

# Влагоустойчивость интегральных микросхем в пластмассовых корпусах

Для повышения влагоустойчивости пластмассовых корпусов интегральных схем предложено ввести кремнийорганический подслои и применить конструкцию выводной рамки с «замками герметичности» по периметру кристаллодержателя.

Анатолий Керенцев

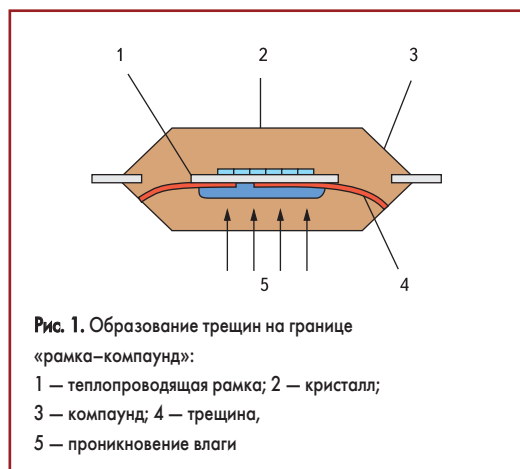
akerentsev@transistor.com.by

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

## Проблемы влагоустойчивости пластмассовых корпусов

Повышение влагоустойчивости полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС) в пластмассовых корпусах является актуальной задачей, так как причины отказов микросхем — это растрескивание корпусов в процессе пайки и коррозия алюминиевых проводников и контактных площадок на поверхности кристалла. Негерметичный пластмассовый корпус — серьезная проблема защиты сложных электронных компонентов [1]. Пластмассовые корпуса, предназначенные для поверхностного монтажа, могут расслаиваться или трескаться в процессе пайки оплавлением. Эффект трескания корпусов типа «попкорн» вызван небольшими количествами влаги, поглощенной формирующим пластмассу компаундом [2]. Поглощенная влага имеет тенденцию собираться под кристаллом, прикрепленным к основанию, и превращаться в пар, при нагреве корпуса до 218–230 °С, это типичная температура для процесса пайки оплавлением [3]. Образующийся пар создает давление на границе «кристалл–компаунд» и вызывает расслаивание и растрескивание пластмассовых корпусов (рис. 1).



Существует два пути проникновения влаги на поверхность кристаллов микросхем, защищенных эпоксидными компаундами. Первый — через поверхность раздела между компаундом и выводами; второй — при диффузии влаги через материал корпуса. Все пластмассы в какой-то степени адсорбируют влагу, однако количественно влагоустойчивость зависит от структуры защитного покрытия и условий отверждения. Компаунды, содержащие в своем составе полярные гидрофильные группы, адсорбируют влагу значительно больше, чем неполярные смолы.

При определении времени влагозащиты следует рассматривать явление сорбции влаги герметизирующим материалом и постоянное выравнивание ее концентрации по толщине оболочки, то есть постепенное повышение концентрации влаги на поверхности герметизируемого изделия. Расчет обычно сводится к определению времени, в течение которого на внутренней стороне герметизирующей оболочки образуется критическая концентрация влаги, соответствующая критическому давлению паров воды. Поэтому время наступления такого состояния будет определяться толщиной оболочки, а также скоростью процесса сорбции, то есть коэффициентом диффузии влаги в полимер [4]. Время влагозащиты монолитных полимерных корпусов можно определить по формуле:

$$t = \frac{0,8h^2}{\pi^2 D} \ln\left(1 - \frac{P_{кр}}{P_0}\right), \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии влаги,  $h$  — толщина пластмассы,  $P_{кр}$  — критическое давление паров воды,  $P_0$  — давление насыщения паров воды.

Температурная зависимость коэффициента диффузии  $D$  определяется выражением [5]:

$$D = D_0 \exp(-\Delta E_D/kT), \quad (2)$$

где  $D_0 = 1,19 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\Delta E_D$  — энергия активации (0,35 эВ),  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Таблица 1. Содержание ионных примесей в пресс-материалах

Параметр	Типы пресс-материалов			
	МЭП-5Т (Россия)	MG-40FR (Германия)	ЕМЕ-1200т (Япония)	ST7100-DSA (Корея)
Содержание ионов Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , %	5·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>

В результате адсорбции влаги и диффузии ее через герметизирующую оболочку со временем увеличивается количество адсорбированной влаги, вплоть до некоторого значения, являющегося для данного изделия критическим. Однако при образовании адгезионных связей герметизирующего материала с поверхностью теплоотвода, энергия которых превышает энергию адсорбции влаги этой поверхностью, действительное время влагозащиты превысит значение, определенное согласно выражению (1):

$$t = t_{\text{диф}} + t_{\text{адг}}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{диф}}$  — время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой полимера;  $t_{\text{адг}}$  — время влагозащиты, обусловленное наличием адгезионных связей полимера с поверхностью кристаллодержателя.

Применение эффективной дополнительной защиты кристалла (нанесение защитного компаунда) позволяет увеличить время влагозащиты за счет  $t_{\text{диф}}$ , которая в этом случае будет состоять из двух составляющих:

$$t_{\text{диф}} = t_{\text{диф1}} + t_{\text{диф2}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{диф1}}$  — время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой полимерного корпуса;  $t_{\text{диф2}}$  — время влагозащиты, обусловленное временем диффузии влаги через герметизирующий слой компаунда на кристалле.

Однако не всякий компаунд обладает эффективной защитой от проникновения влаги. В результате проникновения влаги и растворенных в ней ионных загрязнений, которые, попадая на поверхность кристалла, образуют агрессивный электролит, возникает коррозия алюминиевых проводников и контактных пло-

щадок на поверхности кристалла. Мобильные ионы Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, и особенно Cl<sup>-</sup>, более всего способствуют разрушению алюминиевой металлизации.

Современная технология получения герметизирующих материалов позволяет свести к минимуму количество ионов Cl и других примесей. Так, пресс-материалы различных фирм-изготовителей содержат в своем составе ионогенные примеси от 5·10<sup>-3</sup> до 5·10<sup>-6</sup>% (табл. 1).

Проникновение мобильных ионов внутрь корпуса может происходить в процессе изготовления ИМС во время проведения операций очистки, металлизации, маркировки, пайки и др. Для изделий в пластмассовых корпусах попадание ионов хлора наиболее возможно на таких операциях, предшествующих гальваническому осаждению сплава олово-висмут на внешние выводы и теплоотвод, как обезжиривание деталей в растворе CaCO<sub>3</sub>+NaON+Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>+стекло натриевое при температуре 60...80 °С в течение 10–15 мин с плотностью тока на катоде 0,5–1,0 А/дм<sup>2</sup>, травление в растворе HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:HCl = 1:1:0,2 в течение 3–5 с и декапирование в растворе HCl:H<sub>2</sub>O = 2:1 в течение 60–180 с.

### Выбор оптимального защитного компаунда

Были исследованы компаунды, имеющие широкое применение в производстве как полупроводниковых приборов, так и интегральных микросхем: ЭП-91, КО-97, АД-9103, ЛД, ККП-2. Собранный арматура, изготовленная на основе выводной рамки из медного сплава N68 с напаянными кристаллами и проволочными перемычками, подвергалась защите указанными полимерными компаундами, с последующей выдержкой под выгяжкой в течение 30 мин и сушкой по заданной циклограмме с повыше-

нием температуры с 50 до 200 °С с шагом 50 °С и выдержкой на каждом шаге 10–12 мин, а также снижением температуры с 200 до 50 °С с таким же шагом 50 °С и выдержкой 10–12 мин на каждом шаге. Контроль по внешнему виду выявил полное покрытие кристалла компаундами в соответствии с требованиями технической документации.

Затем было проведено исследование эффективности защиты кристалла различными компаундами при воздействии агрессивных сред. Эффективность защиты от воздействия агрессивных сред оценивали на арматуре, собранной до формирования полимерного корпуса. Арматура, собранная с различными защитными покрытиями типа ЭП-91, КО-97, ЛД, КЭН-3, АД-9103 и ККП-2, подвергалась воздействию агрессивных сред, предусмотренных технологическим процессом. Внешний вид защитных покрытий оценивался до и после последовательной выдержки в агрессивных средах, а результаты контроля внешнего вида представлены в таблице 2.

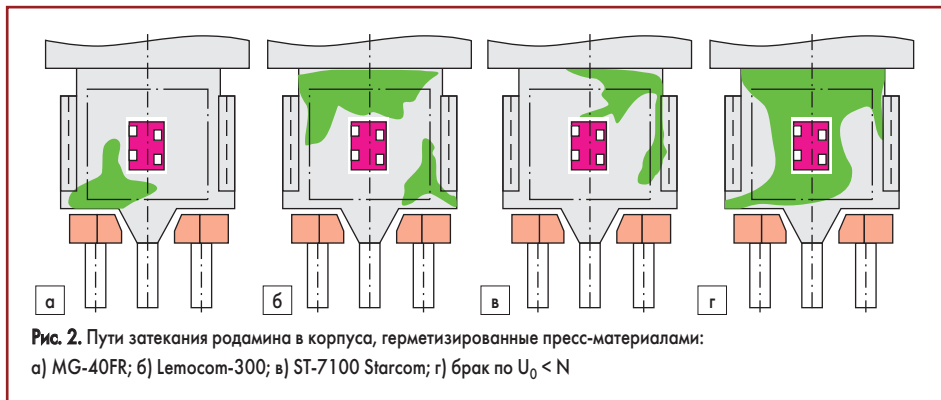
Из полученных результатов видно, что прямое воздействие агрессивных сред на полимерные защитные покрытия ЭП-91, КО-97, ЛД, КЭН-3, АД-9103 приводит к деструкции и разрушению, снижению адгезии как к металлическому кристаллодержателю, так и к кремниевому кристаллу. В свою очередь, это приводит к попаданию влаги на кристалл и растравливанию алюминиевой металлизации на кристалле.

При использовании коррозионно-пассивного компаунда ККП-2 было выявлено локальное растравливание металлизации возле микросварного соединения. Это указывает на то, что натекание агрессивной среды произошло по проволочному выводу. В целом защитное покрытие ККП-2 эффективно защищает активную структуру от воздействия влаги и агрессивных сред.

Также следует иметь в виду, что для получения влагостойких полимерных корпусов важное значение имеет технология их формирования, в частности подготовка и очистка поверхности пресс-формы перед процессом герметизации. Плохо подготовленная и неочи-

Таблица 2. Состояние внешнего вида компаунда и алюминиевой металлизации на кристалле после воздействия агрессивных сред

Тип компаунда	Электрохимическое обезжиривание		Травление, декапирование		Нанесение покрытия Sn-Pb на выводы	
	Катод — 2,5/ Анод — 7,5, мин	Катод — 12/ Анод — 4, мин	3 мин	5 мин	30 мин	90 мин
ЛД	Внешний вид без изменений	Внешний вид без изменений	На гранях разрушилась пленка, началась коррозия металлизации	На поверхности кристалла нет защиты, пленка поднялась. Полностью стравлена металлизация	Отслоение пленки, растравлена металлизация	Отслоение пленки, растравлена металлизация
ККП-2	Внешний вид без изменений	Внешний вид без изменений	Внешний вид без изменений	Внешний вид без изменений	Адгезия к кристаллу хорошая, частичная коррозия металлизации в области сварного соединения	Адгезия к кристаллу нормальная, частичное растравливание металлизации в области сварного соединения
АД-9103	Внешний вид без изменений	Коррозия металлизации	Покрывание отслоилось, растравливание металлизации	Покрывания нет, металлизация стравлена	Покрывания нет, металлизация стравлена	Покрывания нет, металлизация стравлена
КО-97	Внешний вид без изменений	Отслоение от поверхности металлического кристаллодержателя	Видимых разрушений нет	Отслаивание от кристаллодержателя	Покрывание хрупкое, на гранях кристалла разрушения, растравливание металлизации	Разрушения по границам кристалла, отслаивание от кристалла, растравливание металлизации
КЭН-3	Отслаивание от поверхности кристаллодержателя	Отслаивание покрытия, частично от кристалла	Отслаивание от кристалла, стравливание металлизации	Отслаивание от кристалла, стравливание металлизации	Отслаивание от кристалла, стравливание металлизации	Отсутствие покрытия, растравливание металлизации



**Рис. 2.** Пути затекания роданина в корпус, герметизированные пресс-материалами:  
а) MG-40FR; б) Lemocom-300; в) ST-7100 Starcom; г) брак по  $U_0 < N$

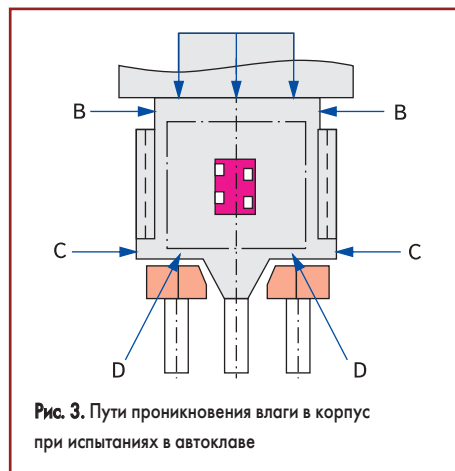
щенная поверхность пресс-формы может приводить к снижению качества формования и ухудшению герметичности корпуса. Поэтому неперемным условием является процедура хорошей периодической очистки пресс-форм, частота которой зависит от конструкции пресс-формы, параметров прессования, используемого пресс-материала. Так, при использовании меламинового очистителя MLC-100T с минеральным наполнителем очистку пресс-формы следует проводить не менее 8 раз. При этом качество очистки определяется визуально. Остатки компонентов самого очистителя в гнездах пресс-формы могут внедряться в состав полимерного корпуса в процессе последующей герметизации, ухудшая качество приборов. Для повышения эффективности отделения корпуса от зеркала пресс-формы без остатков пресс-материала в конструкции пресс-формы предусмотрено двухслойное хромовое покрытие, а угол боковых стенок литниковой системы выбран в пределах  $9-10^\circ$ . Для оценки эффективности очистки пресс-формы меламином MLC-100T было изготовлено шесть контрольных запрессовок рабочих приборов. Установлено, что после первых трех запрессовок на поверхности корпусов выявляются пятна и локальные деформации от посторонних частиц. После 4–6-й запрессовки — поверхность корпусов чистая, без посторонних включений. Для приборов всех шести контрольных процессов уровень электрических параметров находится в допустимых пределах. Однако после изготовления приборов по полному технологическому маршруту и последующего проведения испытаний на влагуостойчивость в автоклаве в течение 100 ч выявлены отказы для приборов от первых трех запрессовок после очистки пресс-формы и отсутствия отказов для приборов последующих запрессовок. Из этого следует, что для повышения герметичности приборов необходимо соблюдать правило: после завершения очистки пресс-формы необходимо продолжать запрессовку «пустышек» рабочим пресс-материалом не менее трех раз.

Для оценки состояния влагуостойчивости корпуса ТО-220, изготовленного с использованием пресс-материалов разных производителей, проводилась выдержка приборов при избыточном давлении 0,5 МПа в спиртовом растворе, содержащем краситель для визуализации пути проникновения влаги. После вскрытия корпусов установлено, что основная масса затекшего роданина попадает в корпус со стороны кристаллодержателя, где от-

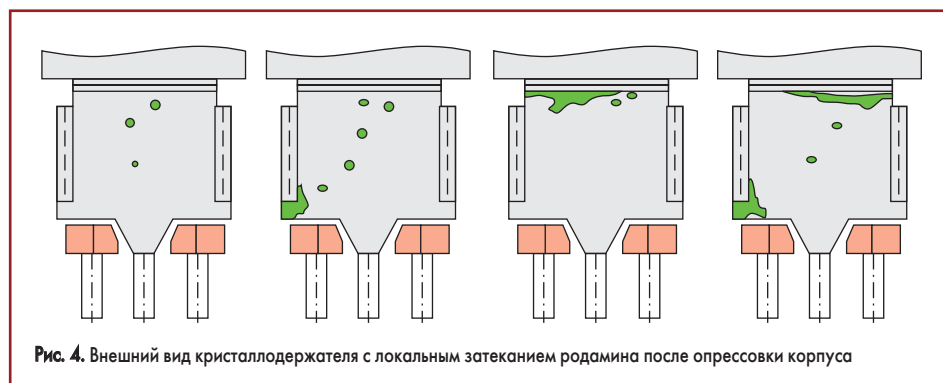
сутствует «замок». Внешний вид кристаллодержателей с затеканием роданина после опрессовки показан на рис. 2.

Пути проникновения влаги одинаковы для корпусов, изготовленных с использованием различных пресс-материалов. Это указывает на то, проникновение влаги происходит по границе «полимер–выводная рамка» и во многом определяется адгезионной составляющей  $t_{ад}$ , обусловленной наличием адгезионных связей полимера с поверхностью выводной рамки, а также ее конструкцией. Установлены основные пути затекания влаги в полимерный корпус в процессе испытаний в автоклаве (рис. 3): со стороны отверстия в теплоотводе (А), с верхней части боковых сторон кристаллодержателя выше «замка» (В), с нижней части боковых сторон кристаллодержателя ниже «замка» (С), с нижней части кристаллодержателя (D). В то же время со стороны выводов затекание роданина не выявлено.

Таким образом, для повышения влагуостойчивости необходимо улучшить адгезионную прочность сцепления пресс-материала с кри-



**Рис. 3.** Пути проникновения влаги в корпус при испытаниях в автоклаве



**Рис. 4.** Внешний вид кристаллодержателя с локальным затеканием роданина после опрессовки корпуса

сталлодержателем, что можно сделать, доработав конструкцию выводной рамки (включить в ее состав «замки герметичности» по периметру кристаллодержателя), а также выбрать оптимальные режимы герметизации и окончательного отверждения полимерного корпуса.

Для качественного определения адгезионных связей на границе «полимер–кристаллодержатель» выполнена герметизация пресс-материалом ST7100-DSA (Корея) при разном времени прессования (3 мин, 4 мин, 5 мин) и постоянном давлении прессования 0,35 МПа. Параметры пресс-материала: текучесть — 88 см; время желатинизации — 24 с. Плоскость полимерного корпуса исследовали двумя способами:

- опрессовкой в спиртовом растворе, содержащем краситель, при давлении 0,4 МПа в течение 15 мин, для локализации участка корпуса с повышенной влагупроницаемостью;

- методом лазерной фотоакустической диагностики.

Установлено, что в корпусах, расположенных в конце литникового канала, отмечается повышенное содержание локальных мест, в которых выявляется проникновение роданина. После опрессовки в роданине путем механического воздействия отделялась пластмассовая часть корпуса от кристаллодержателя и проводился контроль по внешнему виду с использованием микроскопа типа ММУ-3 при 150X и РЭМ-анализа. Результаты контроля по выявлению участков корпуса с затеканием роданина показаны на рис. 4.

Очевидно, что затекание роданина происходит по границе «полимер–кристаллодержатель» в углах кристаллодержателя, в которых отсутствуют «замки герметичности». Кроме того, в большинстве случаев выявлены локальные точечные проникновения роданина размером от 5 до 200 мкм. Это указывает на то, что проникновение происходит также сквозь слой пластмассы. Характерное распределение локальных областей обусловлено самим процессом герметизации на существующих прессах герметизации ДГ2432А: в процессе быстрой подачи расплава пресс-материала происходит захват воздуха в литниковых каналах, что вызывает турбулентное завихрение, приводящее к образованию воздушных микрополостей. Через такие локальные микрополости проникает влага (роданин). Однако после окончательного отверждения пластмассового корпуса размер точечного проникновения

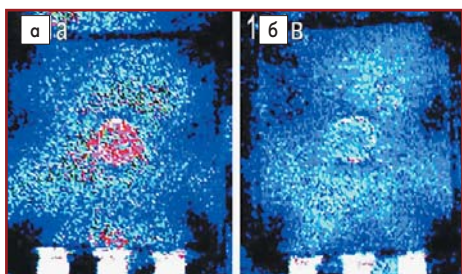


Рис. 5. Лазерное фотоакустическое диагностирование качества корпусирования:  
а) 3 мин; б) 5 мин

родамина резко уменьшается до 0–10 мкм, а во многих образцах оно полностью отсутствует, но остаются начальные участки попадания родамина по углам с нижней стороны кристаллодержателя.

Исследования, проведенные с использованием лазерной акустической микроскопии, показали, что снижение времени герметизации до 3 мин (рис. 5а) приводит к образованию обширных участков с низкой адгезионной прочностью сцепления пластмассы с кристаллодержателем. Наилучшая адгезионная прочность сцепления получена при увеличении времени герметизации до 5 мин (рис. 5б).

### Испытания корпусов на влагостойкость

Для оценки влагостойкости ИМС в пластмассовом корпусе целесообразно использовать ускоренные методы испытаний: при повышении температуры и влажности среды с приложением внешнего напряжения (НАСТ) и без напряжения (РСТ). Пластмассовый корпус не может полностью изолировать активную структуру ИМС от воздействия влаги. При этом резко ускоряются процессы, приводящие к отказам ИМС. Поэтому наиболее распространенным является метод испытаний под давлением пара (pressure cookertest, РСТ) в автоклаве. Испытание в автоклаве проводится в режиме хранения в перегретом паре при температуре +121 °С, давлении 0,2 МПа и относительной влажности 100% [5]. Такие ис-

пытания проводили в течение 240 ч. При этом перегретый пар быстро проникает по дефектам пластмассового корпуса и инициирует процессы гальванической коррозии. При испытаниях в автоклаве коэффициент ускорения определяли из выражения:

$$K_y = E_a / K(1/T_0 - 1/T_\phi), \quad (5)$$

где  $E_a$  — энергия активации механизмов отказов (эВ);  $K$  — постоянная Больцмана;  $T_0, T_\phi$  — температура изделия, начальная и в режиме испытаний (К) соответственно.

При приложении в этих условиях к ИМС электрической нагрузки (highly accelerated stress test, HAST) реализуются испытания с большим ускорением. Они проводятся не только при температуре 121 °С, но и при более высоких температурах, вплоть до 155 °С, в условиях ненасыщенного пара (80–85% относительной влажности). При этом коэффициенты ускорения для ИМС в пластмассовых корпусах достигают 700–3500.

Для определения влагостойкости ИМС в пластмассовом корпусе ТО-220 были изготовлены мощные стабилизаторы напряжения с выходным напряжением  $U_0 = 5,0 \pm 0,2$  В. Обработка пресс-формы проводилась меламиновым очистителем MLC-100Т, а герметизация рабочих приборов выполнялась пресс-материалом ST7100-DSA после третьей пробной запрессовки при температуре 175 °С и различном времени прессования (3–5 мин). Окончательное отверждение пресс-материала осуществлялось при температурах 150...175 °С.

После полного цикла изготовления приборы проходили измерение параметров и затем были переданы на испытания:

- 1) электротермотоковая тренировка 72 ч;
- 2) влагостойкость в течение 4 суток при  $T = 40$  °С,  $\phi = 95\%$ ;
- 3) влагостойкость по ускоренному методу РСТ при  $T = 121$  °С, давлении 0,2 МПа, влажности 100%, с последующим контролем параметров ИМС через 24 ч.

Результаты испытаний показали, что при проведении электротермотоковой тренировки и испытаний на влагостойкость в те-

чение 4 суток при  $T = 40$  °С,  $\phi = 95\%$  отказов не выявлено. Результаты испытаний в автоклаве представлены на рис. 6.

Установлено, что для приборов без защиты компаундом количество отказов по  $U_0 < N$ , из-за коррозионного разрушения на активной структуре кристалла, составляет 20%, а для приборов с защитой кристалла компаундом отказов такого рода не отмечалось. Внешний вид фрагментов активных структур, с защитой компаундом и без, прошедших испытания в автоклаве, показан на рис. 7. Отсутствие защиты кристалла компаундом привело к коррозионному разрушению Al-металлизации на контактных площадках и на топологических элементах, а применение компаунда позволило защитить активную структуру от разрушения. Полученные результаты указывают на способность компаунда повышать влагостойкость активной структуры ИМС, герметизированной пресс-материалом.

В то же время для обоих вариантов характерно наличие отказов по  $U_0 > N$ , что связано с обрывом общего вывода, присоединенного к кристаллодержателю, в результате проникновения влаги и развития коррозионных процессов. Внешний вид такого отказа микросварного соединения (при разварке на кристаллодержатель) показан на рис. 8.

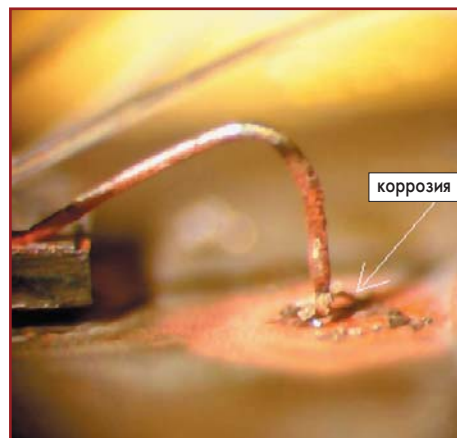


Рис. 8. Внешний вид обрыва микросварного соединения

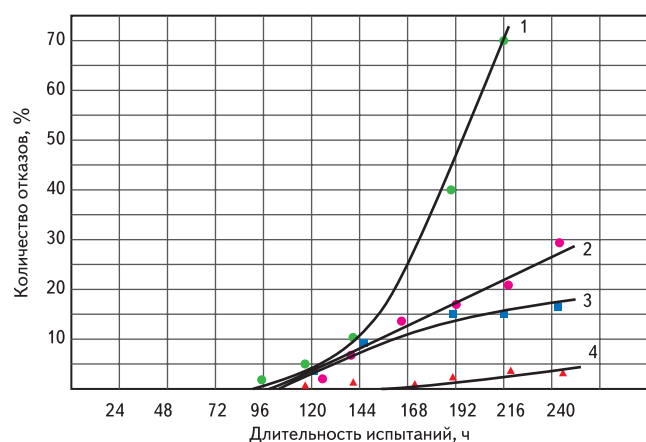


Рис. 6. Динамика роста отказов по  $U_0 > N$  и  $U_0 < N$  после испытаний в автоклаве:  
1 — герметизация 3 мин; 2 — герметизация 5 мин; 3 — кристалл защищен компаундом; 4 — кристалл и общий вывод защищены компаундом

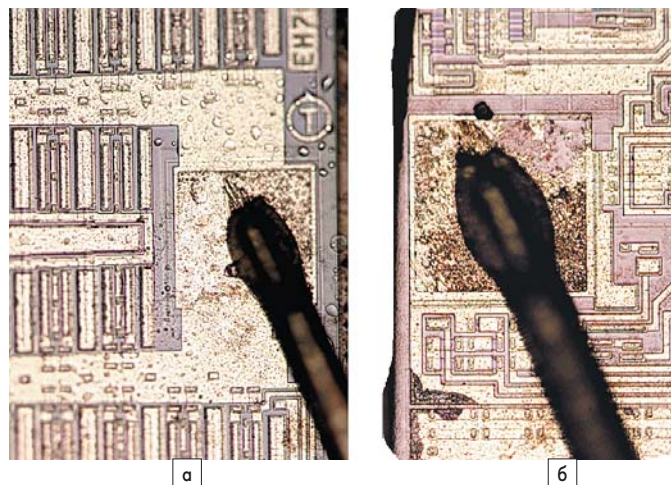


Рис. 7. Внешний вид фрагментов топологии кристаллов после испытаний в автоклаве:  
а) с защитой компаундом; б) без защиты

Таким образом, результаты испытаний показали, что ИМС КР142ЕН5А (с защитой кристалла компаундом и без нее), загерметизированные пресс-материалом ST7100-DSA при  $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3 мин, и с проведением теплового старения при  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 24 ч, соответствуют требованиям ТУ на прибор. В то же время оценка конструктивных запасов в форсированном режиме показала, что конструкция ИМС устойчива к автоклавным испытаниям только в течение 48 ч.

При более длительных испытаниях в автоклаве в условиях воздействия повышенной температуры при  $T = +121\text{ }^{\circ}\text{C}$  и избыточном давлении 0,2 МПа происходит гидролизное разрушение адгезионных связей и натекание влаги в корпус по границе раздела «кристаллодержатель–пластмасса», что приводит к обрыву общего вывода на кристаллодержателе из-за коррозионных процессов. Применение дополнительной защиты кристалла компаундом обеспечило замедление коррозионных процессов на активной структуре при испытаниях в автоклаве в течение до 144 ч.

При проведении рентгеноспектрального анализа установлено, что во всех случаях от-

казов выявляются ионы хлора. Это связано, видимо, с тем, что проникающая влага активизирует примеси, содержащиеся в полимерном материале и на поверхности кристаллодержателя выводной рамки, причем концентрация ионов в полимере экспоненциально растет с ростом влагопоглощения.

#### Выводы

При достижении определенной концентрации влаги содержание ионогенных примесей вблизи рабочих поверхностей полупроводникового прибора оказывается достаточным для возникновения отказа. Введение кремнийорганического подслоя (коррозионно-пассивного компаунда ККП-2), чистота которого выше, а сорбция влаги ниже, чем у пресс-материала, приводит к снижению содержания примесей вблизи рабочих поверхностей изделия до безопасного уровня даже после достижения сорбционного равновесия. Для повышения влагоустойчивости целесообразна конструкция выводной рамки для сборки ИМС с дополнительными «замками герметичности» по периметру кристаллодержателя. ■

#### Литература

1. Волков В. А. Сборка и герметизация микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1982.
2. Pearson R. A., Lloyd T. B., Azimi H. R., Hsiung J.-C., Early M. S., Brandenburger P. D. Adhesion Issues in Epoxy-Based Chip Attach Adhesives // IEEE Trans. On Comp., Packag. and Manuf. Technol., 1997. V. 20. N 1.
3. Джюд М. Ю., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: Технологии, 2006.
4. Роздзял П. Технология герметизации элементов РЭА. М.: Радио и связь, 1981.
5. Теверовский А. А., Епифанов Е. Г. Исследование температурной зависимости влажностных характеристик герметизирующих пресс-материалов // Электронная техника, 1982. Сер. 6, вып. 1.
6. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Влагоустойчивость транзисторов в пластмассовых корпусах на основе эпокси-волачных смол // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001. № 2.