

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Беспалов Н. Н., Лысенков А. Е.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», г. Саранск,
тел.: +7 (8342) 24-37-05,
e-mail: bnn48@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются некоторые проблемы выбора элементной базы, которые возникают у разработчика при проектировании устройств силовой электроники.

Ключевые слова: MOSFET, IGBT, силовая электроника, потери проводимости, потери переключения.

Annotation. The article deals with some problems of choice of the element base which arise at the developer at designing of power electronics system.

Key words: MOSFET, IGBT, power electronics, conduction losses, switching losses.

Введение

Переход элементной базы силовой электроники на качественно новый уровень происходит, как правило, в связи с неудовлетворенностью характеристиками существующей элементной базы, за счёт использования усовершенствованных или новых технологий изготовления компонентов. Так, например, полевые транзисторы были созданы ради возможности управления не током, а напряжением, что снизило общее энергопотребление системы. Появление твердотельных реле было обусловлено необходимостью получения бесконтактного ключа, что исключило обгорание контактов, свойственное электромеханическим реле и увеличило срок службы реле. Но существуют пограничные области, где выбор в пользу применения выполненного по той или иной технологии компонента, не очевиден.

Прогноз ряда экспертов в начале 90-х о том, что к 2000 г. традиционные силовые биполярные транзисторы исчезнут из сферы применения в устройствах силовой электроники, будучи заменёнными там *MOSFET* и *IGBT*, не оправдался. Доля силовых биполярных транзисторов (СБТ) в общей структуре мирового рынка силовых полупроводниковых приборов (СПП), хотя и существенно снизилась, все же ещё весьма значительна. Составленная на основе данных за 2000 г. полная структура мирового рынка СПП представлена на рис. 1 [1]:

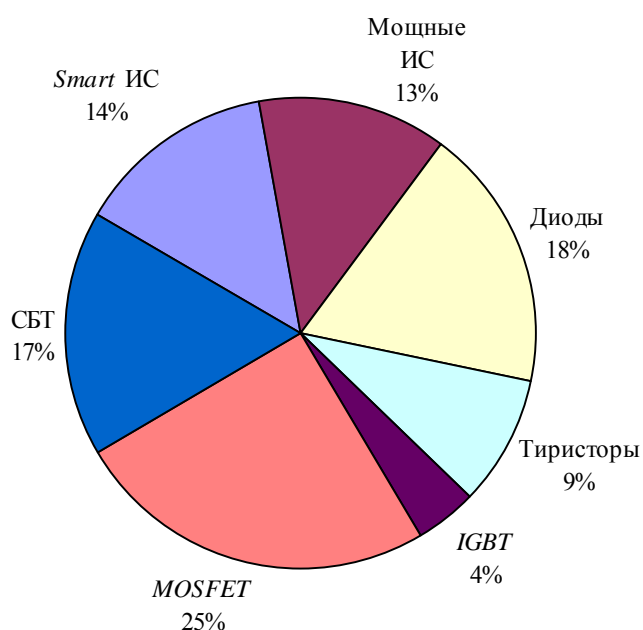


Рис. 1. Структура мирового рынка СПП в 2000 г.

За последнее десятилетие был совершён серьёзный прорыв в области изготовления *MOSFET* и *IGBT*, и их доля значительно возросла, в основном, за счёт снижения доли СБТ. На данный момент можно с уверенностью сказать, что *MOSFET* и *IGBT* — главные управляемые полупроводниковые элементы в силовой электронике.

Особенности применения *MOSFET* и *IGBT*

При проектировании устройств силовой электроники, работающих на больших токах, высоких частотах и напряжениях, часто встаёт вопрос о том, какие из мощных транзисторов использовать — *MOSFET* или *IGBT*. Опыт показывает, что не существует каких-либо строгих правил, которыми можно было бы руководствоваться при выборе.

Оба прибора управляются прикладываемым к затвору напряжением, что является существенным преимуществом перед управляемым током биполярным транзистором из-за более простой цепи управления.

На этом сходства данных силовых транзисторов практически заканчиваются. Главным различием приборов является то, что *MOSFET* обладает резистивным каналом сток-исток, а *IGBT* — *p-n*-переходом коллектор-эмиттер, вследствие чего приборы обладают различными возможностями рассеяния мощности в открытом состоянии.

Потери проводимости для этих приборов определяются следующим образом [2]:

MOSFET:

$$P = I_D^2 \cdot r_{DS(on)},$$

где I_D — ток стока; $r_{DS(on)}$ — сопротивление сток-исток в открытом состоянии.

IGBT:

$$P = I_{CE} \cdot U_{CE sat},$$

где I_{CE} — ток коллектор-эмиттер; $U_{CE sat}$ — напряжение насыщения коллектор-эмиттер.

Ключевым различием данных выражений является наличие возведённого в квадрат значения тока в выражении для определения потерь *MOSFET*. Таким образом, чтобы сохранить рассеяние мощности на определенном уровне при увеличении тока *MOSFET*, необходимо, чтобы сопротивление прибора $r_{DS(on)}$ уменьшалось.

Кроме того, при увеличении температуры прибора сопротивление *MOSFET* $r_{DS(on)}$ растёт, в то время как напряжение *IGBT* $U_{CE sat}$ падает. Следовательно, с ростом температуры происходит увеличение потерь проводимости в *MOSFET* и уменьшение в *IGBT*.

Однако механизмы, определяющие полные потери мощности двух типов приборов, различны. В *MOSFET* эти потери в основном обусловлены потерями на электропроводность, тогда как потери на переключение на достаточно высоких частотах (>50 кГц) в 3,5 раза меньше. В *IGBT* все наоборот: потери на электропроводность значительно меньше, чем у *MOSFET*, тогда как потери на переключение, особенно на высоких частотах, велики. Происходит это из-за того, что у *MOSFET* в проводимости не участвуют неосновные носители заряда, поэтому нет затрат на их рекомбинацию, в отличие от *IGBT*.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема *IGBT*. При подаче на затвор прибора сигнала высокого уровня скорость включения *IGBT* будет определяться входящим в его состав полевым транзистором.

Скорость выключения прибора будет определяться рекомбинацией неосновных носителей

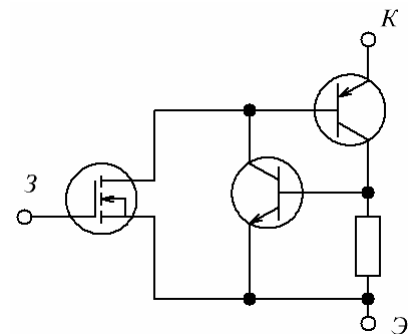


Рис. 2. Эквивалентная схема *IGBT*.

заряда. Поскольку база недоступна, ускорить выключение схемными методами нельзя. При изменении некоторых параметров прибора (например, толщины окисла и легирования) скорость его выключения может быть увеличена. Однако подобное увеличение приводит к снижению токовых возможностей *IGBT*. Таким образом, борьба за высокие динамические характеристики и сокращение потерь переключения приводит к росту потерь проводимости, поэтому достичь оптимальных результатов тут невозможно. В свою очередь, снижение статических потерь, а это достигается, в частности, за счёт увеличения коэффициента передачи *p-n-p* транзистора и снижения напряжения насыщения, приводит к росту потерь переключения. Поэтому все ведущие производители *IGBT* выпускают приборы с разным быстродействием для применения на разных частотах.

В области потерь переключения *MOSFET*, помимо очевидных достоинств, обладает скрытым недостатком. Время обратного восстановления его внутреннего диода существенно больше времени обратного восстановления специальных диодов, которые применяются в качестве антипараллельных диодов в *IGBT*. Это приводит к большим потерям включения и токовым перегрузкам в полумостовых схемах.

Из-за большей площади структуры *IGBT* его рассеиваемая мощность намного больше. Следствие этого — значительный рост температуры *p-n*-перехода. Чтобы температура не превышала критического значения, общая рассеиваемая мощность *IGBT* не должна быть выше некоторой заданной величины, рассчитываемой с учетом значений теплового сопротивления теплоотвода, корпуса, *p-n*-переходов, полевого транзистора. С другой стороны, с увеличением мощности (и, следовательно, с ростом температуры прибора) потери на электропроводность *MOSFET* растут быстрее, чем потери на переключение *IGBT*. При значении переключаемой мощности 300 Вт потери обоих типов транзисторов сопоставимы, а при 500 Вт *IGBT* получают преимущество. Однако с ростом частоты переключения *IGBT* это преимущество теряют.

Таким образом, не существует какого-то точного разграничения между областями применения *MOSFET* и *IGBT*, их можно лишь приблизительно разграничить для конкретных приборов. Согласно рекомендациям крупнейшего производителя полупроводниковых приборов для систем распределения мощности и управления двигателями — фирмы *International Rectifier*, на данный момент можно выделить несколько групп задач, которые подразумевают использование *MOSFET* или *IGBT* [3]:

1. В высокочастотных (>20 кГц) системах, предназначенных для работы при относительно невысоких напряжениях (<250 В) с большим рабочим циклом и при достаточно больших колебаниях сети или нагрузки целесообразно применять *MOSFET*. К таким системам можно отнести импульсные источники питания, зарядные устройства и т. д.

2. В системах, работающих при высоких уровнях напряжения (>1000 В) на низких частотах, с малым рабочим циклом и при незначительных колебаниях сети или нагрузки преимущество имеет *IGBT*. К таким системам относятся низкочастотные источники бесперебойного питания, работающие с постоянной нагрузкой, системы управления двигателями, работающие на частоте менее 20 кГц и т. д.

3. При напряжениях от 250 до 1000 В необходим учет различных факторов (рассеяние мощности, рабочая частота, цена) для верного выбора.

Знания особенностей приборов и рекомендаций изготовителей необходимы разработчикам при проектировании силового оборудования. Однако наиболее эффективному использованию мощных транзисторов препятствует существенный разброс величин их параметров, связанный с нестабильностью технологического процесса производства полупроводниковых приборов. В технической документации на приборы изготовитель публикует усредненные величины параметров приборов, и разработчик вынужден использовать их при создании силовых систем. Исследования показывают [4], что информация, содержащаяся в паспортных данных на силовые транзисторы, не может быть использована для решения определённых задач, предъявляющих высокие требования к надёжности схем и устройств. Для более успешного использования СПП необходимо априорно знать их электротепловые параметры и характеристики.

В настоящее время в промышленности не существует эффективных методов и аппаратуры, с помощью которых возможна комплексная оценка качества СПП по электротепловым параметрам и характеристикам с возможностью автоматизированной отбраковки потенциально ненадежных приборов. Разработка подобных методов в настоящее время является важной задачей развития силовой электроники, решение которой позволит:

- 1) на стадии разработки и проектирования СПП — уточнять величины основных электротепловых параметров и характеристик разрабатываемых приборов;
- 2) при серийном выпуске СПП — осуществлять их сплошной контроль и вести отбраковку потенциально ненадежных приборов;
- 3) при изготовлении преобразователей — контролировать и подбирать СПП по электротепловым параметрам и характеристикам;
- 4) при эксплуатации преобразователей на стадии входного контроля — осуществлять дополнительный подбор приборов по электротепловым параметрам и характеристикам вместо отказавших приборов и отбраковывать потенциально ненадежные.

Получение расширенной информации о параметрах и характеристиках СПП на всех стадиях жизненного цикла приборов позволит существенно повысить их качество. Кроме того, проведение сплошного контроля СПП по электротепловым параметрам с выявлением потенциально ненадежных приборов, которые могут появиться в результате нестабильности технологического процесса производства, позволит на порядок снизить интенсивность их отказов в силовых системах.

Заключение

Не существует правил, подходящих в любой ситуации для выбора прибора, который наиболее эффективен в определенной схеме. Выбор определяется мощностью прибора и используемым режимом, поскольку в зависимости от него *MOSFET* и *IGBT* могут продемонстрировать преимущества в одной и той же схеме.

Для верного выбора разработчику необходимо понимание эффективности каждого прибора. Однако только знаний особенностей *MOSFET* и *IGBT* для этого недостаточно. Необходимо наличие современного оборудования, предназначенного для определения параметров и характеристик конкретных приборов. Данное оборудование позволит наиболее полно понять достоинства и недостатки каждого конкретного прибора, что, в свою очередь, позволит повысить надежность разрабатываемых систем на основе СПП.

Литература

1. **Шерстюк В.** Транзисторные ключи для устройств силовой электроники / В. Шерстюк // Электронные компоненты. — 2001. — №2. — С. 61—62.
2. **Jamie Dunn.** Determining MOSFET Driver Needs for Motor Drive Applications // Microchip Technology Inc. — Application Notes №898. — 2003 — Р. 3—4.
3. **Дуплякин Е.** IGBT или MOSFET? Оптимальный выбор / Е. Дуплякин // Электронные компоненты. — 2000. — №1. — С. 57—58.
4. **Беспалов Н. Н., Ильин М. В. Лысенков А. Е.** Исследование стоковых характеристик мдп-транзисторов // Электроника и информационные технологии. — 2009 выпуск 1 (5) — 2009. — http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Drain_characteristics_MOSFET.pdf. — 04200900067/0021.

Сведения об авторах

Беспалов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматике Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, e-mail: bnn48@mail.ru.

Лысенков Алексей Евгеньевич – аспирант кафедры автоматике Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, e-mail: lysenkov87@gmail.com.