

# Новое поколение IGBT-модулей

## с увеличенным сроком службы

На протяжении последних десятилетий характеристики модулей IGBT определялись свойствами самих IGBT и обратных диодов. Роль здесь играют не только электрические параметры, но и применяемые технологии сборки, от которых в первую очередь зависит срок службы силовых модулей. В настоящей статье описывается новый пакет технологий соединения .ХТ, который позволяет преодолеть существующие ограничения на срок службы.

Ивонне Бенцлер  
(Ivonne Benzler)

Александр Сильо  
(Alexander Ciliox)

Карстен Гут  
(Karsten Guth)

Петр Луневски  
(Piotr Luniewski)

Дирк Зипе  
(Dirk Siepe)

### Введение

сопротивления на величину до 70% по сравнению с модулями без базовой пластины.

### Текущая ситуация в силовой электронике

В настоящее время в качестве стандартного материала для лицевой стороны кристалла и термокомпрессионных проволочных соединений используется алюминий. Типовой механизм отказа, ограничивающий срок службы модуля, — это отрыв соединительной проволоки. Он происходит за счет распространения трещин внутри самого алюминиевого проволочного соединения. Срок службы ограничен не процессом термокомпрессионного соединения, а материальными свойствами алюминия.

Частая причина потери соединения между кристаллом и DCB-подложкой — ухудшение качества паяного соединения, вызванное несогласованностью коэффициентов расширения. Оно ведет к росту теплового сопротивления ( $Z_{th}$ ), а это, в свою очередь, ускоряет отрыв соединительной проволоки.

Ухудшение качества паяного соединения является также причиной потери соединения между DCB-подложкой и базовой пластиной. Отказ от базовой пластины не всегда является оптимальным решением. Базовую пластину можно рассматривать как тепловую емкость, а также как теплораспределяющий слой, увеличивающий площадь контакта с радиатором. Она может обеспечивать снижение теплового

### Срок службы

Срок службы модулей IGBT определяется технологиями соединения, поэтому идеальная технология должна не только существенно продлевать время безотказной эксплуатации, но и отвечать требованиям массового производства изделий электроники в части способов монтажа и соединения.

### Срок службы и плотность мощности модуля

Продлить срок службы модуля можно за счет повышения его устойчивости к силовым циклам. На диаграмме силовых циклов (рис. 1) это соответствует смещению в вертикальном направлении от наблюдаемой сегодня кривой. Число полезных циклов увеличивается с коэффициентом «альфа» при заданной амплитуде колебаний температуры. Это ценная характеристика для конструкций, от которых требуется долговечность.

В системах с воздушным охлаждением представляет интерес повышение плотности мощности за счет повышения максимальной рабочей температуры  $p-n$ -перехода. Это естественным образом повышает амплитуду колебаний температуры внутри модуля, что соответствует смещению по горизонтали от наблюдаемой сегодня кривой силовых циклов. Снижение числа полезных циклов должно компенсироваться новыми технологиями.

Таблица. Сравнение свойств меди и алюминия

| Параметр                                      | Медь    | Алюминий |
|---|---------|----------|
| Удельное электрическое сопротивление, мкОм·см | 1,7     | 2,7      |
| Теплопроводность, Вт/м·К                      | 400     | 220      |
| Коэффициент теплового расширения, ppm         | 16,5    | 25       |
| Предел текучести, МПа                         | 140     | 29       |
| Модуль упругости, ГПа                         | 110–140 | 50       |
| Температура плавления, °С                     | 1083    | 660      |

**Влияние технологий .XT на срок службы**

**Основные особенности технологий .XT**

Пакет .XT представляет собой решение для целой системы модулей. В него входит ряд технологий монтажа и соединения, не завязанных на конкретный тип модуля. Данные технологии могут быть применены в нескольких существующих ныне типах корпусов.

**Описание реализованных технологий**

Для соединения лицевой поверхности кристалла с проволочным проводником по-прежнему будет использоваться термокомпрессионный процесс. Сравнительный анализ свойств материалов, приведенный в таблице, показывает, что во многих отношениях медь превосходит алюминий.

Опыт компании Infineon в области изготовления полупроводниковых пластин и корпусирования модулей позволил реализовать медную металлизацию лицевой стороны кристалла и разработать соответствующий процесс медного термокомпрессионного соединения.

Была также разработана более надежная технология соединения кристалла с DCB-подложкой. Новый процесс монтажа кристалла обеспечивает более длительный срок службы.

Наконец, необходимо более надежное решение для модулей с базовой пластиной. Механизм отказа таких модулей — распространение трещин внутри паяного соединения. Подход заключается в том, чтобы применить дополнительные осадки в припое для стабилизации соединения.

**Устойчивость к силовым циклам**

Устойчивость технологий .XT к силовым циклам гораздо выше, чем у традиционной технологии IGBT 4-го поколения. Кроме того, целевая кривая силовых циклов .XT уже позволяет работать при температуре *p-n*-перехода до 175 °C, как показано на рис. 1.

**Оценка электрических характеристик**

Упор в технологиях .XT делается на существенное продление срока службы. Заказчик должен иметь возможность заменить существующий модуль новым, в котором используются технологии .XT.

Потери на переключение, плавность и устойчивость к короткому замыканию в случае применения .XT остаются такими же, как и в случае традиционных технологий.

**Оценка срока службы изделий, выполненных по технологиям .XT**

Далее сравним срок службы двух модулей. Оба модуля содержат в себе IGBT 4-го поколения компании Infineon Technologies. Один модуль собран с применением традиционных технологий монтажа и соединения, а другой — с применением новых технологий .XT.

**Оценка срока службы**

Для заданного применения (городской автобус с операциями остановки и трогания) имеется соответствующий нагрузочный профиль, который описывает особые факторы, требующие учета при оценке срока службы модуля. Моделирование срока службы осуществлялось при помощи специального средства, разработанного компанией Infineon Technologies.

Во время работы инвертора возникают потери. По тепловой сети модулей можно определить амплитуду колебаний температуры для IGBT и диодов, как показано на рис. 2.

На следующем шаге необходимо учесть расчетные амплитуды колебаний температуры с использованием кривых силовых циклов и анализа методом дождевого потока. Для обыкновенного модуля модельное число циклов сравнивается с кривой силовых циклов для IGBT 4-го поколения.

Нагрузочный профиль в данном примере выбран так, что необходимое число циклов при 37 K превышает число циклов, обеспечиваемых кривой силовых циклов для IGBT 4-го поколения, как показано на рис. 3. Новый модуль с использованием технологий .XT способен

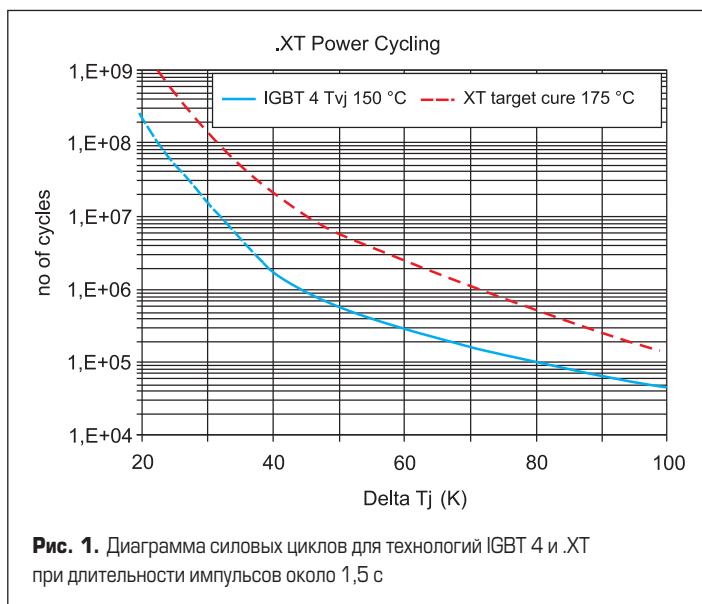


Рис. 1. Диаграмма силовых циклов для технологий IGBT 4 и .XT при длительности импульсов около 1,5 с

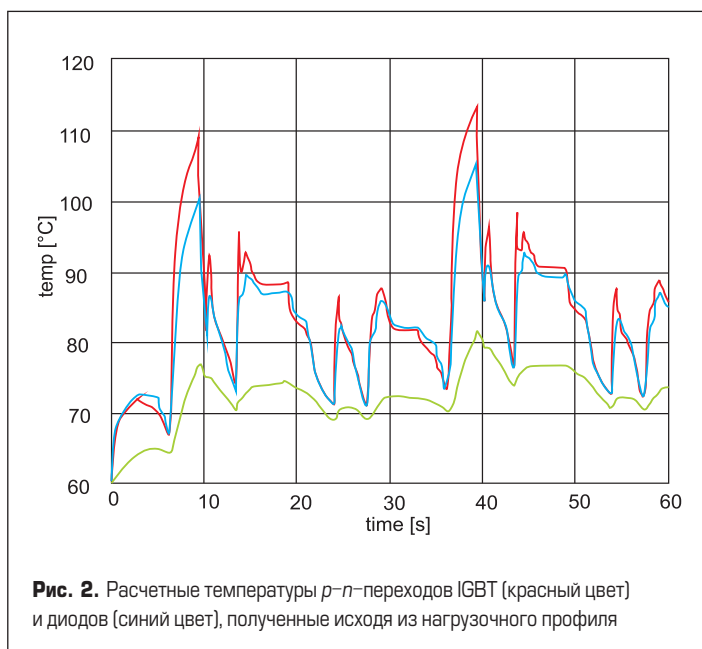


Рис. 2. Расчетные температуры *p-n*-переходов IGBT (красный цвет) и диодов (синий цвет), полученные исходя из нагрузочного профиля

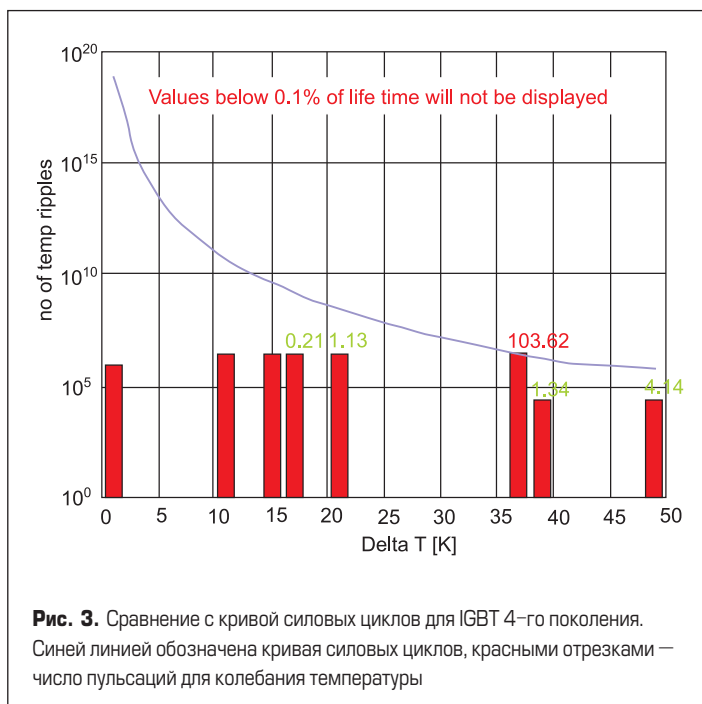
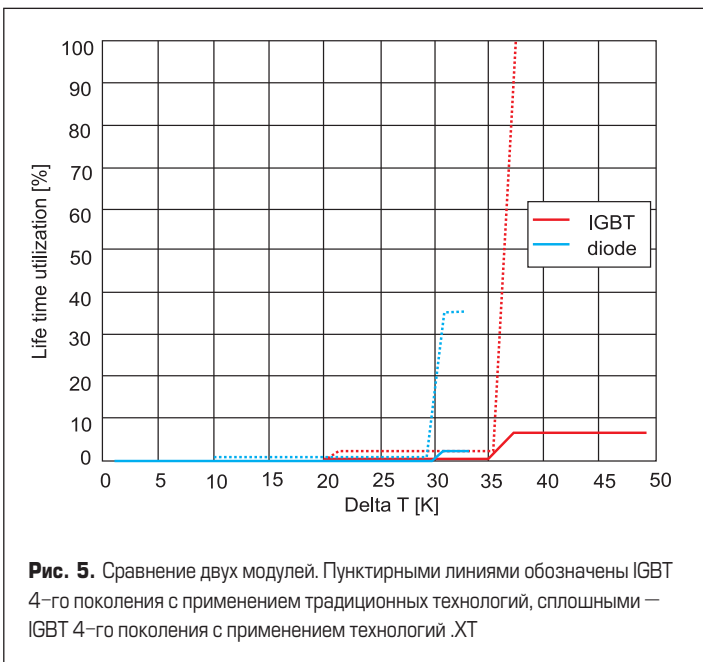
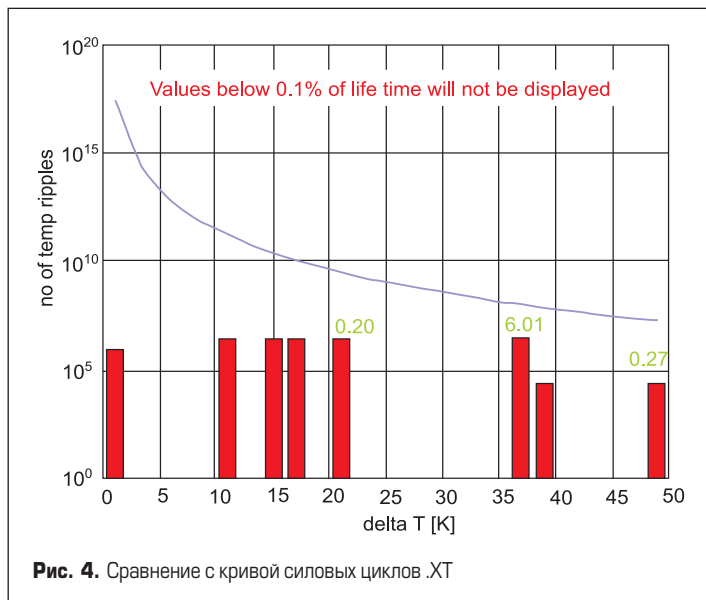


Рис. 3. Сравнение с кривой силовых циклов для IGBT 4-го поколения. Синей линией обозначена кривая силовых циклов, красными отрезками — число пульсаций для колебания температуры



выдержать прилагаемую нагрузку (рис. 4). Все пульсации остаются ниже кривой силовых циклов. Числа над отрезками обозначают израсходованную часть срока службы.

**Сравнение оценочных сроков службы**

Для определения итогового ресурса долговечности необходимо интегрировать вклады от отдельных составляющих. На рис. 5 приведены достигнутые показатели ресурса долговечности.

На момент окончания срока службы модуля с применением традиционных технологий у модуля, в котором используются новые технологии .XT, оказывается израсходовано около 10% ресурса долговечности. Повышенная устойчивость технологий .XT к силовым циклам непосредственно оборачивается 10-кратным продлением срока службы модуля.

Этот дополнительный ресурс можно также направить на повышение выходного тока инвертора, а следовательно, и плотности мощности.

**Выводы**

В статье описан первый продукт компании Infineon Technologies AG, в котором применяется новый пакет технологий монтажа и соединения .XT. Показано, что целевая кривая силовых циклов для этого

Рис. 5. Сравнение двух модулей. Пунктирными линиями обозначены IGBT 4-го поколения с применением традиционных технологий, сплошными — IGBT 4-го поколения с применением технологий .XT

пакета технологий существенно продлевает прогнозируемый срок службы относительно сегодняшних ограничений.

В рассмотренном примере модельный срок службы модуля оказался вдесятеро дольше по сравнению со стандартным модулем. Пакет технологий .XT разработан компанией Infineon Technologies AG как ответ на общую тенденцию на рынке силовой электроники к увеличению потребных срока службы и/или плотности мощности.

**Литература**

1. Power Modules – a demand from hybrid cars, a potential for the next step increase in power density for various Variable Speed Drives // PCIM. 2008. Nuremberg, Germany.
2. Siepe D. et al. The future of wire bonding is wire bonding // CIPS. 2010.
3. Guth K. et al. New assembly and interconnects beyond sintering methods // PCIM. 2010. Nuremberg, Germany.
4. Luniewski P. System and Power Module Requirements for Commercial, Construction & Agriculture Vehicles // CAV, ECPE. 2009. Munich, Germany.