

Надежность PressFIT-соединений

Технология прессовой посадки (press-fit) обеспечивает простое и надежное соединение, соответствующее современным требованиям по увеличению рабочей температуры, что позволяет использовать ее в новых силовых полупроводниковых модулях. Эта технология хорошо известна в промышленности, в течение многих лет она широко используется для получения надежного соединения в телекоммуникационных системах и в автомобильной индустрии. Компания Infineon модифицировала общую методику испытаний на надежность силовых модулей с PressFIT-контактами.

**Тило Штольц
(Thilo Stolze)**

**Маркус Тобен
(Markus Thoben)**

**Михазль Коч
(Michael Koch)**

**Роберт Северин
(Robert Severin)**

**Перевод:
Евгений Карташев**

Усиленное прижимное соединение

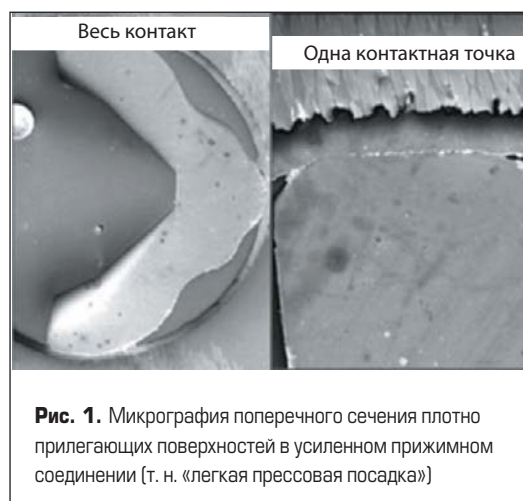
При соединении двух контактных поверхностей друг с другом образуется только несколько зон, имеющих реальную электрическую связь («металл-металл»), что справедливо и для полированных поверхностей. Минимальный радиус такой области контакта обычно составляет 10 мкм. При использовании технологии усиленного соединения, такой как press-fit, возникает необходимая пластическая деформация контактных точек внутри зоны соединения. Это обусловлено высоким давлением, образующимся вследствие того, что высокая прижимная сила концентрируется на микроскопической площади контакта.

В результате две сопрягаемые поверхности очень тесно прилегают друг к другу (рис. 1). Таким об-

разом, увеличивается эффективная зона контакта и, что самое главное, образуются газонепроницаемые зоны, очень устойчивые к воздействию агрессивных сред. Схематический чертеж показан на рис. 2, принцип работы соединения основан на хорошо известном эффекте холодной сварки, используемой для формирования постоянных электрических связей, требования по надежности для которых зачастую намного выше [2].

Общие положения

На любой контактной поверхности присутствуют следы коррозии, органические отходы (например, жиры), различные загрязнения и оксидные слои. Большинство проблем создается именно оксидными слоями, и для борьбы с ними используются покрытия из благородных металлов. Толщина коррозионных слоев на их поверхности составляет около 2 нм. На всех «базовых» металлах могут образовываться коррозионные слои толщиной от 5 до более чем 100 нм. Существует два механизма создания хорошего контакта и поддержания его характеристик: «спекание» и разрушение загрязнений в процессе формирования контакта. Эффект спекания состоит в создании электрического пробоя при напряжении выше 20 мВ (в зависимости от толщины слоя), при этом основная часть следов коррозии сгорает. Недостатком метода является то, что при напряжении ниже 20 мВ (для измеряемых сигналов) эффекта спекания не возникает, а сопротивление контакта возрастает. Разрушение загрязнений в процессе формирования контакта происходит при использовании прессовой посадки. При этом



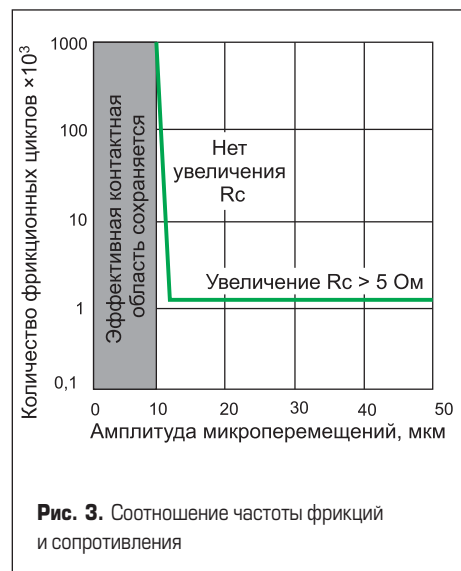
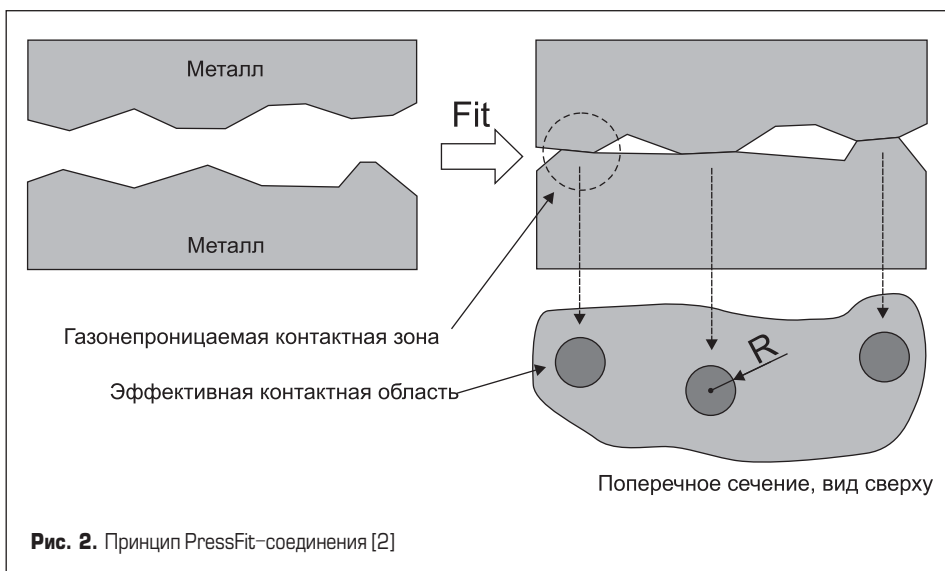


Рис. 3. Соотношение частоты фрикций и сопротивления

не требуется обработка поверхности благородными металлами.

Фреттинг-коррозия

В процессе эксплуатации любого устройства происходят механические перемещения составных частей, вызванные вибрациями или воздействием температурных циклов. Если контактная поверхность соединителя покрыта благородным металлом, проблем не возникает. Однако при наличии фрикций срок службы покрытия сокращается, так что данная проблема все равно присутствует, только отодвигается на более поздний срок. При использовании технологии press-fit, отличающейся высоким усилием прижима, амплитуда микроперемещений заметно уменьшается, как правило, она не превышает 10 мкм. Результатом является отсутствие за-

метных вариаций контактного сопротивления в течение срока службы, следовательно, надежность PressFIT-соединений не является ограничивающим фактором при определении ресурсных показателей системы.

Если амплитуда фрикций больше 10 мкм, то контактное сопротивление в большинстве случаев быстро увеличится до нескольких ом (рис. 3) [2]. Периодические смещения, превышающие 10 мкм и возникающие в случае, если внешнее воздействие мощнее, чем контактное усилие, приводят к деградации свойств соединения по описанному выше сценарию. Таким образом, контактная система PressFIT допускает только ограниченное число перемещений с высокой амплитудой.

Положительный эффект заключается в том, что высокое контактное усилие способно формировать новые, газонепроницаемые контактные зоны в пределах нескольких пере-

мещений. Это означает также, что PressFIT-соединение способно компенсировать некоторые смещения, возникающие при монтаже из-за наличия допусков.

PressFIT-соединение в модулях Econo и Easy PressFIT

Большое контактное усилие позволяет удалить коррозионные слои и гарантировать достаточно высокую силу «удержания», сформировать гибкое соединение, исключаящее повреждение переходных отверстий PCB с учетом производственных допусков, а также обеспечить высокую нагрузочную способность. На основе технологии press-fit были разработаны два новых модуля с гибкой геометрией прижимных выводов в конструктивах Econo и Easy, обеспечивающих токовую нагрузку 50 и 25 А на контакт (рис. 4 и 5) [1, 3]. При разработке выводов Econo и Easy PressFIT использованы описанные выше принципы усиленных прижимных соединений, контакты изготовлены из медного сплава с покрытием из чистого олова.

Стандартные тесты на надежность с адаптированными условиями испытаний

PressFIT-соединения

Соединения PressFIT квалифицируются по стандарту IEC 60352-5 (рис. 6) [4]. Все тесты проводятся с применением стандартных печатных плат (с минимальным и максимальным диаметром отверстий). Наиболее сложным видом испытаний в данном случае является климатика. Для проверки пригодности PressFIT-контактов для применения в силовых модулях температура в отдельных компонентах климатических тестов увеличена [4].

Также была увеличена температура при проведении тестов на тепловой шок (TST), термоциклирование и сухой нагрев (рис. 6). Она даже превышала максимальную рабочую температуру стандартных печатных плат (+105 °C). Все квалификационные процедуры

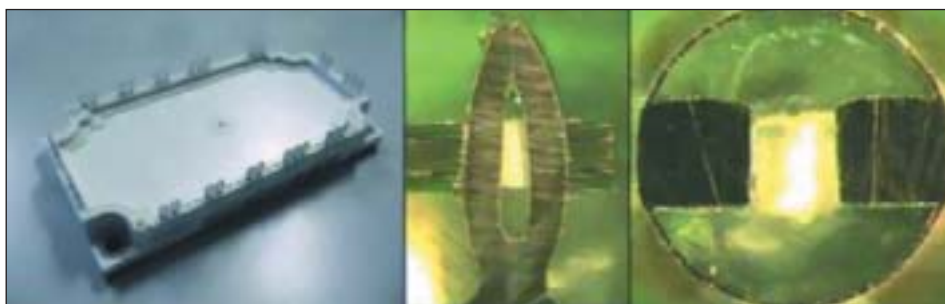


Рис. 4. EconoPIM PressFIT

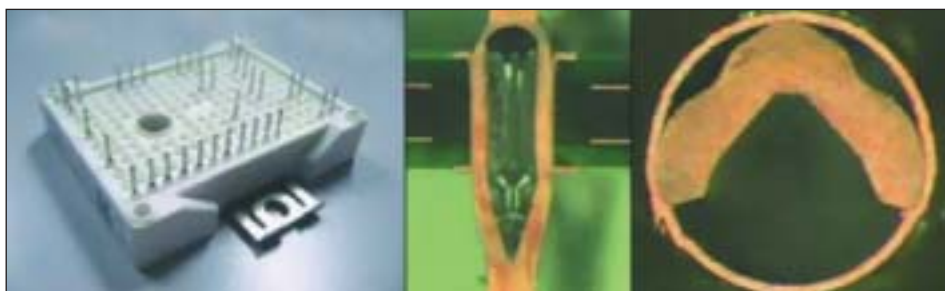


Рис. 5. EasyPIM PressFIT

Тест	Условия	Требования	Кол-во контактов
Микросекции контакта	Мин. диаметр отверстия	Нет повреждений	6 контактов с мин. диаметром
Усилие монтажа и демонтажа	Мин. диаметр отверстия Макс. диаметр отверстия	Мин. и макс. усилие демонтажа должно определяться производителем	7 контактов с мин. диаметром отверстия 7 контактов с макс. диаметром отверстия
Климатические испытания (контактное сопротивление после различных последовательностей тестов)			
TST	-40...+125 °С, 30 мин, 10 циклов	Нет заметного изменения сопротивления	100 контактов с мин. диаметром отверстия 100 контактов с макс. диаметром отверстия
Влажное циклирование	16 ч, сухой нагрев 120°С, 5 циклов: влажное тепло (12 ч, 25 °С; 85–93% при 56 °С; 85–93%) → 2 ч охлаждение -40 °С	изменения сопротивления	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; background-color: #d9ead3;">standard: 85 °С</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; color: blue;">Последовательный тест! 2×100 контактов должны пройти 4 испытания последовательно!</div>
Сухой нагрев	120 °С; 1000 ч	Нет заметного изменения сопротивления	
Воздействие смеси коррозионных газов	4-компонентная газовая смесь; 240 ч; SO ₂ : 0,2ppm H ₂ S: 0,01ppm NO ₂ : 0,2ppm CO ₂ : 0,01ppm	Нет заметного изменения сопротивления	

*Пример легкой прессовой посадки

Рис. 6. Квалификация контактов в соответствии со стандартом IEC 60532-5, доработанным для испытаний силовых модулей

были пройдены без каких-либо отказов и без заметной деградации контактных свойств. Как показано на рис. 7, переходное сопротивление выводов PressFIT уменьшилось после серии климатических испытаний (минимальный диаметр отверстия 1,04 мм). Этот хорошо известный и описанный выше эффект вызван процессом рекристаллизации и последующим улучшением качества соприкосновения контактных партнеров.

Силовые модули

Для тестирования силовых модулей используются хорошо проверенные методики, принятые в соответствии со стандартом IEC 60749 [6] (они приведены далее, на рис. 9). Кроме того, проводятся некоторые дополнительные тесты, исследующие влияние окружающей среды и соответствующие IEC 60068-2, часть 43 и 52 (рис. 9) [7, 8]. Все стандартные тесты на надежность модулей проводились без подключения к печатной плате, однако теперь разработаны усовершенствованные методики испытаний, предусматривающие использование PCB.

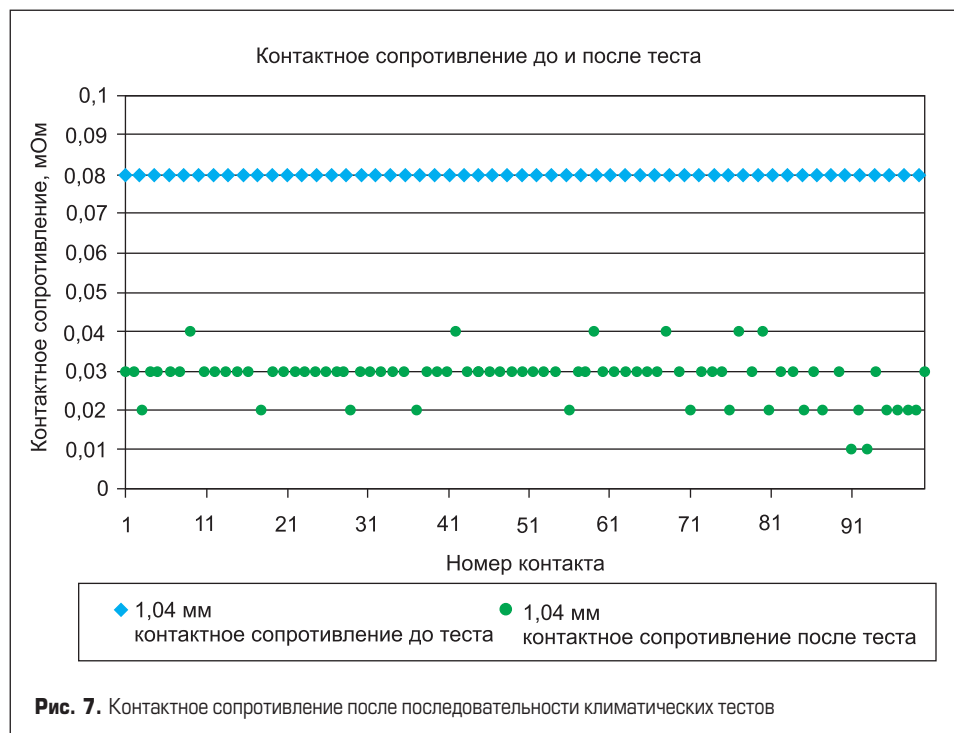


Рис. 7. Контактное сопротивление после последовательности климатических тестов

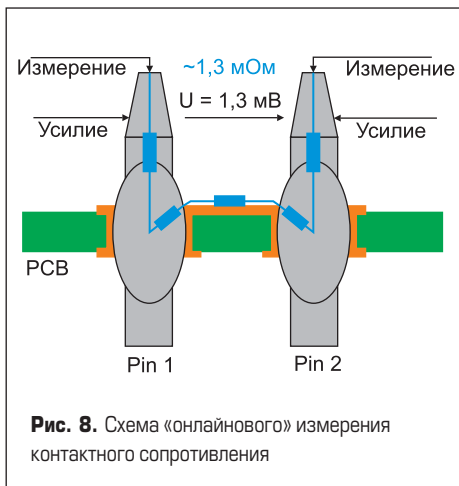


Рис. 8. Схема «онлайн» измерения контактного сопротивления

При проведении теста НЗТТВ (высокая влажность, высокая температура, обратное напряжение), тепловой шок (Thermal Shock Test, TST) и испытаниях на вибрацию проводится дополнительное «онлайн» измерение сопротивления. Напряжение устанавливается на уровне ~1,3 мВ (1,2–1,4 мВ, в зависимости от температуры и соответствующей электрической проводимости), ток 1 А. Как описано выше, такие низкие значения важны для устранения эффекта спекания, влияние которого может размывать малые изменения контактного сопротивления. Сопротивление 1,3 мОм относится ко всей испытательной установке, оно состоит из двух контактных сопротивлений и импеданса малого контура (рис. 8).

Для проведения испытаний на термоциклирование («минуты») температура выбиралась не только с учетом максимальной температуры кристалла, но и с учетом максимальной температуры РСВ (~+105 °С).

При проведении теста на воздействие агрессивных газов концентрация H₂S (10 ppm) была увеличена до 50 промилле, температура в камере до +40 °С (стандарт +25 °С), влажность — до 93% (вместо 80%). Указанные значения не обеспечиваются типовым ис-

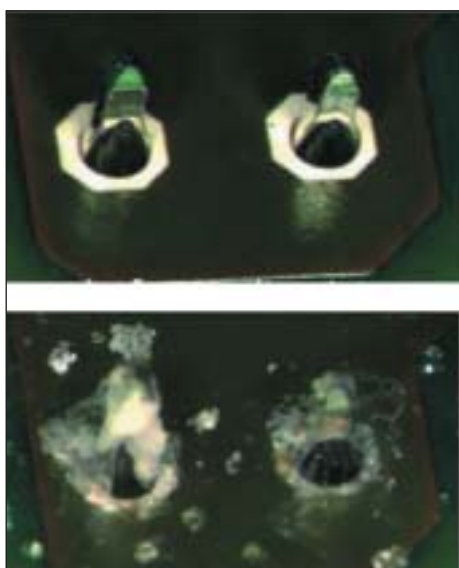


Рис. 10. Вид контактов до и после воздействия соляного тумана

Квалификация модулей по IEC 60749

Тест	Условия	Требования	Количество модулей
НЗТТВ	1000 ч; 85 °С; 85% RH; Vce = 80 В Вместе с РСВ с «он-лайн» измерением контактного сопротивления	Нет заметного изменения сопротивления 1000 ч	стандарт: без РСВ, без измерения R
TST	-40...+125 °С; 50 циклов Вместе с РСВ с «он-лайн» измерением контактного сопротивления	Нет заметного изменения сопротивления 50 циклов	
Вибрация	5 г, 5–200 Гц, x = 7,5 мм; 10 ч/ось Вместе с РСВ с «он-лайн» измерением контактного сопротивления	Нет заметного изменения сопротивления 10 ч	стандарт: без РСВ
Термоциклирование (секунды)	T _{jmax} = 150 °С; ΔT~100К; t _{on} = 1,5 с / t _{off} = 5 с Вместе с РСВ	EOL (до отказа)	адаптировано для предельной температуры РСВ 105°С
Термоциклирование (минуты)	T _{jmax} = 150 °С; ΔT~110К; t _{on} = 9 с / t _{off} = 30 с Вместе с РСВ при T_{max}~105°С	EOL (до отказа)	

Квалификация по IEC 60068

Коррозионные газы	50ppm H ₂ S; 40 °С; 93% RH, 17 дней Вместе с РСВ	Нет заметного изменения сопротивления 17 дней	стандарт: без РСВ; 10ppm; 25°С; 70–80% RH
Соляной туман	4 цикла: 2 ч (15...35 °С, 5% NaCl); хранение 20 ч (38...42 °С; 93% RH); после 4 циклов 3 дня сушки (21...25 °С; 45–55% RH) Вместе с РСВ	Нет заметного изменения сопротивления после теста	стандарт: без РСВ

* Онлайн мониторинг сопротивления при падении напряжения 1,3 мВ

Рис. 9. Квалификация модулей по IEC 60749 и 60068

пытательным оборудованием. Зеленые поля на рис. 6 и 9 обозначают границы, определенные в оригинальных версиях стандартов [6–8]. Все испытуемые модули прошли испытания без каких-либо следов деградации контактов

(рис. 10). Процесс «онлайн» измерения сопротивления не выявил прерывания или заметного изменения контактных свойств.

На рис. 11 показаны результаты «онлайн» измерения сопротивления терминалов

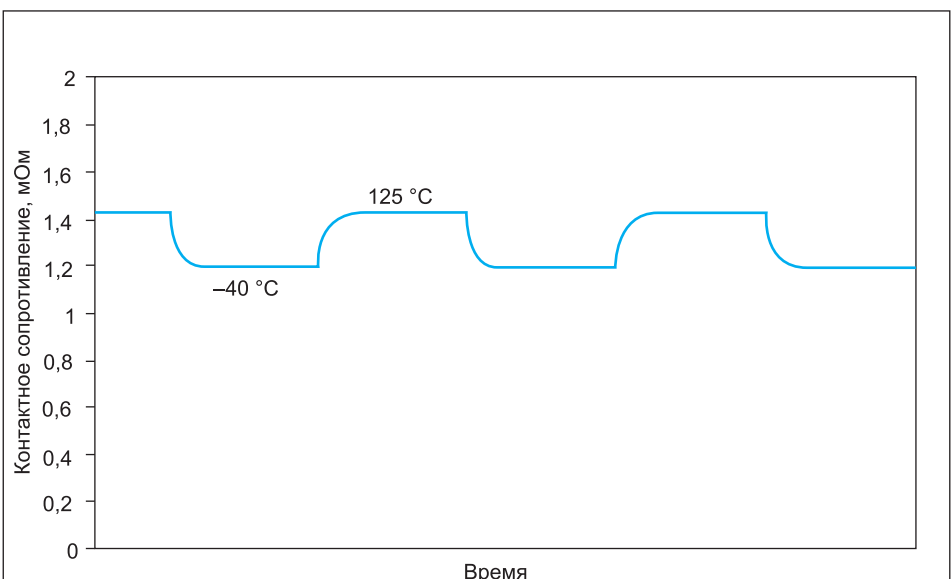


Рис. 11. «Онлайн» измерение контактного сопротивления (мОм) в ходе TST

в ходе TST. Никаких отклонений не было выявлено за время проведения проверки при температуре $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вибрационные испытания проходили при тех же условиях, как и «стандартные» тесты (рис. 9), но с ускорением 20g. Для проведения стандартных или специальных тестов всегда трудно найти необходимое оборудование, поскольку конструкция и масса реальных устройств никогда не бывает одинаковой. Поэтому было решено проводить испытания с применением небольшой печатной платы без дополнительных установленных масс и без фиксации на модуле.

Такая же методика использовалась в ходе «стандартного» вибрационного теста. «Онлайновое» измерение сопротивления при этом невозможно, поскольку чувствительность оборудования к механическим воздействиям очень высока. Испытания показали, что даже сильная вибрация с ускорением 20g не повреждает и не ухудшает свойства PressFIT-соединения (рис. 12).

Надежность и повторное использование

Как правило, всегда предпочтительнее иметь конструкцию, которая обеспечивает простоту обслуживания и ремонта. Как показано в предыдущих публикациях, модули с PressFIT-контактами можно демонтировать, а печатная плата может быть использована с новым модулем еще два раза [1, 3].

Однако что можно сказать о надежности PressFIT-соединения при повторном использовании? Этот вопрос исследовался с помощью дополнительной серии TST. Измерения проводились после 50, 100 и 150 циклов для изучения сопоставимости результатов, полученных на идентичной, но доработанной установке (рис. 13).

Для проведения теста на повторное использование первый модуль был запрессован на печатную плату. После предварительного измерения сопротивления выполнялось 50 циклов TST ($-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) и повторное измерение сопротивления. Далее модуль был демонтирован и произведена установка нового компонента. После этого опять выполнялось предварительное измерение, TST и последующее измерение сопротивления. Данная процедура повторилась еще раз, таким образом, каждый из трех модулей был подвергнут воздействию 50 циклов TST с одной и той же печатной платой. На PCB установлено несколько коннекторов для измерения сопротивления контактов, они имеют разную длину соединения. Это приводит к большому разбросу одиночных значений сопротивления, поскольку доминирующим здесь является импеданс между контактом и точкой измерения (рис. 14).

Заключение

Результаты проведенных тестов подтверждают отсутствие измеримой деградации контактных характеристик. Контактное сопротивление оставалось очень стабиль-

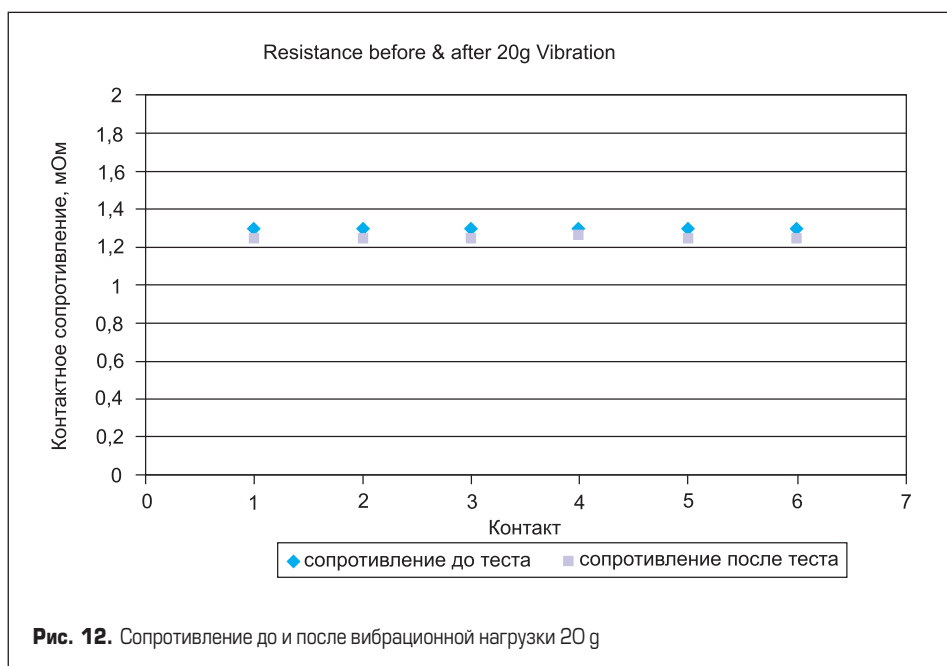


Рис. 12. Сопротивление до и после вибрационной нагрузки 20 g

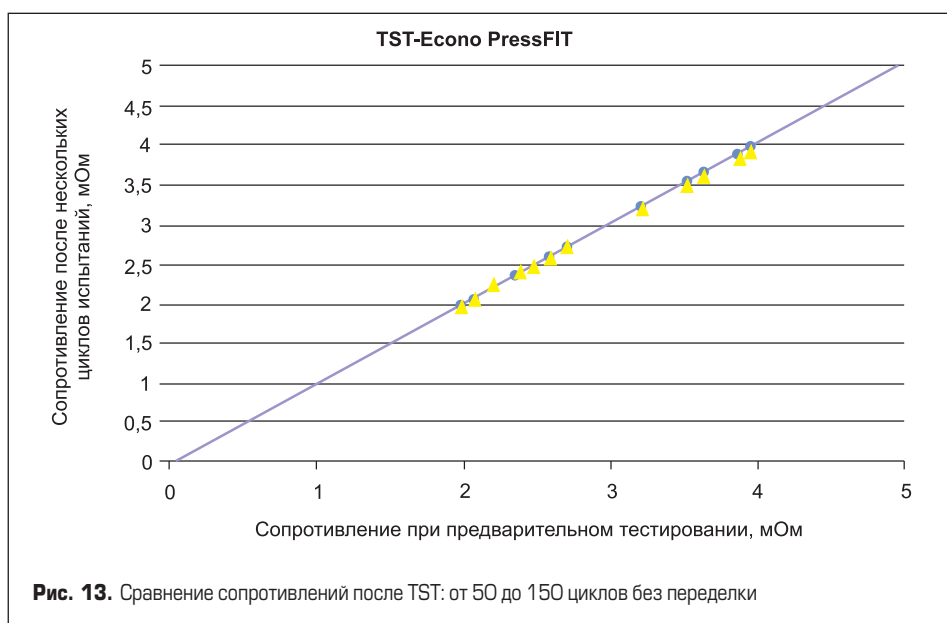


Рис. 13. Сравнение сопротивлений после TST: от 50 до 150 циклов без переделки

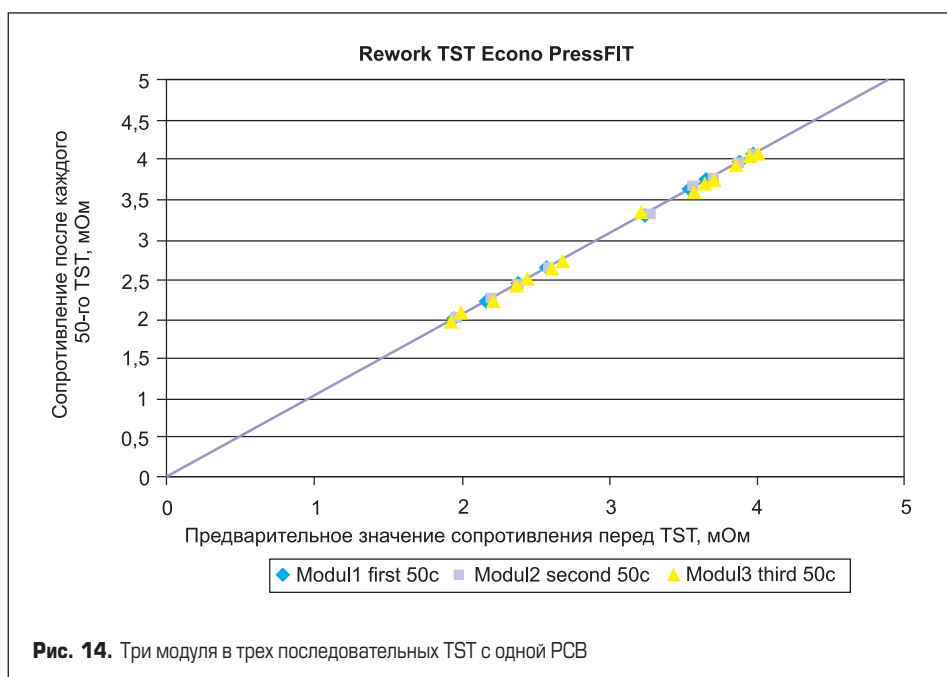


Рис. 14. Три модуля в трех последовательных TST с одной PCB

ным во время и после проведения испытаний. Это означает, что силовой ключ не только способен коммутировать большой ток в течение срока службы, но и расширенные интегрированные функции, работающие при низком напряжении и токе (например, измерение тока), будут абсолютно стабильно обеспечиваться до окончания ресурса системы. Благодаря этому технология press-fit хорошо подходит для применения в силовых полупроводниковых модулях, особенно с учетом растущих требований по надежности. ■

Литература

1. M. Thoben, I. Graf, R. Tschirbs. Press-Fit Technology, a Solder less Method for Mounting Power Modules. PCIM. 2005.
2. A. E. Schon. Kontakttechnologie und Qualitätssicherung bei Kontaktbauteilen. Seminarunterlagen. Starnberg. 2005.
3. M. Thoben, M. Busckuhle, T. Stolze. Utilizing Press-Fit for solder less assembly of pin grid connected Power modules. PCIM. 2007.
4. European Standard EN 60352-5:2001 Solder less connections — Part 5: Press-in connections — General requirements, test methods and practical guidance. January, 2002.
5. R. Holm. Electric contacts — Theory and application. Springer Verlag. Berlin. 2000.
6. IEC Standard 60749 Semiconductor devices — Mechanical and climatic test methods. August, 2002.
7. IEC Standard 60068-2 Environmental testing — Part 52: Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium, chloride solution). February, 1996.
8. IEC Standard 60068-2 Environmental testing — Part 43: Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections. May, 2003.