

# Усовершенствованная технология сборки 600-А модулей EconoDUAL3

фирмы Infineon

**Мартин Кнехт**  
(Martin Knecht)  
**Роман Ширбс**  
(Roman Tschirbs)  
**Роланд Отт** (Roland Ott)

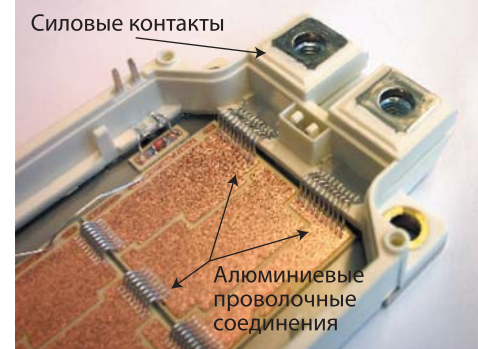
## Плотность мощности

Повышение плотности мощности при разработке силовых модулей актуально не только для новых, но и для уже существующих корпусов. Их модернизация связана с решением двух главных проблем — удовлетворение растущих требований к допустимой токовой нагрузке (в амперах) и к отводу тепла. Эти новые требования заставляют пересматривать существующие технологии сборки, чтобы преодолеть ограничения конкретных корпусов.

Постоянная оптимизация технологии производства кристаллов позволяет при разработке силовых IGBT-модулей повышать плотность мощности в одном и том же корпусе при смене поколений IGBT. К примеру, при переходе от одного поколения к другому номинальный ток 62-мм полумостовых модулей Infineon постепенно увеличивался от  $I_{ном} = 150$  А для первого поколения IGBT до  $I_{ном} = 450$  А для четвертого поколения [1], то есть в результате ток вырос в три раза. Это привело к повышению плотности мощности, что, безусловно, является преимуществом, особенно для схем все более и более компактных инверторов, и поэтому крайне востребовано рынком силовых IGBT-модулей. В частности, большим спросом у разработчиков пользуются силовые IGBT-модули с повышенной плотностью мощности в традиционных, хорошо зарекомендовавших себя корпусах. Подобные модули легко интегрировать в новые инверторы и, кроме того, с их помощью можно модернизировать имеющиеся схемы для увеличения выходной мощности, не меняя механическую конструкцию. Однако применение модулей с повышенной плотностью мощности в таких корпусах ограничено рядом факторов, например условиями охлаждения инвертора и максимально допустимой температурой системы. Что касается IGBT-модулей, здесь также следует принять соответствующие меры, чтобы максимально эффективно использовать в реальном устройстве номинальный ток, обеспечиваемый полупроводниковыми кристаллами. С этой точки зрения, двумя самыми важными параметрами конкретного корпуса силового IGBT-модуля являются допустимая токовая нагрузка / удельная проводимость и теплое сопротивление.

## Допустимая токовая нагрузка / удельная проводимость

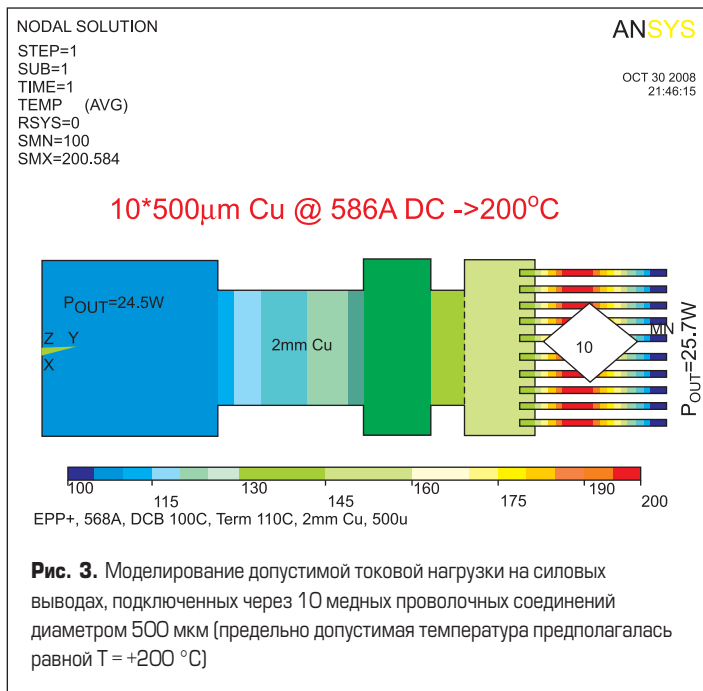
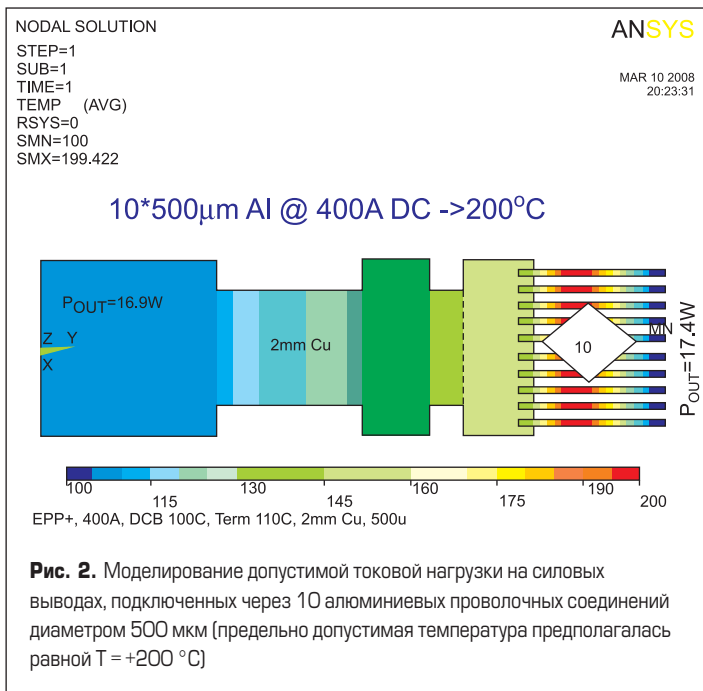
В широко распространенных модулях, таких как EconoPACK+ или EconoDUAL3, в настоящее время для соединения силовых контактов с токопроводящими дорожками и полупроводниковыми кристаллами используются алюминиевые проводники. На рис. 1 в качестве примера показаны алюминиевые проволочные соединения в корпусе EconoDUAL3.



**Рис. 1.** Алюминиевые проволочные соединения в корпусе EconoDUAL3

Однако с учетом тенденции повышения номинального тока эта широко используемая технология межкомпонентных соединений может, при определенных условиях, достичь предела своих возможностей. Для новых корпусов силовых модулей найдено разумное и надежное решение: метод ультразвуковой сварки, который позволяет преодолеть возможные ограничения допустимой токовой нагрузки [2]; однако в тех случаях, когда используются традиционные корпуса модулей, возникает необходимость в других адаптируемых решениях.

Недавно для соединения контактов была предложена новая альтернативная технология с применением медных проводников [3], которые имеют значительные преимущества перед алюминиевыми. Эта технология заслуживает специального исследования в связи с потенциальной возможностью ее приме-



нения для межкомпонентных соединений DBC–DBC, а также соединений «DBC–силовые контакты».

Из сравнения основных физических свойств меди и алюминия (таблица) следует, что у меди тепловое сопротивление ниже, теплопроводность и температура плавления — выше, что обеспечивает более высокие допустимые токовые нагрузки медных соединений при аналогичных граничных условиях.

Численное моделирование (рис. 2, 3) свидетельствует о преимуществах медных проволочных соединений по сравнению с алюминиевыми с точки зрения электрических и тепловых характеристик.

При тех же граничных условиях предельно допустимая нагрузка по току для выбранной структуры с 10 проволочными соединениями диаметром 500 мкм каждое выросла примерно в 1,5 раза: ток коллектора увеличился с 400 почти до 600 А. Таким образом, медные проволочные соединения идеально подходят для замены алюминиевых проволочных соединений в имеющихся корпусах IGBT-модулей, когда требуется увеличить токовую нагрузку.

**Тепловое сопротивление**

С повышением плотности мощности увеличивается рассеиваемая мощность внутри данного корпуса, что может представлять проблему не только для системы охлаждения инвертора, но и для всех тепловых интерфейсов внутри модуля.

В общем случае тепловое сопротивление  $R_{th}$  материала определяется толщиной слоя ( $s$ ), площадью поверхности теплообмена ( $A$ ) и теплопроводностью  $\lambda$ :

$$R_{th} = s/\lambda A.$$

Из этой формулы следует, что снизить тепловое сопротивление слоя внутри силового

модуля можно, если уменьшить толщину  $s$ , повысить теплопроводность  $\lambda$  или увеличить площадь поверхности теплообмена  $A$  за счет улучшения отвода тепла соседними слоями.

На рис. 4 схематически показаны тепловой поток и рассеяние тепла в современном силовом модуле IGBT с подложкой. В данной системе, прежде всего, нужно оптимизировать медные и керамические слои DBC; этого можно добиться, если, например, увеличить толщину проводящего слоя DBC для повышения проводимости и рассеяния тепла, повысить

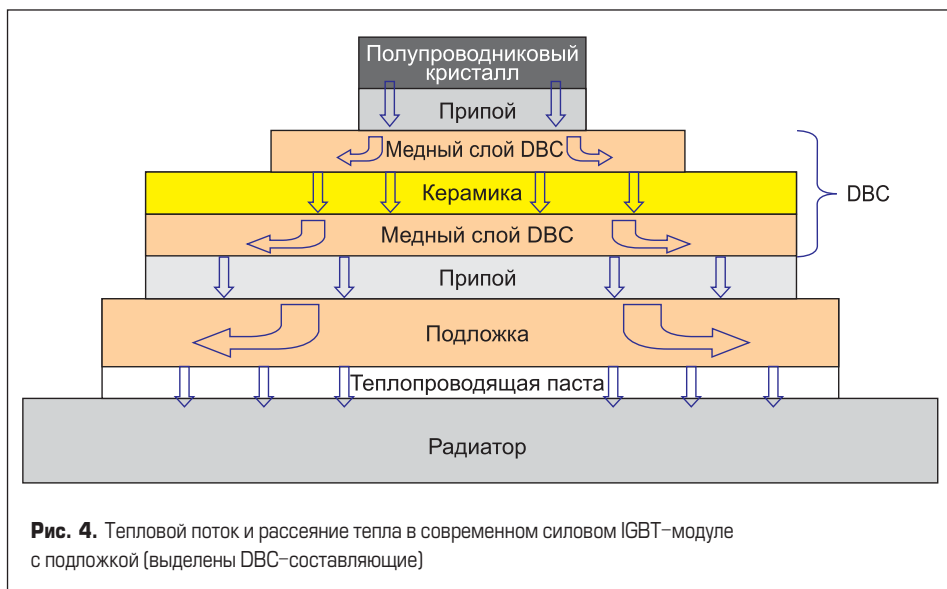
теплопроводность или уменьшить толщину слоя керамики DBC.

**Переход к реальной продукции EconoDUAL3**

С учетом изложенных выше идей была начата разработка нового модуля EconoDUAL3. Цель состояла не только в том, чтобы достичь номинального тока 600 А в классе напряжений 1200 В за счет применения новейших кристаллов IGBT четвертого поколения, но и в том,

**Таблица.** Основные физические свойства 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





**Рис. 5.** Новый 600-А/1200-В EconoDUAL3 с медными проволочными соединениями и оптимизированной подложкой DBC

чтобы реально повысить среднее квадратичное значение выходного тока инвертора по сравнению с имеющимся модулем FF450R12ME4 EconoDUAL3.

Для достижения этой цели в качестве соединений между токоведущими дорожками на подложках DBC и силовыми контактами были использованы медные проводники

(рис. 5). Более того, были оптимизированы тепловые характеристики DBC-подложки с использованием описанных выше мер, направленных на улучшение рассеяния тепла и снижение теплового сопротивления корпуса.

Чтобы оценить результат внедрения новых технологий, были проведены сравнительные расчеты характеристик модуля FF450R12ME4 EconoDUAL3 и нового модуля FF600R12ME4, в котором использовались все представленные технологии сборки.

Расчеты подтверждают эффективность предложенных мер: среднее квадратичное значение выходного тока выросло почти на 30% благодаря использованию новых кристаллов IGBT четвертого поколения с повышенным номинальным током.

### Выводы

В статье показано, что традиционные корпуса силовых IGBT-модулей можно усовершенствовать, значительно повысив плотность мощности за счет последовательного

внедрения новых технологий сборки. Этот вывод подтверждается на примере нового полумостового модуля в традиционном корпусе EconoDUAL3, который в сочетании с новейшим четвертым поколением IGBT компании Infineon обеспечивает значительное (до 30%) повышение выходной мощности. За счет адаптации традиционных корпусов к более высокому уровню мощности можно модернизировать схемы существующих инверторов, чтобы увеличить выходную мощность без изменения механической конструкции. ■

### Литература

1. Bässler M. et al. 1200V IGBT4 High Power — a new technology generation // Proc. PCIM. Nuernberg, 2006.
2. Tschirbs R., Borghoff G., Nübel T., Rusche W., Strotmann G. Ultrasonic metal welding as contact technology for state-of-the-art power modules // Proc. PCIM. Nuernberg, 2008.
3. Siepe D., Bayerer R., Roth R. The future of wire bonding is? Wire bonding! // Proc. CIPS. Nuernberg, 2010.