

# Увеличение плотности мощности в сварочных аппаратах

**Фабио Бруччи**  
(Fabio Bruschi)

fabio.bruschi@infineon.com

**Форрест Зенг**  
(Forrest Zheng)

forrest.zheng@infineon.com

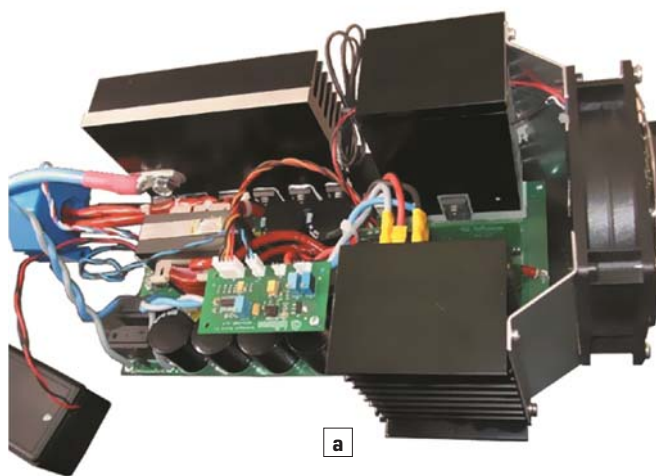
Спрос на недорогие малогабаритные сварочные аппараты растет, особенно в развивающихся странах. В аппаратах ручной дуговой сварки плавящимся электродом (Manual Metal Arc — MMA) и дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертного газа (Tungsten Inert Gas — TIG) мощностью 1,5–6 кВт широко применяются дискретные IGBT и MOSFET. В большинстве случаев в таких аппаратах используется ШИМ (широтно-импульсная модуляция) с управлением по току. А строят их на базе простых топологий — двухтранзисторной прямоходовой (Two

Transistor Forward — TTF), полумостовой (Half Bridge — HB) и мостовой (Full Bridge — FB) — обычно с включением при нулевом токе (Zero Current Switching — ZCS) и жестким выключением (hard-switching turn-off). Для таких конфигураций одним из наиболее важных параметров при разработке является высокая рабочая частота, что позволяет улучшить технические характеристики и снизить стоимость на системном уровне. Благодаря значительному снижению потерь при выключении, IGBT компании Infineon, выполненные по технологии Trenchstop 5, можно отнести к наиболее многообещающим кандидатам на использование в сварочных аппаратах, так как они могут в полной мере удовлетворить предъявляемым жестким требованиям.

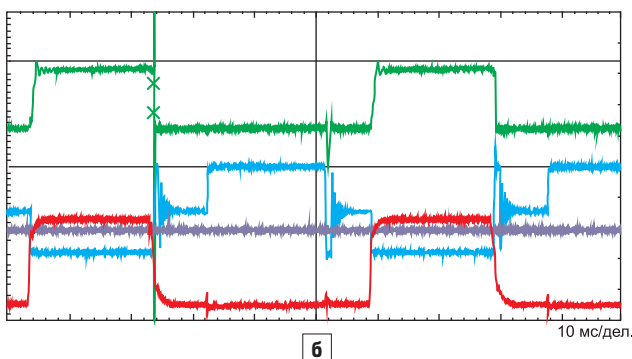
Транзисторы IGBT Trenchstop 5, работая при более высоких частотах, обладают к тому же лучшими характеристиками, чем IGBT предыдущих поколений. Если печатная плата выполнена должным образом, то их без всяких доработок можно устанавливать вместо традиционных высоковольтных MOSFET, рабочие частоты которых достигают 100 кГц. Увеличение частоты переключений ведет к снижению габаритов магнитных компонентов и уменьшению числа конденсаторов. Однако простая замена IGBT ранних семейств не всегда возможна из-за потенциальных проблем, связанных с более высокими  $di/dt$  и  $dv/dt$ , такими как высоковольтный выброс при выключении, осцилляции («звон») при включении или ухудшение показателей электромагнитной совместимости.

## Улучшения в полумостовой топологии

Значительное снижение потерь при выключении может привести к существенным механическим изменениям на первичной стороне преобразователя, а именно, к упрощению механической части. В свою очередь, это потребует дальнейшей модернизации платы и схемы управления затворами. Следовательно, габариты и вес сварочного аппарата могут быть значительно уменьшены. На рис. 1 показан разработанный для решения данной задачи демонстрационный прототип сварочного аппарата. Это однофазная полумостовая MMA/TIG сварочная установка мощностью 4,5 кВт. Здесь, благодаря адекватной разводке силового и сигнального контуров на печатной плате, возможна прямая замена двух



■ Ток коллектора IGBT (20 А/дел.) ■ Напряжение  $V_{CE}$  (100 В/дел.)  
■ Выходной ток (100 А/дел.) ■ Напряжение  $V_{GE}$  (10 В/дел.)



**Рис. 1.** а) Демонстрационный прототип полумостового сварочного аппарата мощностью 4,5 кВт; б) соответствующие осциллограммы с временной разверткой 10 мкс/дел.

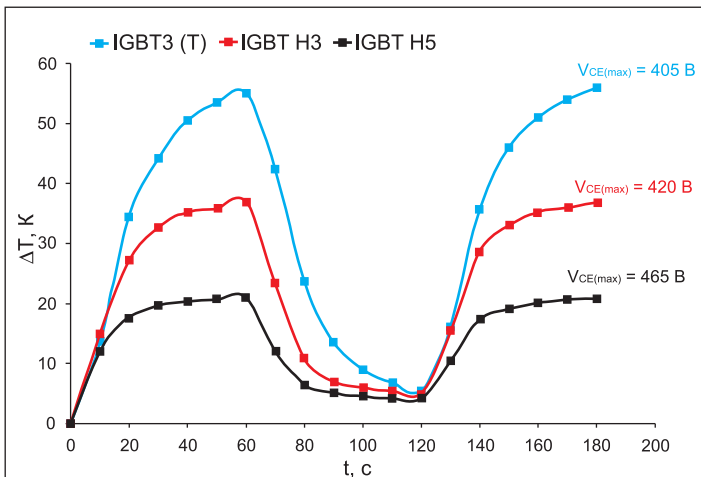


Рис. 2. Результаты тепловых испытаний различных семейств IGBT компании Infineon на прототипе 4,5-кВт сварочного аппарата

40-A/600-V IGBT, используемых в одном ключе, одним транзистором IGBT Trenchstop 5 типа IKW50N65H5.

Более того, из-за уменьшения потерь на проводимость и переключение сильно снижается температура транзисторов, так что допустимо даже использовать изоляционные пленки. На рис. 2 приведены профили температур на корпусах IGBT компании Infineon, изготавливаемых по разным технологиям. Хорошо видно, что значения температур заметно различаются. В частности, у транзисторов Trenchstop 5 температура на 40 К ниже, чем у транзисторов Trenchstop более ранних семейств.

Экспериментально определялось сопротивление в цепи затвора  $R_{G(off)}$ , при котором выброс напряжения при выключении не превышал 80% от напряжения пробоя, т. е. максимальное напряжение между коллектором и эмиттером  $V_{CE} = 520$  В. Чем ниже паразитная индуктивность платы, тем при меньших величинах  $R_{G(off)}$  можно удовлетворить указанным ограничениям. Также экспериментально изучались осцилляции напряжения между затвором и эмиттером. Приемлемыми в этих экспериментах считались колебания, соответствующие критерию:  $-25 \text{ В} < \Delta V_{GE(max)} < 25 \text{ В}$ , длительность не более 200 нс.

Можно использовать транзисторы Trenchstop 5 на неоптимизированных печатных платах, подстраивая пассивные компоненты в цепи затвора. В этом случае также можно ограничить выбросы  $V_{CE}$  и  $V_{GE}$  в допустимых пределах, установив в цепь затвора резистор большей величины и фиксирующую цепочку  $C_{GE}/R_{CE}$  для подавления «звона». Однако такое решение в значительной степени нивелирует те преимущества, которые дает использование IGBT Trenchstop 5. Это подчеркивает важность надлежащей разводки печатной платы.



Рис. 3. Второй демонстрационный прототип 4,5-кВт сварочного аппарата

Применение IGBT Trenchstop 5 в сборках для поверхностного монтажа с изолированной подложкой позволяет еще больше снизить паразитную индуктивность печатной платы. В результате получается более компактное решение с одним теплоотводом для обоих IGBT — как верхнего, так и нижнего плеча. Следовательно, требуется специальный изолятор для IGBT, подобный IMS- или  $Al_2O_3$ -керамике с дополнительной усиленной изоляцией. Внедрение этих технических изменений ведет к значительному снижению габаритов и веса всего аппарата. Пример приведен на рис. 3. Здесь показан второй демонстрационный прототип полумостового MMA/TIG сварочного аппарата, у которого, благодаря новой конструкции, габариты по сравнению с предыдущим прототипом уменьшены на 35%, а вес — на 15%.

Данная концепция позволяет добиться суммарной паразитной индуктивности величиной всего 40 нГн. Можно уменьшить паразитную индуктивность еще на 20 нГн, если взять другой вариант сборки и использовать мостовую топологию. Снижение паразитной индуктивности проводников печатной платы позволяет работать на частотах свыше 100 кГц, что предполагает возможность использования единого теплоотвода, увеличения плотности мощности и уменьшения габаритов трансформатора вместе с количеством необходимых конденсаторов в звене постоянного тока (DC-Link).

### Улучшения в мостовой топологии

На рис. 4 в качестве еще одного примера показан высокочастотный мостовой сварочный аппарат мощностью 3,5 кВт. Цель данного проекта — продемонстрировать, что замена в мостовой топологии традиционных MOSFET транзисторами IGBT Trenchstop 5 ведет к снижению стоимости, улучшению технологичности и повышению надежности сварочного аппарата.

Опять же, ключевым фактором, позволяющим создать новую конструкцию и улучшить архитектуру системы, являются низкие потери при выключении, присущие IGBT Trenchstop 5. Эта особен-

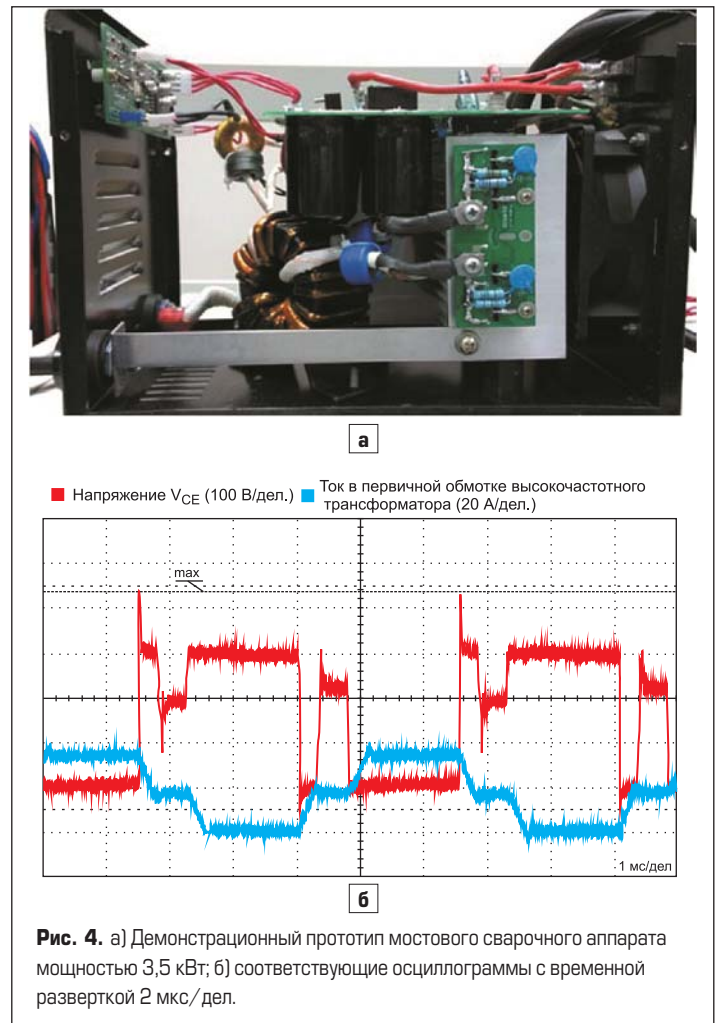


Рис. 4. а) Демонстрационный прототип мостового сварочного аппарата мощностью 3,5 кВт; б) соответствующие осциллограммы с временной разверткой 2 мс/дел.

Таблица. Результаты лабораторных испытаний прототипа в конфигурации полного моста

IGBT	Максимальный выходной ток, А	КПД при заданном выходном токе, % (А)	Выброс $V_{CE}$ при заданном выходном токе, В (А)	Цепь затвора
TRENCHSTOP 5	200	84,7 (100) 83 (160) 83 (200)	440 (200) 431 (160) 420 (120)	$R_{G(OFF)} = 6,2 \text{ Ом}$ $R_{G(ON)} = 20 \text{ Ом}$ $C_{GE} = 20 \text{ нФ}$
Конкурент 1	150	82,1 (150)	406 (160)	$R_{G(OFF)} = 6,2 \text{ Ом}$ $R_{G(ON)} = 20 \text{ Ом}$ $C_{GE} = 20 \text{ нФ}$
Конкурент 2	120	80,4 (120)	387 (120)	$R_{G(OFF)} = 33 \text{ Ом}$ $R_{G(ON)} = 20 \text{ Ом}$ $C_{GE} = 1 \text{ нФ}$

ность, наряду с более высокой нагрузочной способностью IGBT по току по сравнению с MOSFET, позволяет заменить три традиционных высоковольтных MOSFET-прибора одним IGBT. Благодаря меньшему числу требуемых транзисторов силовой и управляющий каскады можно легко интегрировать на одной небольшой печатной плате, а не делать отдельную силовую плату с размещенной над ней платой управления. По сравнению с этой распространенной конструкцией общая площадь платы, необходимая для новой конструкции, на треть меньше, чем в прежней версии. Более того, значительное снижение паразитной индуктивности в силовом контуре позволяет осуществлять выключение транзисторов Trenchstop 5 при более высоком значении  $di/dt$ , продолжая удерживать выброс напряжения на рекомендуемом в спецификации уровне.

Прототип был разработан с целью упрощения архитектуры и повышения плотности мощности. На конструкции прототипа можно показать, что процесс сборки становится проще, а значит, улучшается технологичность, что важно для массового производства, и снижается стоимость. По сравнению с коммерческим сварочным аппаратом уменьшение числа компонентов и оптимизация платы привели к снижению стоимости материалов примерно на 30%, уменьшению размеров на 30% и снижению веса на 35%.

Для оценки технических характеристик данной мостовой платформы сварочных аппаратов на высоких частотах были проведены ее испытания при частоте переключения 100 кГц. Целью испытаний были измерения максимально возможного выходного тока при сохранении одной и той же разности температур корпуса IGBT и окружающей

среды. В то же самое время проводился мониторинг коэффициента полезного действия (эффективности) и максимальных выбросов напряжений коллектор-эмиттер и затвор-эмиттер. Чтобы сравнение было корректным, схема управления не менялась до тех пор, пока система не становилась нестабильной или не срабатывала триггерная защита при возникновении аварийной ситуации. Результаты испытаний приведены в таблице.

На частоте 100 кГц транзисторы Trenchstop 5 демонстрируют характеристики, недостижимые для других сравнимых приборов. Транзисторы Trenchstop 5 обеспечивают выходной ток на 30% выше, чем наилучший из альтернативных приборов, и на 70% выше, чем второй из лучших конкурентов.

При максимальном выходном токе сварочного аппарата эффективность Trenchstop 5 на 1–3% выше, чем у любых других кандидатов. Это позволяет сварочному аппарату работать с более высоким коэффициентом полезного действия.

Слегка более высокий выброс напряжения между коллектором и эмиттером, что было обнаружено в полумостовой конфигурации, в большинстве случаев не вызывает проблем. Во-первых, абсолютное значение данного выброса ограничено значением 440 В при токе 200 А, и во-вторых, у IGBT Trenchstop 5 имеется дополнительный 50-В запас по напряжению пробоя в отличие от большинства других доступных приборов.