

Новые высокоэффективные и высоконадежные модули IGBT

В статье описывается новая NF-серия IGBT-модулей производства фирмы Mitsubishi Electric. Серия NF выпускается в новых корпусах и по новым технологиям изготовления IGBT — CSTBT (Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor). В статье сравниваются новая структура IGBT-кристалла CSTBT серии NF со стандартной серией H фирмы Mitsubishi Electric.

**Юнжи Ямада,
Такайуки Симизу,
Мунейоси Кавагучи,
Митсухиро Накамура,
Масао Кикучи,
Экхард Тхал**

**Перевод:
Николай Сагайдаков**

cni@diaelectrolux.ru

В последние годы было разработано множество различных концепций построения корпусов силовых модулей. Однако одно из важнейших требований рынка — сохранение совместимости со стандартными типами корпусов. Есть несколько причин для возникновения этих требований. Во-первых, потребитель может использовать новый модуль без дополнительных доработок конструкции. Во-вторых, при замене модулей на существующих изделиях необходима механическая совместимость. В-третьих, большое число потребителей хотят использовать модули в стандартных корпусах, даже для новых разработок, потому что уже имеют данные о надежности конструкции в этих корпусах.

Улучшенные электрические характеристики

Третье поколение IGBT, например стандартные модули H серии, имеют планарную структуру затвора. Эта структура показана на рис. 2.

Эта обычная структура состоит из четырех основных резистивных составляющих: MOS-канала, JFET, n -слоя и PN-перехода. Падение напряжения на JFET и n -слое составляет более 50% общего напряжения насыщения коллектор-эмиттер ($V_{ce(sat)}$). Поэтому было решено уменьшить падение напряжения JFET и n -слоя. В результате была разработана новая технология кристалла IGBT, названная CSTBT. В серии NF используется новый кристалл, созданный по технологии CSTBT, что дает заметное снижение напря-

жения насыщения. Ключевые составляющие технологии CSTBT — это пазовый затвор (trench gate) и слой накопления носителей (carrier stored layer) (рис. 1).

Остановимся подробнее на основных отличиях CSTBT-технологии. Во-первых, ток, протекающий через достаточно узкую область JFET в планарной технологии, вызывает падение напряжения на ней. В технологии CSTBT область JFET полностью удалена за счет пазовой структуры затвора (by trench gate structure). Теперь ток может проходить непосредственно из области MOS-канала в область n -слоя. В результате в кристалле по технологии CSTBT отсутствует падение напряжения на JFET-области.

Во-вторых, ток через сопротивление n -слоя вызывает падение напряжения на n -слое. Для этого необходимо увеличить плотность носителей заряда в n -слое, таким образом уменьшая его сопротивление. Однако реальная плотность носителей в n -слое имеет локальное распределение: со стороны коллектора плотность носителей выше, а со стороны эмиттера — ниже. Основное падение напряжения в n -слое определяется локальной областью со стороны эмиттера. Следовательно, наиболее эффективным решением является увеличение плотности носителей в локальной области эмиттера в n -слое для снижения падения напряжения в данном слое. Новый слой накопления носителей заряда (carrier stored layer) расположен вблизи эмиттерной локальной области n -слоя, как показано на рис. 1. Слой накопления носителей действует как «водяная дамба» (water dam), перехватывая движущиеся заряды. Таким образом, плотность носителей заряда со стороны эмиттера в n -слое увеличивается, общее сопротивление n -слоя уменьшается и падение напряжения на n -слое снижается.

В результате в изделии, выполненном по CSTBT-технологии, напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($V_{ce(sat)}$) может снизиться на 70% по сравнению с изделиями H серии IGBT при той же плотности тока. Кроме того, увеличение количества носителей в n -слое позволяет транзистору быстрее включаться за счет слоя накопления заряда. Итак, технология CSTBT позволяет снизить не только статические потери, но и потери на переключение, как показано на рис. 3 и 4.

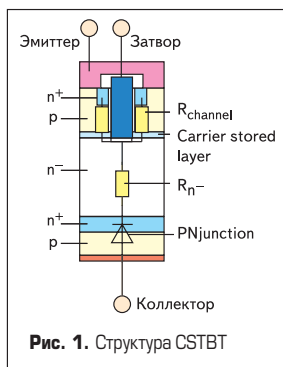


Рис. 1. Структура CSTBT

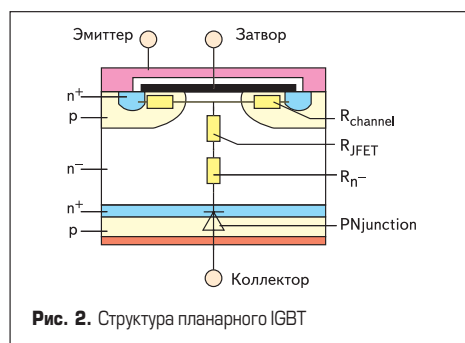


Рис. 2. Структура планарного IGBT

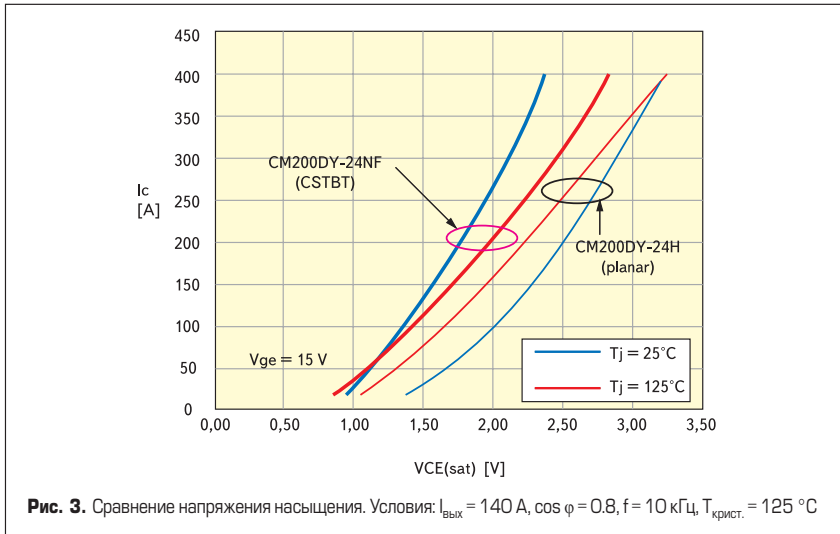
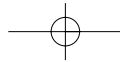


Рис. 3. Сравнение напряжения насыщения. Условия: $I_{\text{вых}} = 140 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,8$, $f = 10 \text{ кГц}$, $T_{\text{крст.}} = 125 \text{ °C}$

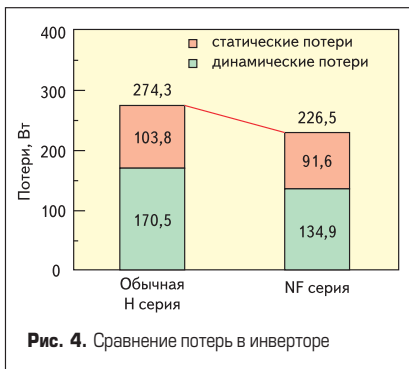


Рис. 4. Сравнение потерь в инверторе

Улучшенная структура корпуса

Корпус NF-серии полностью совместим по выводам с обычной серией Н. Однако внутренняя структура серии NF улучшена по сравнению с серией Н. Сравнение габаритных размеров серий NF и Н показаны на рис. 5. Сравнение внутренних структур представлены на рис. 6а и 6б.

Основные отличия:

- силовые выводы в серии NF соединяются непосредственно с кремниевым кристаллом с помощью алюминиевых проводников. Таким образом, в серии NF при сборке применяется только один процесс пайки, то есть можно выбрать наилучшее паяное соединение для большей надежности;
- силовые выводы серии NF жестко зафиксированы в прочном пластиковом корпусе. Таким образом, серия NF не имеет эпоксидного компаунда, содержащего вредные для окружающей среды частицы.

Повышение надежности

Электрические потери в силовых модулях присущи всем типам модулей. Надежность модуля, особенно в силовых применениях, определяется тепловыми нагрузками. Эти нагрузки вызваны различиями тепловых коэффициентов расширения материалов, применяемых в модулях IGBT. В модуле имеются три области, чувствительные к тепловым нагрузкам: первая область — площадка контакта алюминиевого проводника с кремниевым кристаллом. На рис. 7 это называется «точка контакта». Вторая область — паяное соединение между кремниевым кристаллом и керамической подложкой. На рис. 7 это обозначается как «Пайка-а». Третья область — это паяное соединение между керамической подложкой и медным основанием. На рис. 7 это обозначается как «Пайка-б». Есть сильная зависимость между этими

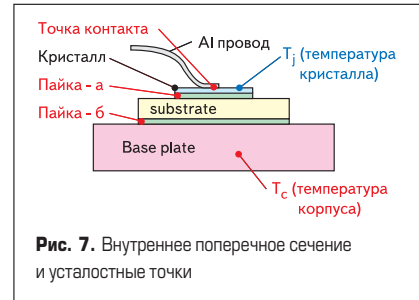


Рис. 7. Внутреннее поперечное сечение и усталостные точки

чувствительными к тепловым напряжениям областями и сроком эксплуатации реального модуля. Реальные изменения в процессе работы силового модуля, вызванные температурными нагрузками, определяются тремя циклами: а) энергетическим; б) термоусталостным; в) температурным.

Энергетические циклы (а) определяются периодическими изменениями температуры кристалла (T_j) в течение короткого времени. Изменения T_j могут быть вызваны изменениями электрической нагрузки, например, изменением нагрузки мотора между максимальным и минимальным значениями. Другая причина энергетических циклов — низкая рабочая частота инвертора. Типичным признаком энергетических циклов является то, что температура кристалла периодически изменяется, а температура основания остается фактически неизменной. Этот режим показан на рис. 8. Термоусталостный цикл вызван изменениями температуры корпуса (T_c). Период цикла зависит от тепловой постоянной времени системы охлаждения и изменениями электрической нагрузки, определяемыми работой всей системы в целом. Этот режим также изображен на рис. 8. Причина энергетических и термоусталостных циклов — электрическая мощность, рассеиваемая непосредственно

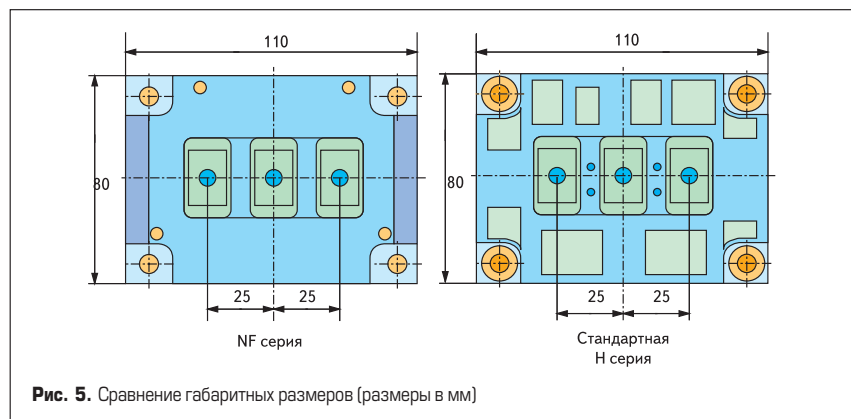


Рис. 5. Сравнение габаритных размеров (размеры в мм)

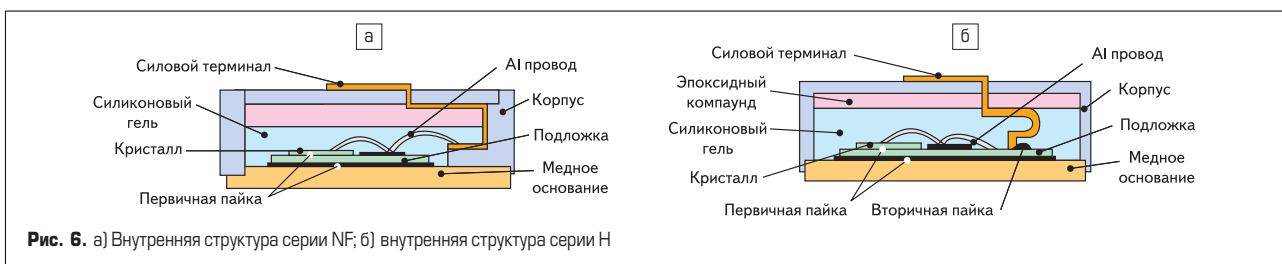
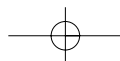


Рис. 6. а) Внутренняя структура серии NF; б) внутренняя структура серии Н



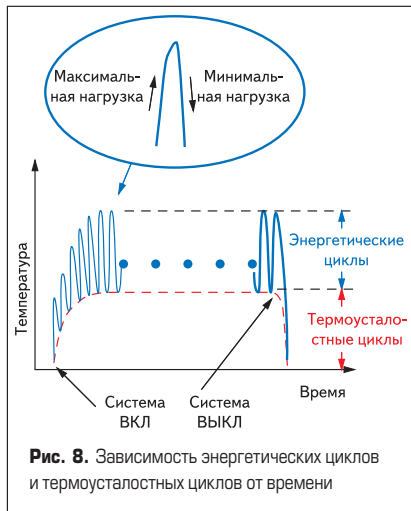


Рис. 8. Зависимость энергетических циклов и термоусталостных циклов от времени

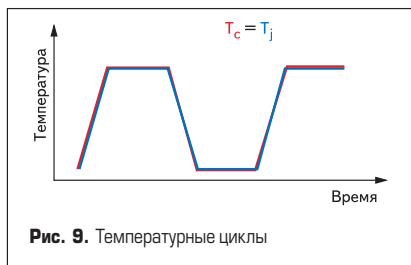


Рис. 9. Температурные циклы

ственно в IGBT-модуле. В противоположность предыдущим циклам, под температурными циклами (в) подразумевается изменение температуры, вызванное воздействием внешних факторов. Это может быть связано с изменением окружающей температуры. Ежедневное и сезонное изменение или нагрев и охлаждение от другой аппаратуры, расположенной вблизи модуля, приводят к изменениям окружающей температуры. Так как причины, вызывающие температурные циклы, находятся вне модуля, температуры T_c и T_j изменяются по закону, показанному на рис. 9. Серия NF более устойчива к воздействию температурных нагрузок по сравнению со стандартной серией H. Детальное описание методов улучшения приводится ниже.

Улучшение устойчивости к энергетическим циклам

Как указывалось выше, тепловые нагрузки вызваны различиями тепловых коэффициентов расширения материалов, когда циклически изменяется температура кристалла. В таблице приводятся температурные коэффициенты расширения материалов, применяемых фирмой Mitsubishi Electric для производства модулей IGBT.

В ходе экспериментальных проверок и исследований было определено, что критическая усталость от энергетических циклов определяется наличием трещины в точке соединения алюминиевого провода и кристалла. Следовательно, чтобы увеличить сопротивляемость энергетическим циклам, необходимо увеличить прочность слоя соединения провода и кристалла. Решением данной проблемы является поддержание одинаковой прочности соединения по всей поверхности контакта.

Таблица. Тепловой коэффициент расширения (С.Т.Е)

Материал	Алюминиевый провод	Кристалл	Припой	Подложка	Медь
С.Т.Е., К (ppm/K)	23,0	2,5	24,5	4,6	16,6

Однако такое техническое решение возможно лишь на специальной поверхности IGBT-кристалла, которая получена в новом поколении CSTBT-кристаллов. Применяя эту новую технологию в NF-серии, специалисты получили большую устойчивость к энергетическим циклам по сравнению со стандартной серией H.

Улучшение устойчивости к термоусталостным и температурным циклам

Типичные показатели воздействия термоусталостных циклов и температурных циклов — горизонтальные трещины в области «Пайка-б» (рис. 7). Таким образом, для увеличения продолжительности работы при воздействии термоусталостных и температурных циклов необходимо увеличить прочность области «Пайка-б» (рис. 7). С помощью увеличения толщины пайки достигается необходимый результат. Отношение толщины пайки к деформации в области «Пайка-б» в относительных величинах показано на рис. 10. (Деформации и тепловое сопротивление нормализованы относительно толщины пайки 200 мкм.)

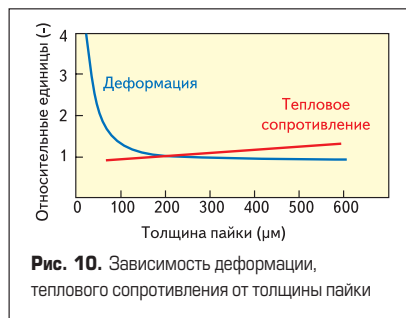


Рис. 10. Зависимость деформации, теплового сопротивления от толщины пайки

Как видно из графика (рис. 10), толщина пайки должна быть не менее 200 мкм для контроля деформации. В то же время с увеличением толщины пайки растет тепловое сопротивление. Наиболее оптимальное значение толщины пайки равно 200 мкм. Так как толщина пайки пропорциональна количеству припоя, то толщиной пайки можно управлять, изменяя количество припоя в процессе сборки. Однако реальная толщина слоя «Пайка-б» не всегда однородна по всему слою из-за возможного наклона подложки, как показано на рис. 11.

Контроль толщины пайки

Поддержание однородной толщины пайки в массовом производстве очень трудная задача. В серии NF эта проблема решена с помощью

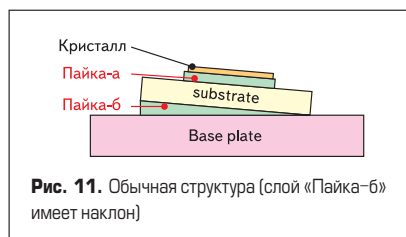


Рис. 11. Обычная структура (слой «Пайка-б» имеет наклон)

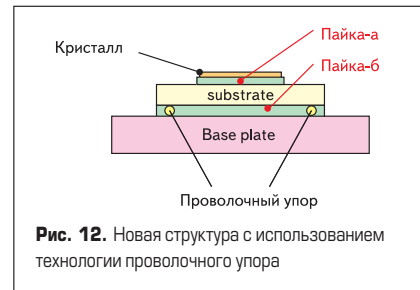


Рис. 12. Новая структура с использованием технологии проволоочного упора

новой технологии [3]. Новая технология проволоочного упора позволяет в слое «Пайка-б» равномерно распределять припой по всей поверхности контакта, как показано на рис. 12. Достоинство новой технологии — относительная простота применения в производстве. В результате серия NF имеет хорошую теплопроводность и отличную надежность при термоусталостных и температурных циклах.

На рис. 13 показана устойчивость к термоусталостным циклам. Продолжительность работы при одинаковых термоусталостных циклах у серии NF примерно в 10 раз выше, чем у стандартной серии H.

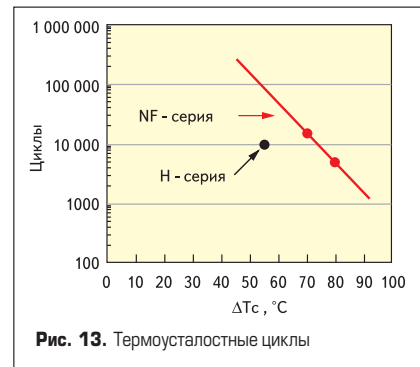


Рис. 13. Термоусталостные циклы

Заключение

В данной статье рассмотрено новое поколение IGBT-модулей серии NF. Новая серия NF обеспечивает отличные электрические характеристики благодаря новой технологии изготовления кристалла CSTBT и отличные характеристики надежности благодаря новой технологии корпусирования изделий.

Литература

1. Takahashi H., et al. Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor (CSTBT) — A Novel Power Device for High Voltage Application. The 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs.
2. Yamada J., et al. Next Generation High Power Dual IGBT Module with CSTBT Chip and Package.
3. Hayashi K., et al. Improvement of Fatigue Life of Solder Joints by Thickness Control of Solder with Wire Bump Technique.