природа» не была враждебна к человеку, что в последнее время наблюдаются все чаще и чаще, необходимо в корне пересмотреть подход к контролю, диагностике, испытаниям изделий электронной техники и микроэлектроники.

При проектировании сложных радиоэлектронных комплексов и систем разработки для обеспечения их эксплуатационной надежности применяют формирование ЗИП и резервирование отдельных узлов и блоков. Длительное их хранение даже при отсутствии интенсивных внешних воздействий приводит к нарушению работоспособности вследствие происходящих в них деградиационных процессов. Это установили потребители сложного технологического оборудования, пытаясь восстановить работоспособность одного из узлов этого изделия путем замены вышедшего из строя специфического полупроводникового прибора на кондиционный прибор, длительное время хранившийся на складе (условно – тип «а», рис. 1,а). Однако при эксплуатации прибора стали появляться мерцающие отказы, хотя рабочие режимы предельными не являлись: $I_K=2$ мА при $I_{K\max}=50$ мА; $I_B=2$ мА при $I_{B\max}=25$ мА; $U_{ЭК}=2$ В при $U_{ЭК\max}=15$ В; $U_{ЭБ}=10$ В при $U_{ЭБ\max}=30$ В. Необходимо также отметить, что подобные и другие отказы имели место при применении других полупроводниковых приборов, в том числе и интегральных микросхем.

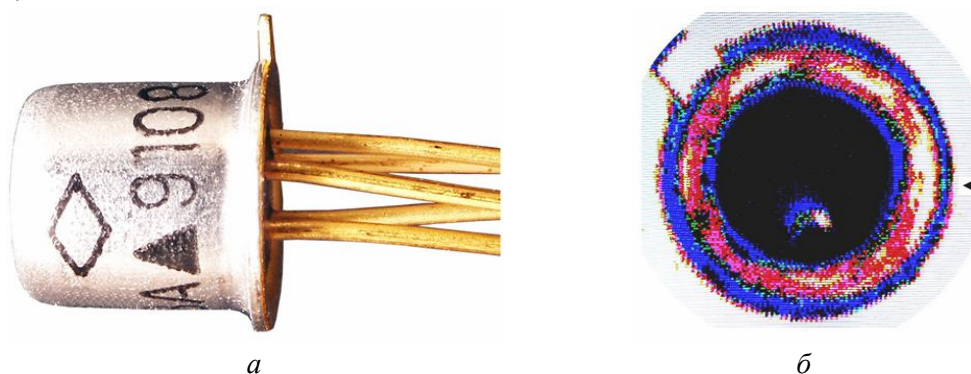


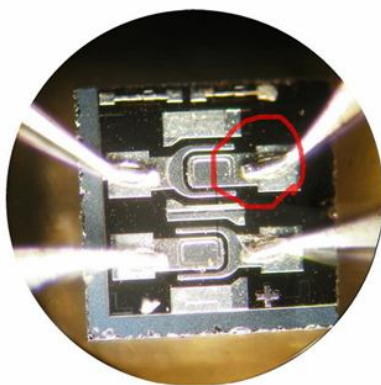
Рис. 1. Внешний вид полупроводникового прибора типа «а» (а); типовая лазерная фотоакустическая топограмма корпуса прибора 10 г с удовлетворительным сварным герметизирующим швом (б)

Экспериментальная часть

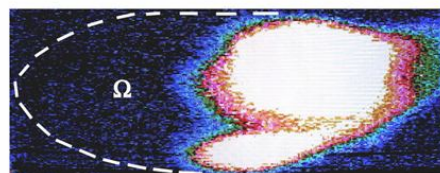
Для выяснения причины мерцающих отказов был найден источник поставки данного типа приборов хранящихся на складе в течение длительного времени, и была проведена комплексная диагностика максимально возможной выборки данного типа полупроводникового прибора (6 образцов типа «а»), а также нескольких приборов другого типа в аналогичном корпусе (ТО-18) различных производителей также с большими сроками хранения (4 образца условно типов «б», «в», «г», табл.). Диагностика проводилась для каждой сборочной операции в обратном порядке путем разборки конструкции образцов и контроля качества герметизации, микросварных проволоочных межсоединений, металлизированных покрытий и монтажа полупроводниковых кристаллов.

Качество герметизации 100% корпусов оценивалось неразрушающим лазерным фотоакустическим методом [1], не выявившим некачественные образцы. На типовой лазерной фотоакустической топограмме (пространственное разрешение – 50 мкм, чувствительность к нарушению сплошности структуры – до 10 нм) в виде внешнего синего кольца зарегистрирована сплошная, без разрывов, герметизирующая перегородка удовлетворительного сварного шва (рис. 1,б), неравномерного за счет смещения крышки и имеющего несколько отличающуюся структуру перегородки в самом узком месте (показано стрелкой).

Диагностика микросварных проволоочных межсоединений в объеме 100% проводилась (после вскрытия корпусов) методом, описанным выше, с последующим испытанием прочности проволоочных межсоединений на отрыв (табл.). Неразрушающий метод не выявил ни одного некачественного микросварного соединения. На рис. 2 приведены внешний вид и типовая фотоакустическая топограмма (пространственное разрешение – 0,5 мкм, чувствительность к нарушению сплошности структуры – до 10 нм) качественного соединения из числа диагностируемых.



a



б

Рис. 2. Внешний вид кристалла прибора 3а (*a*); типовая фотоакустическая топограмма качественного микросварного проволочного межсоединения (*б*)

Результаты испытаний прочности межсоединений на отрыв

№ и тип прибора	1а ВП	2а	3а	4а ВП	5а ВП	6а ВП	7б	8б	9в	10г
Дата изготовления	0406	9009	9006	9108	9108	0406	0281	0781	8906	8502
Прочность на отрыв, гс	≤1*	≤5**	≤4**	5÷6**	≤3**	≤3**	3**; 7***	3**; 5**	18****; 20****	≤3**
Примечание	1; рис. 3,а	1	1	1	1	1	1	1	2; рис. 3,б	3

* – обрыв металлизационного покрытия контактной площадки на кристалле (рис. 3,а);

** – обрыв проволоки в месте изгиба возле первой сварной точки на кристалле;

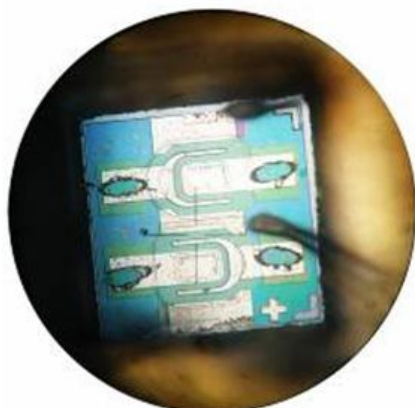
*** – обрыв проволоки возле второй сварной точки на траверсе;

**** – обрыв проволоки в месте ее выхода из слоя герметизирующего компаунда возле первой сварной точки;

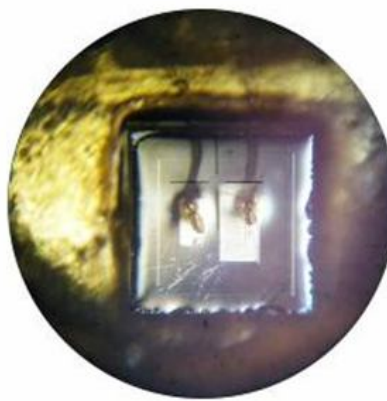
1 – Al проволока Ø 30 мкм, ультразвуковая сварка внахлест, инструмент с продольной канавкой;

2 – Au проволока Ø 40 мкм;

3 – Al проволока Ø 30 мкм, ультразвуковая сварка внахлест, инструмент с поперечной канавкой.



a



б

Рис. 3. Внешний вид кристалла прибора 1а ВП после испытаний прочности проволочных межсоединений на отрыв (*a*); внешний вид кристалла прибора 9в с герметизирующим компаундом (*б*)

При формировании проволочных межсоединений методом ультразвуковой микросварки на участке, примыкающем к первой сварной точке, происходит «травмирование» проволоки, что приводит к снижению прочности межсоединения и обрыву проволоки именно на этом участке. Реальная прочность межсоединения оказывается много меньше когезионной прочности проволоки и прочности микросварного соединения. В случае прибора 9в, вследствие армирования слабого участка проволочного межсоединения герметизирующим компаундом

(рис. 3,б), произошло увеличение прочности до $18\div 20$ гс. Однако даже в этом случае возможное наличие трещин в проволоке на «слабом» участке запускает механизм деградации межсоединения вследствие электропереноса, что также снижает уровень эксплуатационной надежности полупроводникового прибора.

Контроль суммарной толщины остаточных окислов $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ на поверхности металлизированных покрытий контактных площадок кристаллов образцов 1а – 8б, 10г проводился методом лазерной эллипсометрии [2]. Величина измеренной толщины окислов оказалась $< 180 \text{ \AA}$, что является необходимым условием обеспечения качественной ультразвуковой микросварки.

Лазерное интерферометрическое исследование монтажной конструкции всех полупроводниковых кристаллов диагностируемых образцов показало отсутствие остаточных механических напряжений после эвтектической пайки, что свидетельствует о завершенном процессе релаксации напряженного состояния проходящем путем разрушения кристаллической структуры вследствие возникновения в дефектных областях концентраторов напряжения [3]. Это предположение полностью подтвердилось при проведении неразрушающей лазерной фотоакустической диагностики внутренней структуры монтажных конструкций «кристалл - подложка» всех образцов. На типовой лазерной фотоакустической топограмме (пространственное разрешение – 50 мкм) прибора 1а (рис. 4,б), равно как и остальных девяти образцов, зарегистрирована почти 100%-я несплошность (белая область) в пределах площади полупроводникового кристалла. Контроль внешнего вида всех полупроводниковых кристаллов выявил наличие обширных дефектных зон по периметру всех диагностируемых полупроводниковых кристаллов (рис. 5,а).



Рис. 4. Внешний вид (а) и лазерная фотоакустическая топограмма (б) прибора 1а

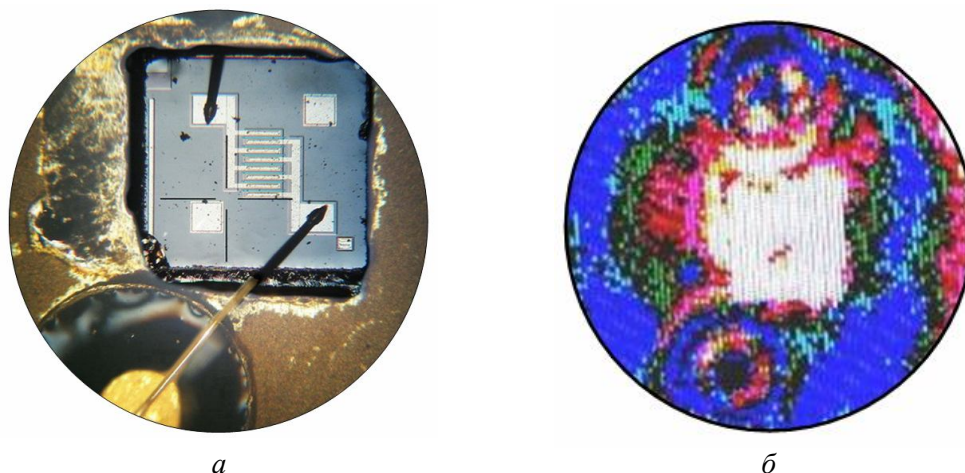


Рис. 5. Внешний вид полупроводникового кристалла (а) и соответствующая лазерная фотоакустическая топограмма (б) образца 7б

Это говорит о том, что при разделении полупроводниковой пластины на высотных гранях кристаллов образовывались открытые трещины, на которых сдвиговые деформации созда-

ют концентраторы напряжений (≤ 200) [4]. Процесс деградации кристаллической структуры в зависимости от соотношения неблагоприятных факторов (воздействие последующих сборочных операций, условия эксплуатации) может иметь «ползучий» характер (рис. 6), но возможно также мгновенное, лавинообразное разрушение (рис. 7), поскольку при увеличении размеров полупроводникового кристалла напряженность монтажной конструкции пропорционально повышается.

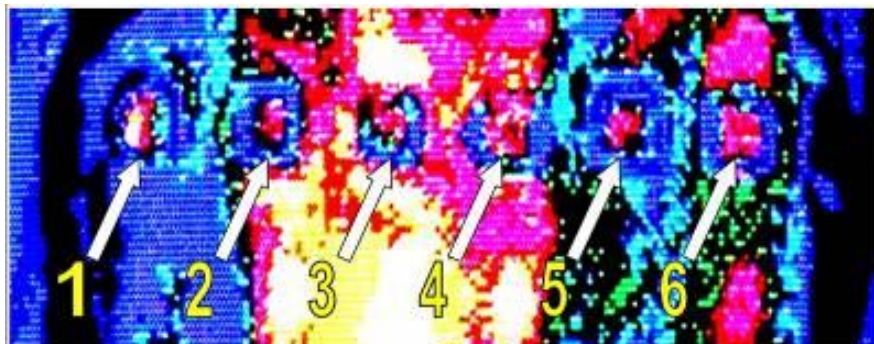
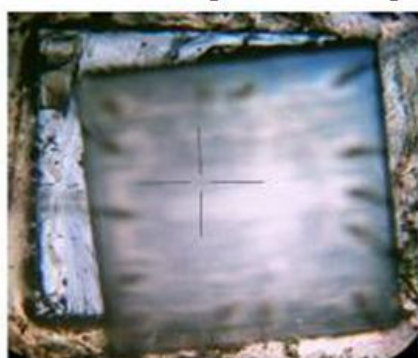
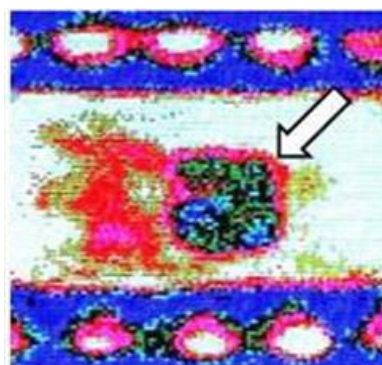


Рис. 6. Лазерная фотоакустическая топограмма монтажной конструкции, вышедшей из строя диодной матрицы

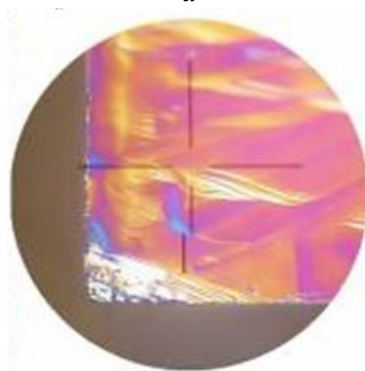
Стрелками показаны области нахождения полупроводниковых кристаллов с различной степенью деградации структуры. Кристалл №6 – 100%-я деградация, что подтвердило предварительный вывод о его отказе при проверке электрических параметров до вскрытия корпуса.



а



б



в



г

Рис. 7. Внешний вид продольно расслоившегося п/п кристалла отказавшей интегральной микросхемы (*а*); лазерная фотоакустическая топограмма удовлетворительной монтажной конструкции «подложка – эвтектический спай – нижняя часть расслоившегося кристалла» (*б*); внешний вид соответствующих друг другу углов непланарной стороны верхней (*в*) и планарной стороны нижней (*г*) частей продольно расслоившегося п/п кристалла отказавшей интегральной микросхемы с нехарактерным для других углов выколом, инициировавшим лавинообразное разрушение

Наиболее вероятной причиной возникновения трещин на высотных гранях является воздействие режущего инструмента на материал при разделении полупроводниковых пластин.

Попутное направление подачи является наиболее благоприятным для минимизации уровня сколов на планарной стороне пластины. Однако в данном случае при сквозной резке пластины на эластичном адгезионном носителе за один проход сьем последних 10÷15 мкм полупроводникового материала происходит не резанием, а скалыванием с образованием больших выколов (до 100 мкм), поскольку под воздействием нормальной составляющей силы резания происходит разрушение обратной стороны пластины, так как абразивное зерно, закрепленное в лезвии диска, осуществляет сьем материала сверху вниз. Осколки разрушенного материала защемяют лезвие абразивного диска, вызывая нежелательные резонансные колебания за счет упругости адгезива, а также интенсивный износ самого режущего инструмента.

Для устранения этих недостатков традиционного способа сквозного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы на эластичном адгезионном носителе в свое время был разработан оптимальный вариант [4], который заключается в сочетании попутного и встречного направлений подачи. Резание планарной стороны реализуется в попутном направлении подачи (рис. 8,а) с глубиной резания на 50÷100 мкм меньше толщины заготовки, а резание оставшейся части пластины с разделением непланарной стороны происходит во встречном направлении подачи (рис. 8,б). При резании во встречном направлении подачи сьем материала абразивным зерном происходит снизу вверх. Поэтому разрушения скалыванием не происходит. При этом скорость подачи, как в попутном, так и во встречном направлениях может быть в 2÷4 раза выше, чем при сквозном разделении за один проход, при высоком качестве разделенных кристаллов и с повышенной производительностью.

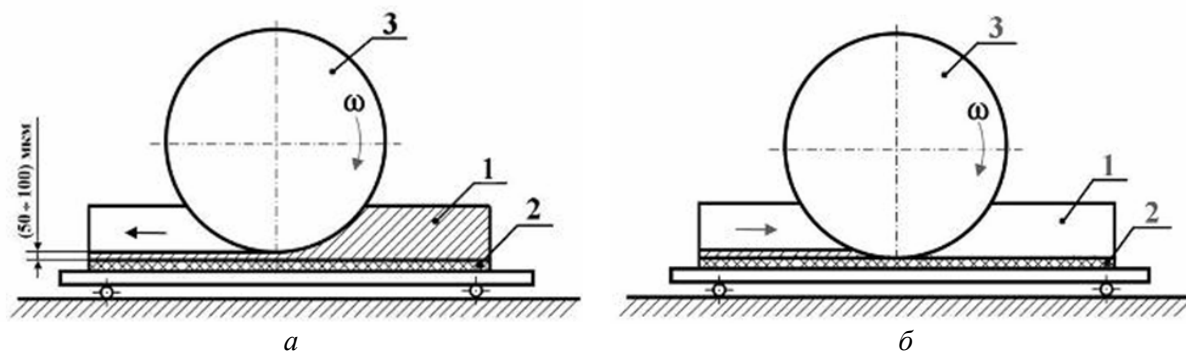


Рис. 8. Способ сквозного двухпроходного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы на эластичном адгезионном носителе; 1 – полупроводниковая пластина, 2 – эластичный адгезионный носитель, 3 – абразивный инструмент

Судя по исследованным образцам, на стадии разделения полупроводниковых пластин на кристаллы в фундамент сборочных операций закладывается «мина замедленного действия» в виде обширного дефектного слоя по периметру кристаллов, вызывающего полную деградацию кристаллической структуры даже во время вылеживания при хранении, без воздействия характерных факторов, возникающих при эксплуатации.

Выводы

Таким образом, можно утверждать, что контроль электрических параметров после проведения экстремальных испытаний оказывается неэффективным, поскольку не учитывает уменьшения уровня запаса надежности полупроводникового прибора. Это также относится к искусственному продлению изготовителями сроков сохраняемости приборов даже после перепроверки электрических параметров.

Лазерный фотоакустический метод контроля и диагностики неразъемных соединений позволяет визуализировать и документально фиксировать динамику развития несплошности неразъемных соединений на отдельных этапах испытаний одного и того же прибора, что позволяет корректировать технологические процессы, а также прогнозировать запас эксплуатационной надежности. Никакой другой интроскопический метод не имеет таких широких возможностей.

WORKING DEPENDABILITY ANALYSIS OF SPARE MICROELECTRONIC PRODUCTS

Y.F. VERTINSKY, S.S. WOLKENSTEIN, A.A. KHYMYL

Abstract

Destructive and nondestructive evaluation and diagnostics like laser photoacoustic microscopy, laser ellipsometry, visual inspection and interconnections strength test to destruction were applied in order to reveal the semiconductor device intermittent failure specific cause. The above-mentioned device chip inner structure destruction, visualized on the laser photoacoustic topograms, was confirmed during diagnosing various devices in the similar package being aging long time while storing. These devices assembly arrangement degradation was triggered by locked-in stress concentrators in peripheral defective layer which appeared during conventional wafer-plate through dicing. In order to minimize this undesirable phenomenon there was suggested optimal alternative of wafer-plate through dicing.

Литература

1. Волкеништейн С.С., Ланин В.Л., Хмыль А.А. // Компоненты и технологии/ 2007. №11. С. 154–158.
2. Oshige T., Yamada T., Kazama A. // US Patent №5311285.
3. Волкеништейн С.С., Хмыль А.А. // Технологии в электронной промышленности. 2011. №2, С. 54–58.
4. Васильев В.Л., Караев А.Л., Корнилов А.В. и др. // Описание изобретения к авторскому свидетельству SU 1637594 A1.