

# TRENCHSTOP 5 — новая технология быстродействующих IGBT

Марк ТОМАС (Mark THOMAS)

**IGBT-транзисторы, как известно, имеют протяженный «хвост» тока (tail current) и используются главным образом в низкочастотных приводах. IGBT для работы на частоте до 30 кГц назывались быстрыми, и в них ради снижения коммутационных потерь завышался уровень статических потерь. В 2008 году компания Infineon представила революционную технологию IGBT-транзисторов HighSpeed3, обладающих наивысшей эффективностью и работающих на частоте коммутации до 100 кГц с коммутационными характеристиками, близкими к MOSFET-ключам. Сегодня компания Infineon предлагает технологию TRENCHSTOP 5, которая обеспечивает частоту переключения, заметно превышающую 100 кГц.**

## Технология TRENCHSTOP 5

Эта технология представляет собой оптимизацию концепции TRENCHSTOP, объединяющей Trench-затвор и Field-Stop структуры. Чтобы свести к минимуму общие потери в ключе, толщина кристалла была уменьшена до 50 мкм, а профиль распределения носителей заряда оптимизирован для снижения их концентрации в области дрейфа при выключении. Эти меры позволили значительно сократить статические потери во включенном состоянии ( $V_{CE(sat)}$ ) и коммутационные потери при выключении ( $E_{off}$ ). Несмотря на то, что кристалл стал тоньше, рабочее напряжение удалось повысить до 650 В — на 50 В по сравнению с предыдущим поколением IGBT. Кроме того, благодаря новой «полосковой» (stripe) структуре транзисторных ячеек заряд затвора ( $Q_g$ ) стал меньше, а плотность тока возросла.

Перечисленные инновации привели к созданию IGBT с наивысшим уровнем эффективности и самыми низкими статическими потерями во включенном состоянии ( $V_{CE(sat)}$ ) и динамическими потерями в момент коммутации ( $E_{is}$ ).

TRENCHSTOP 5 — название базовой технологии, на основе которой созданы два семейства приборов, изначально предназначенных для удовлетворения требований различных приложений и пожеланий разработчиков. Эти приборы выпускаются в двух вариантах — HighSpeed5 (H5) и HighSpeed5 Fast (F5). Семейство H5 характеризуется оптимизированной конструкцией Field-Stop структур и призвано стать дополнением семейства HighSpeed3 IGBT; оно предоставляет возможность замены тран-

зисторов IGBT по принципу plug-and-play и не требует особых изменений конструкции платы. Эти транзисторы обеспечивают плавное нарастание напряжения при выключении в режиме жесткой коммутации даже при низких значениях сопротивления резистора в цепи затвора ( $R_g$ ) и очень высокой скорости изменения тока ( $di/dt$ ).

Семейство F5 отличается также улучшенными рабочими характеристиками. Его применение позволяет достичь более высокой эффективности, однако чтобы реализовать эти преимущества, требуется больше усилий при разработке. Каскад драйвера должен иметь отдельные резисторы в цепи затвора для включения ( $R_{g,on}$ ) и выключения ( $R_{g,off}$ ), повышения КПД и контроля выбросов напряжения при выключении. Это семейство лучше всего подходит для применения в преобразователях с печатными платами с минимизированной паразитной индуктивностью в цепи коммутации с учетом паразитной индуктивности корпуса транзистора, а также в сочетании с антипараллельными карбид-кремниевыми (SiC) диодами.

## Сравнение с технологией Infineon HighSpeed3

Семейства приборов на основе технологии TRENCHSTOP 5 по сравнению с HighSpeed3 (HS3) имеют существенно улучшенные статические и динамические характеристики:

- Увеличение блокирующего напряжения на 50 В позволяет увеличить напряжение на шине питания без ущерба для надежности. Кроме того, повышена стойкость приборов к космической радиации с учетом требований солнечной энергетики.

- Сокращение статических потерь в открытом состоянии ( $V_{CE(sat)}$ , на 250 мВ) и коммутационных потерь на включении/выключении ( $E_{on}$  и  $E_{off}$  вдвое) обеспечивает максимально эффективное высокоскоростное переключение среди всех существующих транзисторов IGBT.
- Значительное уменьшение емкостей  $C_{oss}$ ,  $C_{res}$  позволяет увеличить КПД преобразователя в режиме малых нагрузок.
- Снижение на 50% заряда затвора ( $Q_g$ ) позволяет использовать ИС драйверов с пониженным энергопотреблением без ухудшения рабочих характеристик, что, в свою очередь, позволяет уменьшить стоимость системы в целом.

Небольшой положительный температурный коэффициент статических и динамических потерь означает, что при повышенных температурах на кристалле КПД преобразователя существенно не меняется, а также не встает вопрос температурной несимметрии токов при параллельном подключении.

В семействе TRENCHSTOP 5 в качестве встречно-параллельного диода (Free-Wheeling Diode, FWD) используется новый ультрабыстрый диод, который обеспечивает время обратного восстановления ( $t_{rr}$ ), равное 50 нс, и температурную стабильность прямого напряжения ( $V_F$ ), что гарантирует минимальные потери при включении IGBT и оптимальный общий КПД.

## Динамические характеристики

Описывая новую технологию, важно объяснить, как можно управлять характеристиками переключения при помощи резистора в цепи затвора. На рис. 1а приведена зави-

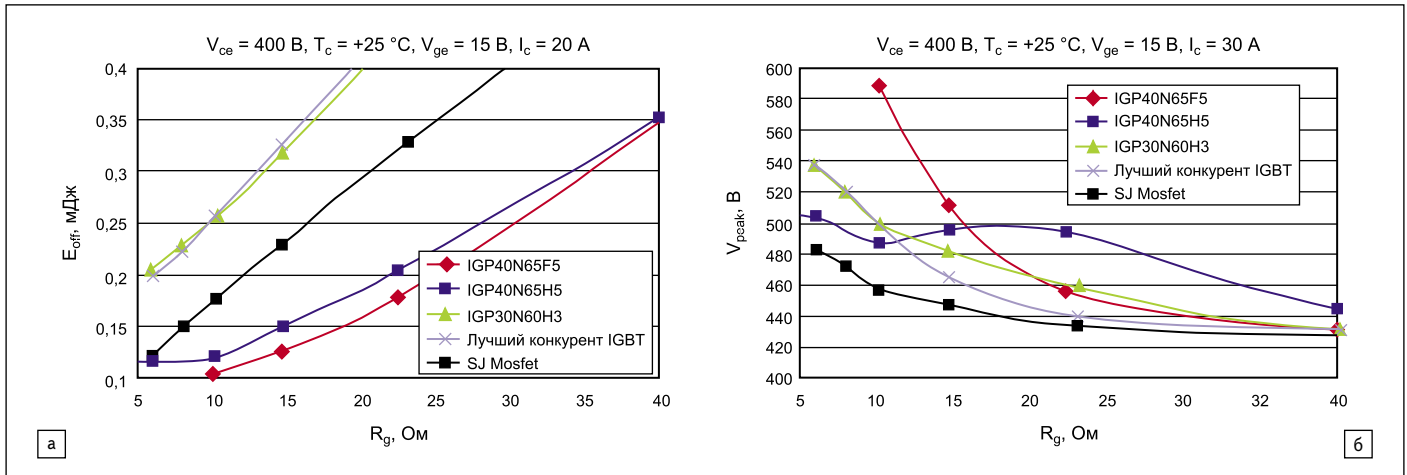


Рис. 1. Зависимость потерь при выключении от сопротивления затвора: а) потери энергии при выключении; б) выбросы напряжения

симость потерь при выключении от сопротивления  $R_g$  в стандартной двухимпульсной испытательной схеме с паразитной индуктивностью в цепи коммутации 45 нГн. Графики  $E_{off}$  для приборов H5 и F5 располагаются значительно ниже, чем для традиционных быстродействующих IGBT: примерно в той же области, что и для MOSFET с технологией суперперехода при низком значении  $R_g = 5$  Ом.

На рис. 16 показана зависимость напряжения коллектор–эмиттер от сопротивления  $R_g$  при выключении. График, наглядно иллюстрирующий различия между H5 и F5, обосновывает необходимость существования обоих семейств в рамках одной технологии. Семейство H5 демонстрирует плавную характеристику переключения, при этом выбросы напряжения имеют тот же порядок, что и у приборов HighSpeed3. В то же время семейство F5 характеризуется более высокими выбросами напряжения при выключении, но при этом и более высокой эффективностью. Типичная форма сигнала показана на рис. 2: прибор F5 демонстрирует гораздо более быстрый спад тока при выключении,

что неизбежно приводит к значительным выбросам напряжения ( $Ldi/dt$ ).

На рис. 3 показана связь между потерями при включении ( $E_{on}$ ) и сопротивлением затвора при включении ( $R_{g,on}$ ) для семейств F5 и H5. Как видно на рисунке, транзисторы TRENCHSTOP 5 по многим характеристикам аналогичны эквивалентным по параметрам MOSFET с суперпереходом, при этом потери TRENCHSTOP 5 значительно ниже, чем у транзисторов IGBT предыдущего поколения. Кроме того, можно сделать вывод, что характеристиками включения F5 и H5 можно управлять, меняя сопротивление затвора  $R_{g,on}$  в широком диапазоне.

Учитывая данные, приведенные на рис. 3–5, можно сделать следующие выводы:

- Разработчикам необходимы оба семейства IGBT, одно из которых отличается простотой использования (H5), другое — высоким быстродействием и высокой эффективностью (F5), однако оно предъявляет повышенные требования к индуктивности в цепи коммутации.
- Выбросами напряжения и коммутационными потерями можно управлять.

• Потерями при включении можно управлять, они эквивалентны потерям в MOSFET с суперпереходом.

• В конечном счете существует определенный баланс между потерями на переключение и выбросами напряжения. Чтобы ограничить выбросы напряжения, для управления приборами семейства F5 необходимо использовать более высокоомные резисторы в цепи затвора, чем для семейства H5.

• Семейство F5 имеет наивысшую эффективность благодаря более высокой скорости изменения тока  $di/dt$  и рекомендуется для схем преобразователей с низкой индуктивностью в цепи коммутации и для использования в комбинации с SiC-диодами.

• Семейство H5 допускает управление при снижении сопротивления резистора в цепи затвора вплоть до 5 Ом благодаря более мягкому по сравнению с F5 выключению.

## Анализ применения

Для оценки характеристик приборов семейства H5 при работе в реальных устрой-

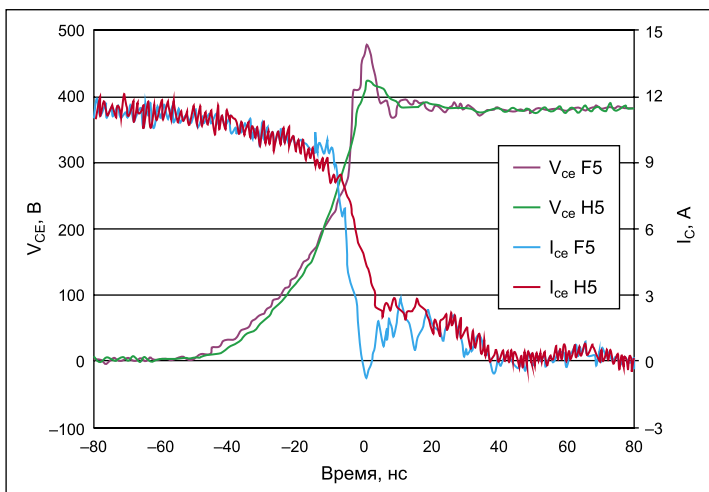


Рис. 2. Сравнение типичной формы сигнала при выключении для семейств H5 и F5

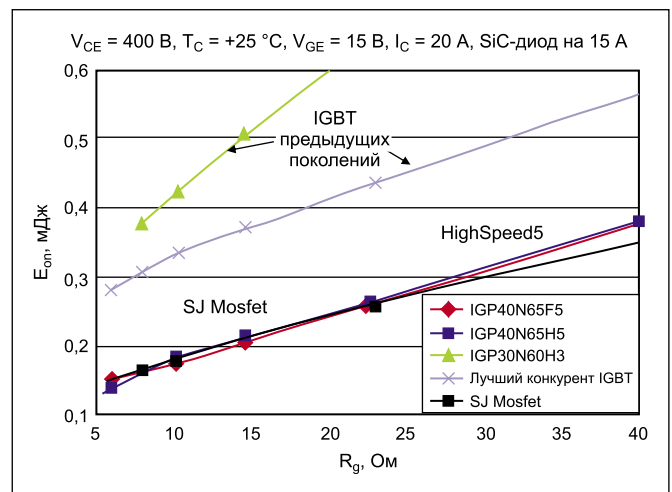


Рис. 3. Потери энергии при включении в зависимости от сопротивления затвора  $R_{g,on}$

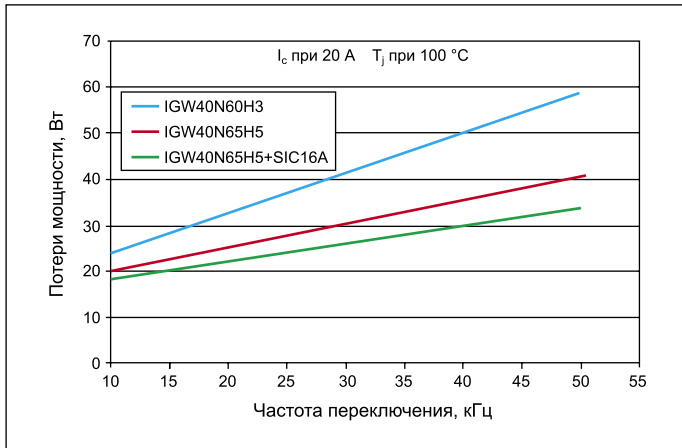


Рис. 4. Зависимость  $P_{tot}$  от частоты переключения

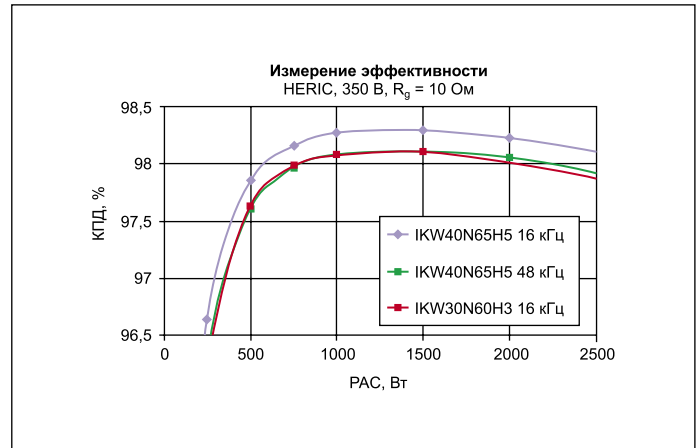


Рис. 5. Эффективность топологии HERIC при различных частотах переключения

ствах преобразовательной техники измеренные значения сравнивались с результатами измерения эквивалентных ключей семейства HighSpeed3 в аналогичных условиях.

Учитывая резкий рост КПД, который приборы семейства Н5 продемонстрировали при испытании устройств, разработчики должны сделать принципиальный выбор, ответить на два главных вопроса:

1. Необходимо ли, например, в современных фотоэлектрических преобразователях поддерживать традиционную частоту коммутации 20 кГц, что позволяет достичь максимального КПД, возможного при применении технологии TRENCHSTOP 5?
2. Или лучше повысить частоту коммутации, сохранив при этом КПД преобразователя на уровне HighSpeed3 либо сохранив температуру корпуса, но при этом сконцентрироваться на снижении стоимости системы за счет уменьшения размеров пассивных компонентов?

Для получения информации, которая поможет ответить на эти вопросы, проводился очень простой тест при следующих условиях: прямоугольный импульс — 20 А, длительность рабочего цикла — 50%, максимальная температура перехода — +100 °С. Эти данные необходимы, чтобы продемонстрировать снижение потерь в приборах Н5 по сравнению с приборами Infineon HighSpeed3 в зависимости от частоты переключения. Результаты этого простого теста в виде зависимости общих потерь в IGBT от частоты переключения показаны на рис. 4.

Что касается ответа на первый вопрос, отметим, что при частоте коммутации 20 кГц общие потери в пересчете на один транзистор IGBT снижаются с 32,8 Вт (HighSpeed3) до 25,04 Вт (Н5). Таким образом, только за счет внедрения нового семейства Н5 (не меняя схему драйвера или разводку печатной платы) потери мощности удастся снизить более чем на 23%. Кроме того, при замене прибора IKW40N65H5, вместе с которым в качестве защитного FWD-диода используется ультрабыстрый кремниевый диод семейства

Rapid, на IGW40N65H5 в комбинации с SiC-диодом Infineon второго поколения удастся дополнительно снизить потери на 11%.

Применение приборов Н5 обеспечивает снижение потерь в IGBT, а следовательно, повышение КПД преобразования. Уделяя особое внимание повышению КПД, разработчики смогут дифференцировать свои приложения, реализовать в них дополнительные преимущества и в итоге увеличить рыночную цену конечной продукции.

Теперь рассмотрим второй вопрос и обсудим влияние частоты коммутации на потери.

Сначала оценим, можно ли сохранить уровень коммутационных потерь, если вместо приборов HighSpeed3 использовать Н5. В условиях описанного выше простого теста, результаты которого приведены на рис. 4, при переходе от HighSpeed3 к Н5 частоту коммутации удалось увеличить более чем на 42%, до 35 кГц. При использовании прибора Н5 в комбинации с карбид-кремниевым диодом частота переключения выросла еще больше — на 28%, до 48 кГц.

Возможность повышения частоты при сохранении температурных характеристик дает преимущества с точки зрения стоимости и надежности конечных устройств. Эти преимущества можно реализовать, применяя более миниатюрные и легкие магнитные компоненты и сокращая или даже исключая использование электролитических конденсаторов. И хотя повышение частоты переключения усложняет разработку, оно обеспечивает очевидную выгоду в таких устройствах, как фотоэлектрические преобразователи и ИБП, где стоимость пассивных компонентов является основной статьей расходов.

Вернемся к результатам исследования зависимости температуры перехода от частоты переключения, исходя из предположения, что для введения запаса по температуре кристалла у любого силового прибора, например на уровне 80% от максимальной температуры ( $T_{jmax}$ ), можно определить максимально допустимые потери в расчете на один прибор. Рассмотрим практический пример,

чтобы продемонстрировать рабочие характеристики Н5: предположим, что согласно спецификации максимальная температура перехода равна +100 °С.

Принимая во внимание уже упомянутые условия испытаний (прямоугольный импульс 20 А, длительность рабочего цикла 50%), для прибора с номинальным током 40 А в стандартном корпусе TO-247 максимальные потери могут составить 40 Вт. При 40 Вт максимальная рабочая частота транзисторов HighSpeed3, соответствующая максимальной температуре перехода 100 °С, составляет 28 кГц. Для новых приборов Н5, однако, частоту коммутации можно повысить до 50 кГц, то есть примерно на 50%, притом что температура перехода останется неизменной. Таким образом, при сохранении температуры кристалла (а температура кристалла определяет надежность прибора на протяжении всего срока службы) частоту коммутации можно значительно повысить. Конечно, как и в жизни, здесь существуют компромиссы, и на частоте выше 33 кГц (как показывает простой расчет) КПД может оказаться ниже, чем у приборов HighSpeed3 на частоте 20 кГц. Главное достоинство технологии TRENCHSTOP 5 состоит в том, что она предоставляет разработчику свободу выбора при оптимизации схемы в соответствии с требованиями спецификации.

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты измерений для топологии HERIC, полученные в Фраунгоферовском институте солнечных энергосистем (Institute for Solar Energy systems, ISE). IGBT семейства Н5 позволяет утроить частоту коммутации — с 16 до 48 кГц — по сравнению с аналогичным транзистором HighSpeed3 при сохранении КПД преобразования во всем диапазоне нагрузок. И наоборот, при сохранении частоты коммутации на уровне 16 кГц прибор Н5 обеспечивает повышение общего КПД системы.

Необходима четкая стратегия разработки, чтобы полностью раскрыть преимущества IGBT-транзисторов TRENCHSTOP 5. Дальнейшего повышения КПД можно достичь, используя в качестве антипараллельно-

го диода карбид-кремниевый диод или IGBT семейства F5. Те компании, которые способны успешно управлять стратегией разработки, смогут предложить заказчикам разные системы и увеличить свою долю на рынке.

### Выводы

Испытания приборов в реальных устройствах подтверждают, что технология TRENCHTOP 5 устанавливает новые стандарты для IGBT-ключей с частотой выше 16 кГц. Благодаря максимальной оптимизации профиля распределения носителей заряда, дальнейшему усовершенствованию компанией Infineon технологии изготовления тонких полупроводниковых пластин, значительному снижению потерь при включении и выключении в условиях жесткой комму-

тации, а также низкому напряжению  $V_{CE(sat)}$ , транзисторы IGBT позволяют добиться КПД фотоэлектрического преобразователя свыше 98%. Более того, они имеют тот же уровень выбросов напряжения и электромагнитных помех, что и хорошо известные приборы HighSpeed 3-го поколения.

Приборы семейства H5 с ультрабыстрыми кремниевыми диодами семейства Rapid в качестве антипараллельного диода помогают создавать простые в использовании решения для таких высокопроизводительных промышленных устройств, как фотогальванические преобразователи, источники бесперебойного питания и сварочные аппараты. Приборы H5 в комбинации с карбид-кремниевым диодом отличаются более высокой эффективностью, а приборы F5 обеспечивают дополнительную оптимизацию.

IGBT, созданные на основе технологии TRENCHSTOP 5, имеют усовершенствованные рабочие характеристики. Теперь дело за разработчиками, задача которых — полностью реализовать открывающиеся возможности. ■

### Литература

1. Kimmer T., Griehl E. TRENCHSTOP 5: A new application specific IGBT series. PCIM Europe 2012. Nuremberg, Germany.
2. Chiola D., Hüsken H., Kimmer T. High Speed IGBT with MOSFET-like switching behavior. PCIM China 2010.
3. Laska T., Münzer M., Pfirsch F., et al. The Field Stop IGBT (FS IGBT) — A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential. ISPSD. May 22–25, 2000. Toulouse, France.