

Оптимизация конструктивно-технологического исполнения интегральных стабилизаторов напряжения

В статье описаны различные варианты оптимизации конструктивно-технологических исполнений интегральных стабилизаторов напряжения и технологических параметров сборки, обеспечивающие повышение выхода годных изделий.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Иван Рубцевич

Анатолий Керенцев

akerentsev@transistor.com.by

Схемотехника и конструктивно-технологическое исполнение интегральных стабилизаторов напряжения

Решение проблемы микроминиатюризации источников вторичного электропитания (ИВЭ) было достигнуто благодаря развитию класса силовых интегральных микросхем (ИМС), определяющим видом которых являются интегральные стабилизаторы напряжения (ИСН), характеризующиеся рабочими мощностями от единиц до десятков ватт. Появление таких ИМС дало возможность располагать их в непосредственной близости от потребителя электроэнергии, что позволило не только улучшить помехоустойчивость и электрическую развязку блоков по питанию, но и снизить рабочие уровни мощности. В этой области ИСН принадлежит ведущая роль, так как они могут использоваться в качестве схем управления для выполнения большинства функций ИВЭ.

В настоящее время развиваются два основных типа ИСН: с регулируемым и фиксированным выходным напряжением. Главной особенностью первого является отсутствие в их электрической цепи обратной связи измерителя сигнала в виде резистивного делителя, а также наличие выводов практически от каждого основного функционального узла. Универсальность свойств и включение дополнительных внешних компонентов для улучшения собственных электрических характеристик и энергетических параметров существенно расширяет область их применения при построении других функциональных модулей. Этот тип ИСН позволяет существенно сократить номенклатуру микросхем для создания ИВЭ различных классов электронной аппаратуры.

ИСН с фиксированным выходным напряжением представляют собой функционально законченные микросхемы, назначение которых — обеспечение неизменного выходного напряжения ИВЭ в усло-

виях воздействия различных дестабилизирующих факторов и защиты от электрических и тепловых перегрузок. Для стандартных линейных стабилизаторов падение напряжения между входом и выходом обычно составляет более 1 В (1,5–2,5 В). Величина этого порога напрямую влияет на эффективность преобразователя, т. к. вызывает потери в виде рассеивания бесполезной мощности на самом стабилизаторе.

Стабилизатор, как правило, состоит из четырех основных блоков (рис. 1): источника опорного напряжения (ИОН), проходного элемента, усилителя ошибки и резистивного делителя. В состав стабилизаторов включают схемы защиты по току, напряжению, температуре, управления, диагностики, индикации и др. Особенностью таких стабилизаторов является относительно высокая величина падения напряжения на регулирующем элементе, зависящая от конструктивного исполнения проходного элемента.

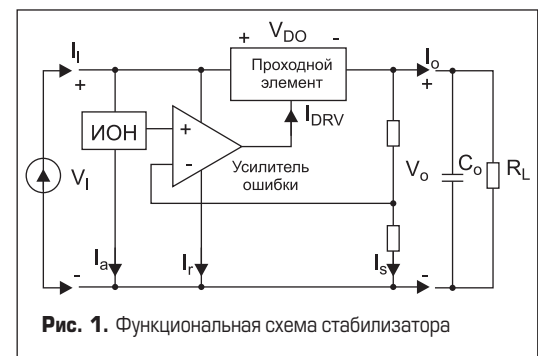


Рис. 1. Функциональная схема стабилизатора

В качестве примера можно рассмотреть линейный стабилизатор типа CS5201-xx (рис. 2). Серия стабилизаторов с фиксированным положительным напряжением типа CS5201-xx (Cherry Semiconductor Corporation) обеспечивает стабилизацию для токов до 1 А с высокой эффективностью [1]. Падение напряжения между входом и выходом является функ-

Таблица 1. Характеристики LDO-стабилизаторов с различными типами ПЭ

Параметр	Схема Дарлингтона	p-n-p составной	p-n-p		p-MOS	n-MOS составной	n-DMOS составной
			горизонтальный	вертикальный			
Рабочий ток, I ₀	высокий	высокий	высокий	высокий	средний	средний	средний
Падение напряжения, В	>1,6–2,5	>0,9	0,15–0,4	–	35 мВ	–	очень низкое
Ток покоя	средний	средний	высокий (0,8–2,6 мА)		низкий	низкий	низкий
Емкость на выходе	–	–	2,0 мкФ	0,5 мкФ	1,0 мкФ	–	–
Точность	хорошая	хорошая	хорошая	отличная	средняя	хорошая	хорошая
Технология	биполярная	биполярная	биполярная	BiCMOS/CBC	CMOS	CMOS	BCDMOS

цией тока нагрузки. Максимальное значение падения напряжения, равное 1,2 В, гарантируется при максимальном выходном токе, при более низких токах нагрузки оно уменьшается. Это достигнуто применением составного выходного транзистора. Встроенная подстройка позволяет регулировать опорное напряжение с точностью до 1%. Величина ограничения тока также подстраивается на стадии изготовления, уменьшая последствия перегрузки как на стабилизаторе, так и на схеме источника питания. Данные стабилизаторы достаточно удобны и имеют все необходимые функции защиты: от короткого замыкания, от выхода из области безопасной работы, а также тепловую защиту, которая выключает стабилизатор при температуре, превышающей +150 °С. Для устойчивой работы стабилизатора необходимо обязательное подключение на выходе микросхемы конденсатора 10 мкФ, однако обычно используют конденсатор большего номинала. В отличие от стабилизаторов с регулирующими p-n-p-транзисторами, где до 10% выходного тока тратится впустую в качестве потребляемого тока, потребляемый ток в стабилизаторе CS5201-xx течет через нагрузку, увеличивая КПД. В качестве проходного элемента используется биполярный составной транзистор [2].

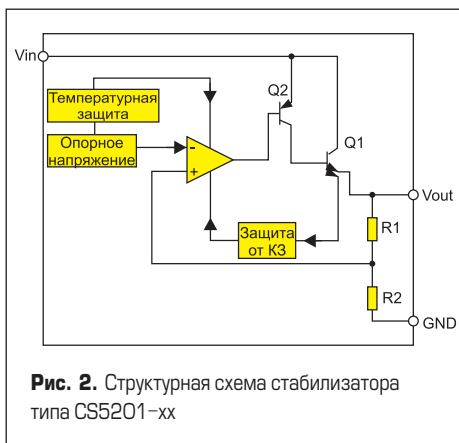


Рис. 2. Структурная схема стабилизатора типа CS5201-xx

Разновидностью ИСН являются линейные LDO-стабилизаторы (Low Dropout Output) с малыми потерями на проходном элементе (ПЭ) и максимальным КПД [3]. Поскольку ПЭ во многом определяют параметры стабилизаторов, то их обычно подразделяют на группы в зависимости от вида ПЭ (табл. 1): по схеме Дарлингтона, биполярной p-n-p, составной p-n-p, полевой p-MOS и составной n-DMOS.

За последние годы сменилось несколько поколений интегральных стабилизаторов. В пер-

вых LDO применялись исключительно p-n-p-транзисторы. С развитием CMOS-технологии ПЭ стали изготавливать на p-MOS-элементах, а в настоящее время — по BCDMOS-технологии. Стабилизаторы с транзисторами p-типа (p-n-p и p-MOS) имеют лучшие характеристики по падению напряжения, но склонны к самовозбуждению, чувствительны к параметрам конденсатора на выходе (емкости и эквивалентному последовательному сопротивлению). Стабилизаторы с ПЭ n-типа (n-p-n, n-MOS и n-DMOS) обладают высокой устойчивостью, способны работать с любыми конденсаторами на выходе, однако у n-p-n-стабилизаторов велико падение напряжения, в то время как для n-MOS требуется дополнительный источник смещения проходных транзисторов. Обычно это повышающий DC/DC-преобразователь на коммутируемых конденсаторах. Кроме усложнения схемы, такой источник создает дополнительный шум коммутации на выходе стабилизатора. Наибольшее распространение получили LDO-стабилизаторы с односторонним p-MOS проходным элементом. Например, IZ1735-xx — LDO-стабилизатор с низким падением напряжения с использованием в качестве проходного элемента p-MOS-транзистора. Линейный стабилизатор IZ1735-xx отличается низким остаточным напряжением. Главными его характеристиками являются отсутствие потерь базового тока, низкое остаточное напряжение и технологический разброс выходного напряжения ±2%. Типовое значение тока потребления на уровне — 65 мкА, как без нагрузки, так и в режиме максимальной нагрузки. Остаточное напряжение при выходном токе 500 мА составляет 0,65 В. В микросхеме встроено ограничение тока короткого замыкания для обеспечения защиты (рис. 3).

Точность выходного напряжения LDO-стабилизатора зависит от точности источ-

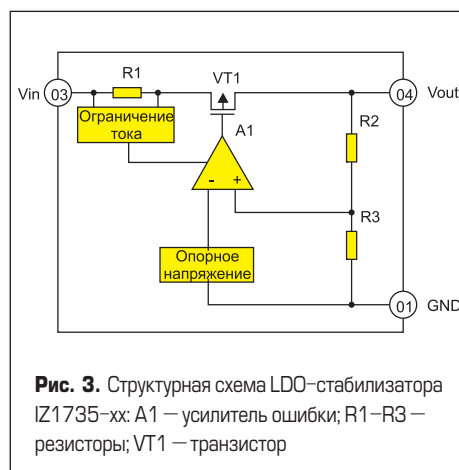


Рис. 3. Структурная схема LDO-стабилизатора IZ1735-xx: A1 — усилитель ошибки; R1–R3 — резисторы; VT1 — транзистор

ника опорного напряжения и источника напряжения смещения, что напрямую влияет на КПД стабилизатора. Ток на выходе обычно измеряют при минимальной нагрузке или при входном напряжении, значительно превышающем падение напряжения на проходном элементе. Особенностью n-p-n-LDO-стабилизаторов является то, что в режиме экономии энергии стабилизатор потребляет максимальный ток [4].

В LDO-стабилизаторах используется стандартный набор сервисных схем: защиты от перегрузки по току и перегрева, предохраняющие питаемую стабилизатором аппаратуру от повышенного и пониженного выходного напряжения. Кроме того, в LDO применяют схемы плавного запуска, позволяющие получить стабилизированное выходное напряжение без перерегулирования. Токковую защиту обычно производят, ограничивая ток нагрузки на уровне 1,25 от номинального значения. При достижении выходным напряжением опасного уровня (обычно не превышающего 1,4 от номинала) происходит кратковременное или постоянное отключение стабилизатора. Возможно также дистанционное управление — отключение стабилизатора логическим сигналом определенного уровня. Широко используется дистанционное управление группой стабилизаторов для программного включения или отключения отдельных приборов в соответствии с необходимым алгоритмом. LDO-стабилизаторы широкой номенклатуры различаются по электрическим характеристикам и конструктивному исполнению: базовые с фиксированным и регулируемым выходным напряжением; в корпусах для поверхностного монтажа (SOT, MSOP, CSP); прецизионные; двоярные, строенные и т. д.; с супервизорной (SVS) схемой управления; с быстрым откликом; экономичные (с малым статическим током); с управляющей логикой для питания DSP; с отрицательным выходным напряжением.

В серийном производстве ведутся работы по субмикронному BCDMOS-процессу, который позволит значительно улучшить параметры как аналоговых, так и цифровых схем LDO, увеличить плотность их компоновки и снизить величину R_{DS(on)}. При использовании субмикронного BCDMOS-процесса сопротивление R_{DS(on)} проходного транзистора может быть снижено до 60 мОм/мм², что лучше, чем у p-MOS-приборов. BCDMOS-технология позволяет изготавливать стабилизаторы не только с более низким падением напряжения, но и с более высоким выходным напряжением.

Методика анализа дефектов

Исследовано влияние конструкторско-технологического исполнения приборов и технологических параметров сборки на стабильность параметров ИСН в корпусе КТ-90 (рис. 4) с током потребления $I_{пот} = 1$ А, выходным напряжением $U_{вых} = 5$ В, нестабильностью по напряжению $K_U = 0,05$ %/В, нестабильностью по току $K_I = 1,33$ %/А.

В процессе производства ИСН основным видом брака являются сколы кремния в приповерхностной области кристалла, что приводит к браку готовых ИСН по току потребления $I_{пот}$, выходному напряжению $U_{в}$, коэффициентам нестабильности по току ΔK_I и напряжению ΔK_U и снижает выход годных изделий.

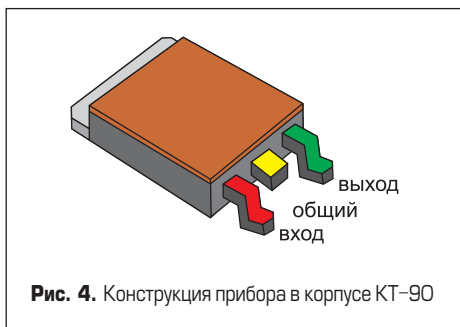


Рис. 4. Конструкция прибора в корпусе КТ-90

Сквозное разделение пластин толщиной 300 мкм на кристаллы выполнялось на автомате ЭМ-2005 режущими дисками ДАР4-В2, ДАР4-В3. В рабочей зоне автомата оптоволоконная система обеспечивала автоматическое совмещение разделительной дорожки с лезвием инструмента, выполнялась сквозная резка в двух направлениях, структурная гидродинамическая очистка пластин пульсирующей водяной струей высокого давления и сушка нагретым воздухом [5]. Поскольку активная часть структуры располагается на расстоянии 100 мкм от края кристалла (рис. 5), то при сквозном разделении пластин на кристаллы возможно искажение активной структуры с возникновением напряженно-деформированного состояния.

Предварительная прикатка режущих дисков проводилась в соответствии с требованиями технической документации. После прикатки разрезали контрольные пластины при скорости реза 20 000 и 30 000 об/мин. и скоро-

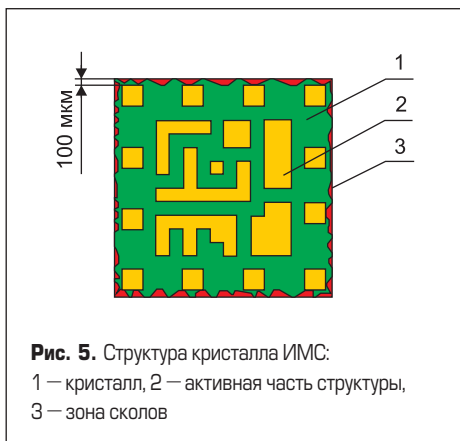


Рис. 5. Структура кристалла ИМС:
1 — кристалл, 2 — активная часть структуры, 3 — зона сколов

сти подачи пластины 10–80 мм/с. Контроль параметров реза проводился на оптическом микроскопе с точностью 0,2 мкм. После отмывки и сушки пластин выбирались кристаллы из трех областей: у базового среза — 1, в центре — 2, напротив базового среза — 3, которые собирались в кассету (рис. 6) для пайки в конвейерной водородной печи ЖК-4007. На основание кассеты укладывалась рамка, затем сверху трафарет, который фиксировался прижимной планкой. В окна трафарета на кристаллодержатель рамки помещалась прокладка припоя, а затем кристалл. Собранный таким образом кассета загружалась в конвейерную печь для пайки кристалла.

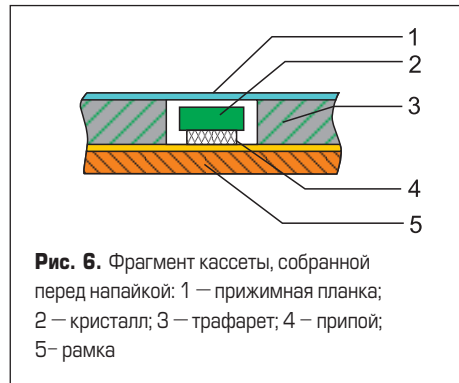


Рис. 6. Фрагмент кассеты, собранной перед напайкой: 1 — прижимная планка; 2 — кристалл; 3 — трафарет; 4 — припой; 5 — рамка

После разбраковки напаянных кристаллов проводилась ультразвуковая разварка внутренних проволочных перемычек на автомате ЭМ-4020Б с использованием алюминиевой проволоки диаметром 80 мкм АКП-80-ПТ и микросварочных инструментов: КУТ14-60-180 с треугольной канавкой на рабочем торце [6] и опытного инструмента с радиусом вместо режущей кромки. Особенностью конструкции ИСН является то, что ультразвуковая сварка выводов выполнялась на трех уровнях: первый — траверса; второй — кристалл; третий — плоскость кристаллодержателя.

К браку микросварных соединений относятся: низкая прочность при испытаниях или недопустимый характер обрыва (по границе сварного контакта без следов адгезии, с отрывом металлизации на кристалле); провисание петли соединения, которое может быть причиной закорачивания на край кристалла. Важнейшим критерием качества соединений считается их механическая прочность, методы оценки которой стандартизованы в рамках ASTM (Американское общество по испытаниям материалов), а также в ОСТ 11.073.013–78. Качество сварки проверяли разрушающим способом на устройстве контроля прочности микросварных соединений типа 7800-8255 по средней прочности на разрыв проволочных перемычек и количеству отслоений после контроля прочности.

Оптимизация конструктивно-технологического исполнения ИСН

Результаты анализа полученных экспериментально параметров реза при разделении пластин (табл. 2) показали, что снижение частоты вращения шпинделя с 30 000 до 20 000 об/мин. приводит к уменьшению ширины реза на 3,6% для ДАР4-В2 и на 1,6% для ДАР4-В3, а увеличение скорости подачи с 10 до 80 мм/с способствует уменьшению ширины реза на 15% для ДАР4-В2 и на 9% для ДАР4-В3. Однако при этом увеличивается доля сколов размером 5–15 мкм. Для дисков с режущей кромкой 25–35 мкм зона сколов вдоль линии реза возрастает при скорости подачи более 30 мм/с, что связано с появлением очагов концентрации термомеханических напряжений в приповерхностном слое кремниевого кристалла.

Методом рентгеновской топографии оценена область распространения упругой деформации, вносимой в процессе сквозного разделения алмазными дисками (рис. 7). С увеличением скорости подачи пластины в процессе резки отмечается рост глубины проникновения напряженно-деформированного состояния в активную структуру. При использовании дисков с меньшим размером алмазного зерна дефектность структуры снижается.

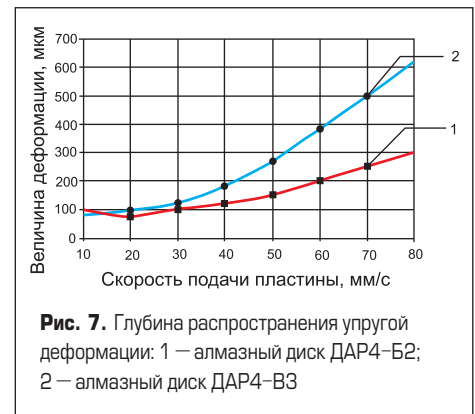


Рис. 7. Глубина распространения упругой деформации: 1 — алмазный диск ДАР4-В2; 2 — алмазный диск ДАР4-В3

При раскрытии кассеты после пайки в печи сложно обеспечить плоскопараллельность трафарета относительно поверхности кристалла по всей длине рамки. В результате этого трафарет, касаясь напряженных областей кристалла, приводит к образованию сколов кремния и микротрещин в приповерхностном слое активной структуры. Установлено разное значение сколов в кристаллах, располагающихся в областях около базового среза (1), в центре пластины (2) и напротив базового среза (3) (рис. 8).

Это объясняется тем, что в областях, расположенных выше базового среза, кристаллы

Таблица 2. Параметры реза при разделении пластины на кристаллы

Алмазный режущий диск	$V_n = 50$ мм/с					
	$V_p = 20000$ об/мин			$V_p = 30000$ об/мин		
	Ширина реза, мкм	Скол, мкм	Ширина дефектной зоны, мкм	Ширина реза, мкм	Скол, мкм	Ширина дефектной зоны, мкм
ДАР4-В2	50,5	8,5	62,9	52,6	8,0	65,6
ДАР4-В3	59,0	12,0	83,0	60,0	15,0	85,2

имеют больший уровень термомеханических напряжений, так как при выполнении высокотемпературных операций формирования активной структуры ИМС пластины размещаются в кварцевой лодочке базовым срезом вниз. В этом случае участки пластины напротив базового среза испытывают значительный градиент температуры при нагреве/охлаждении, что способствует неравномерной деформации по площади пластины.

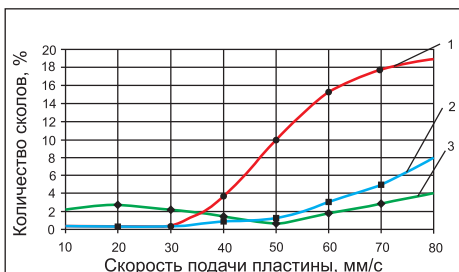


Рис. 8. Зависимости количества сколов после пайки кристаллов от режима резки пластин: 1 — область пластины у базового среза; 2 — область в центре пластины; 3 — область пластины напротив базового среза

При анализе микросхем, имеющих уровень выходного напряжения U_0 больше номинального, у 60% приборов не было выявлено дефектов внешнего вида при выполнении сборочных операций, а у 40% приборов обнаружен дефект в микросварном соединении при формировании проволочной перемычки в виде надрыва проволоки у сварной точки на кристаллодержателе при высоком угле подъема $\alpha = 73^\circ$ (рис. 9).

Для уменьшения угла α необходимо увеличивать расстояние от кристалла до сварной точки на кристаллодержателе, однако это

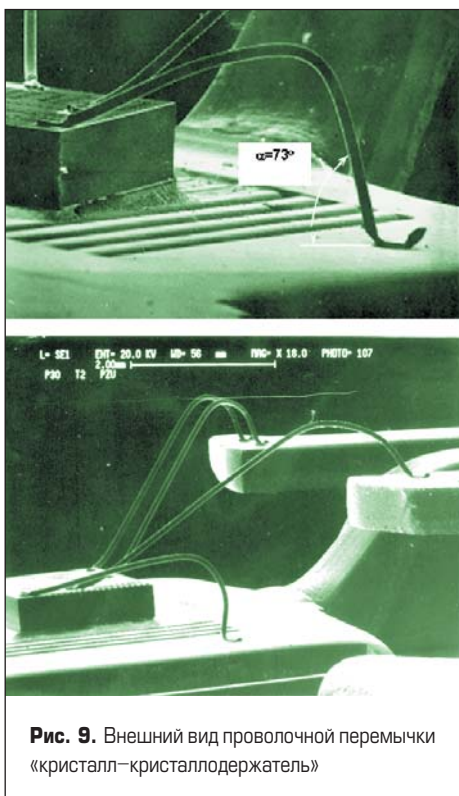


Рис. 9. Внешний вид проволочной перемычки «кристалл-кристаллодержатель»

приводит к увеличению размеров перемычки и отрицательно сказывается на механической прочности микросварных соединений. Предложен вариант уменьшения высоты петли за счет уменьшения высоты поверхности кристалла над поверхностью кристаллодержателя. Для этого на кристаллодержателе в зоне расположения кристалла было сформировано квадратное углубление 2,3×2,3 мм. Глубина углубления находилась в пределах 60–70% толщины кристалла. Это позволило сформировать проволочную перемычку под углом $\alpha = 45^\circ$ (рис. 10) и уменьшить дефектность микросварного соединения. Кроме того, стало возможно использовать для пайки кассету без трафарета, что крайне важно для исключения сколов.

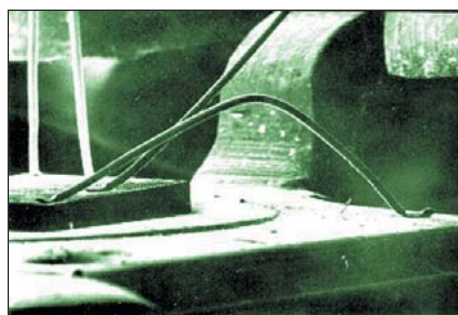


Рис. 10. Внешний вид собранной арматуры после доработки

При увеличении времени сварки при заданных усилиях нагружения и мощности УЗ-колебаний (W), механическая прочность микросварных соединений имеет нелинейную зависимость, причем максимум прочности отмечается при времени сварки 15 мс для опытного инструмента и 30 мс для традиционного (рис. 11).

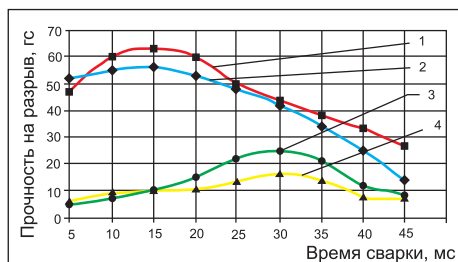


Рис. 11. Зависимости механической прочности проволочной перемычки от времени сварки. Опытный инструмент 1: $W = 1,51$ Вт. Опытный инструмент 2: $W = 1,13$ Вт. Традиционный инструмент 3: $W = 1,51$ Вт. Традиционный инструмент 4: $W = 1,13$ Вт

Использование опытного сварочного инструмента позволило увеличить выход годных изделий за счет значительного уменьшения брака по превышению выходного напряжения и обрывам. Дополнительный анализ брака выявил до 90% приборов с образованием глубокой трещины в сварном соединении (рис. 12), выполненном на третьем уровне сварки (на кристаллодержателе) традиционным инструментом.

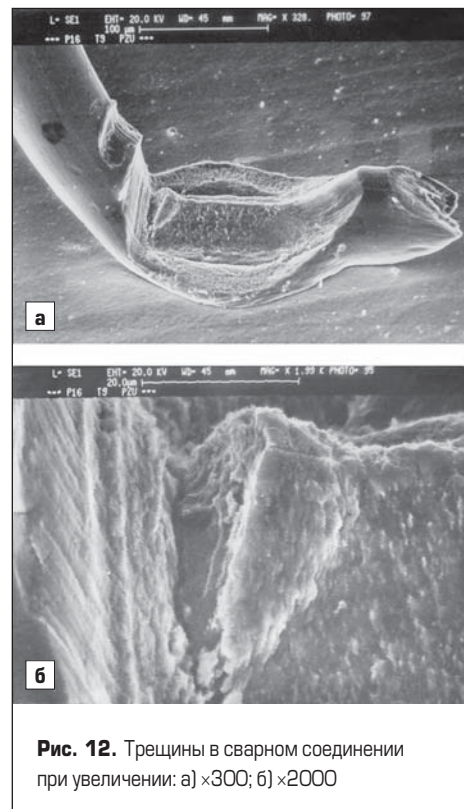


Рис. 12. Трещины в сварном соединении при увеличении: а) $\times 300$; б) $\times 2000$

Глубокие трещины в этом сварном соединении снижают сечение соединительного проводника, увеличивая его сопротивление проходящему току величиной 1,5 А.

Выводы

Таким образом, оптимизация отдельных конструктивно-технологических решений в производстве ИСН (параметров резки пластин, режимов УЗ-разварки проволочных выводов, геометрической формы микросварочного инструмента и др.) позволила повысить стабильность их выходных параметров и повысить выход годных изделий в среднем на 10–12%.

Литература

1. Горлов М. И., Ануфриев Л. П. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства. Минск: Бестпринт. 2003.
2. Полянин К. П. Интегральные стабилизаторы напряжения. М.: Энергия. 1979.
3. Штрапенин Г. Интегральные стабилизаторы с малым падением напряжения фирмы National Semiconductor // Компоненты и технологии. 2000. № 4.
4. Григорьев В. Стабилизаторы с малым падением напряжения — проблема выбора // Электронные компоненты. 2001. № 3.
5. Зимицкий Ю. Н. и др. Разделение пластин твердых и хрупких материалов алмазными кругами // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. 1983. Вып. 2(934).
6. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. А. Автоматическая сборка ИС. Минск: Выssh. школа. 1990.