

# Сравнительные экспериментальные исследования модулей IGBT

## и модулей на основе комбинированных СИТ-МОП-транзисторов

**В статье приводятся сравнительные исследования комбинированных полупроводниковых ключей, реализованных на базе IGBT и комбинированного СИТ-МОП-транзистора (КСМТ) как полных функциональных аналогов.**

**Олег Бономорский**

elti\_bon@mail.ru

**Павел Воронин**

VoroninPA@mpei.ru

**Владимир Куканов**

v\_kuk1@mail.ru

**Щепкин Николай**

ShchepkinNP@mpei.ru

**В** настоящее время в устройствах энергетической электроники широко применяются следующие основные типы полупроводниковых ключей [1]:

1. Биполярные ключи с инжекционным управлением (силовые биполярные транзисторы и тиристоры).
2. Униполярные ключи с полевым управлением (мощные МДП-транзисторы, транзисторы с управляющим р-п-переходом, в том числе транзисторы с электростатической индукцией).
3. Комбинированные ключи, сочетающие преимущества полевого управления и биполярного механизма токопереноса (биполярные транзисторы с изолированным затвором, комбинированные СИТ-МОП-транзисторы, МОП-тиристоры).
4. Силовые интегральные схемы «разумных» ключей и интеллектуальные силовые модули, объединяющие в одном корпусе силовую часть, схемы управления, диагностики и защиты.

Основной тенденцией развития силовых полупроводниковых ключей является совершенствование комбинированных приборов, направленное на решение следующих основных задач [2]:

- снижение уровня остаточных напряжений при заданной плотности силового тока и высоком быстродействии;
- повышение устойчивости работы ключа в режимах динамических перегрузок (по току, напряжению и тепловому воздействию);
- повышение эффективности управления ключом с ростом коммутируемой мощности.

В последние годы появился целый ряд силовых ключей, обладающих подобными свойствами. Это, прежде всего, Trench-IGBT, при изготовлении которых используется технологический процесс с проектными нормами менее 1 мкм, а также разно-

видности данных ключей — биполярные транзисторы с изолированным затвором и увеличенной инжекцией (IEGT) и Trench-IGBT с накоплением носителей (CSTBT) [3].

Следует подчеркнуть, что технология изготовления новейших типов силовых приборов является весьма сложной, что делает ее коммерчески выгодной лишь небольшому числу фирм с наиболее современной и дорогостоящей производственной базой (Mitsubishi Electric, Toshiba Corporation и т. д.).

Наряду с представленными ключами, образующими с точки зрения схемотехники класс так называемых составных комбинированных приборов (управление высоковольтным биполярным транзистором осуществляется по схеме, аналогичной схеме Дарлингтона), успешно развивается еще одно направление комбинированных полупроводниковых устройств, основанное на каскодном соединении низковольтного мощного МДП-транзистора с высоковольтным элементом биполярной или униполярной проводимости [2]. В качестве высоковольтного элемента используются транзисторные структуры с управляющим р-п-переходом, а также структуры с инжекционным управлением.

Одним из преимуществ данного класса ключевых приборов является их технологическая доступность для более широкого круга фирм-производителей за счет меньших капиталовложений в освоение производства (что особенно важно для отечественных предприятий). Хотя следует подчеркнуть, что высоковольтный элемент каскодного ключа реализуется с использованием как отдельных самых современных технологических процессов, так и оригинальных отечественных технологий, а технология реализации управляющей МОП-структу-

Таблица 1

Силовой прибор	Схема соединения высоковольтного и управляющего элементов	Управляющий элемент структуры	Высоковольтный элемент структуры
Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)	Каскадная составная схема (аналог схемы Дарлингтона или комплементарной составной схемы)	Низковольтный МОП-транзистор и высоковольтный унитар (JFET) в едином монокристалле	Биполярный транзистор с инжекционным управлением
Комбинированный СИТ-МОП-транзистор (КСМТ)	Каскадная схема СИТ- и МОП-транзистора	Низковольтный МОП-транзистор и высоковольтный унитар (JFET) в двух монокристаллах	Тиристор с электростатическим управлением (управляемый полем диод)

ры аналогична применяемой при производстве силовых транзисторов серий OptiMOS (Infineon Technologies) или StripFET (IR).

Успешно реализованными проектами в серии каскадных комбинированных ключей являются:

- силовой ключ на основе высоковольтного карбид-кремниевый униполярного транзистора (SiC-JFET-Cascode) [4] на ток 5 А и напряжение 1500 В для применения в источниках вторичного электропитания;
- стандартный функциональный модуль полумостовой конфигурации на ток 50 А и напряжение 1200 В на основе высоковольтной тиристорной структуры с электростатическим управлением [5];
- тиристорный ключ с эмиттерной коммутацией (ЕСТ) на ток 100 А и напряжение 6 кВ на базе высоковольтного запираемого тиристора специальной конструкции [6].

Особый интерес представляют сравнительные исследования комбинированных полупроводниковых ключей, реализованных на базе различных схмотехнических и технологических решений.

В таблице 1 представлены основные элементы структуры двух комбинированных ключей — функциональных аналогов: IGBT и комбинированного СИТ-МОП-транзистора (КСМТ).

Схмотехнически каскадная структура IGBT и каскадная КСМТ в наиболее общем виде представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Эквивалентные схемы базовых ячеек рассматриваемых ключей, учитывающие эффект модуляции проводимости и низкое напряжение на управляющем МОП-транзисторе, показаны соответственно на рис. 3 и 4. Следует отметить, что обе схемы замещения по набору и связям основных компонентов практически идентичны друг другу, что подчеркивает единство решений при создании совершенного ключа различными методами. Однако имеются и принципиальные различия. Биполярный транзистор в схеме IGBT работает в активном режиме, а в схеме КСМТ — в режиме насыщения, что существенно снижает остаточное падение напряжения ключа в открытом состоянии.

Монолитному IGBT присущ так называемый «триггерный эффект» из-за непосредственной связи паразитного p-n-транзистора (в структуре управляющего МОП-ключа) с высоковольтным p-n-транзистором (рис. 5). Технологическое разделение низковольтного МОП-транзистора и высоко-

вольтного унитарона (JFET) на отдельные монокристаллы в структуре КСМТ позволяет полностью исключить данный эффект (рис. 6), что существенно для относительно высоких плотностей выходного тока.

Теоретическое сравнение рассматриваемых аналогов проведено в работе [7]. Экспериментальное исследование макетных образцов КСМТ на дискретных компонентах и их сравнение с IGBT представлено в другой работе [2]. В данной работе представлено сравнительное исследование функциональных аналогов — силовых модулей IGBT серии CM50DY-24H (Mitsubishi Electric) и силовых модулей КСМТ серии M2TKC-50-12, изготовленных ЗАО «Контур» по заказу фирмы «Кварта-2000» (рис. 7).

Исследование динамических процессов переключения указанных приборов проведено с использованием устройства контроля параметров силовых транзисторов [8].

Контролировались следующие основные параметры силовых транзисторов:

- напряжение насыщения при заданном выходном токе  $U_{ds(sat)}$ ;
- время задержки включения  $t_{d(on)}$ ;
- время задержки выключения  $t_{d(off)}$ ;
- время нарастания выходного тока  $t_r$ ;
- время спада выходного тока  $t_f$ ;
- время спада остаточного тока  $t_s$ ;
- энергия потерь при включении  $E_{on}$ ;
- энергия потерь при выключении  $E_{off}$ .

Переходные процессы включения и выключения (схема резистивной нагрузки) транзисторов модуля CM50DY-24H показаны соответственно на рис. 8 и 9, а транзисторов модуля M2TKC-50-12 соответственно на рис. 10 и 11.

Канал 1 отображает форму входного напряжения управления ключа в масштабе 10 В/дел, канал 2 — форму выходного напряжения ключа в масштабе 100 В/дел, а канал 3 — силовой ток ключа в масштабе 5 А/дел (маркер канала указывает нулевой уровень соответствующего сигнала). Масштаб развертки — 100 нс/дел.

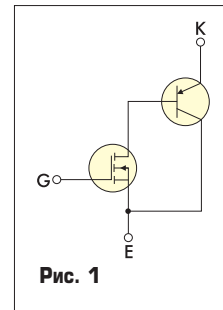


Рис. 1

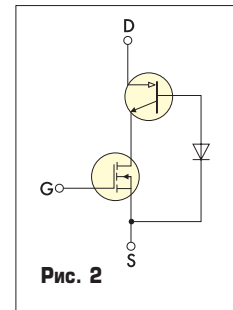


Рис. 2

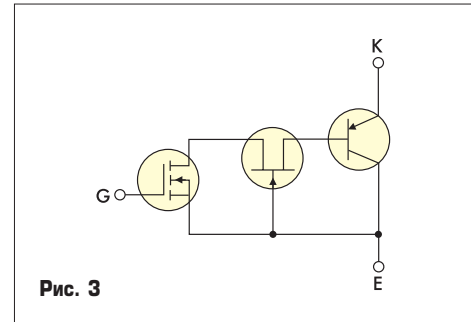


Рис. 3

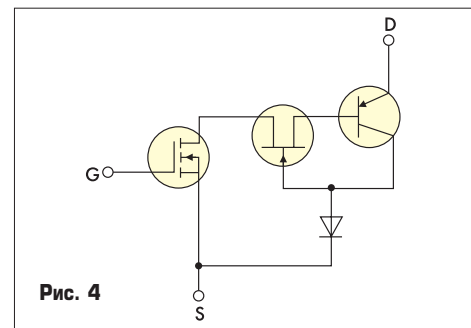


Рис. 4

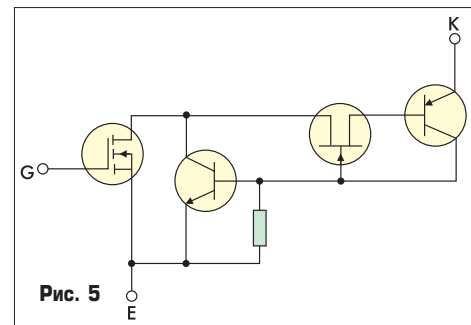


Рис. 5

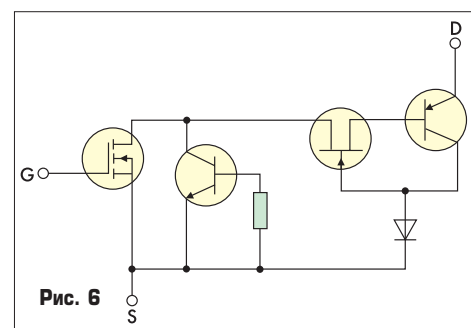
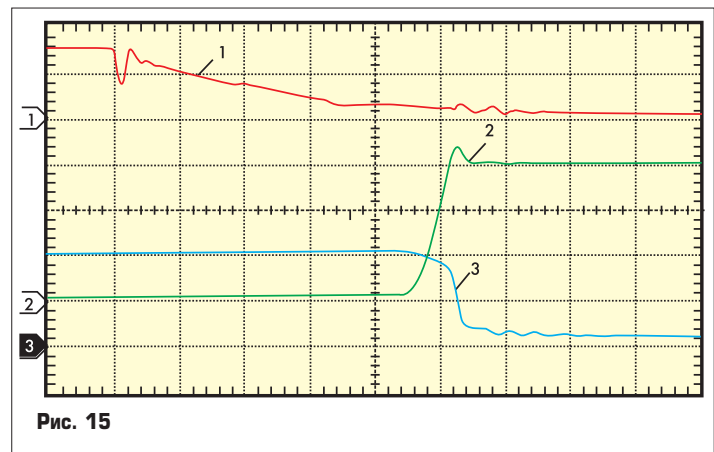
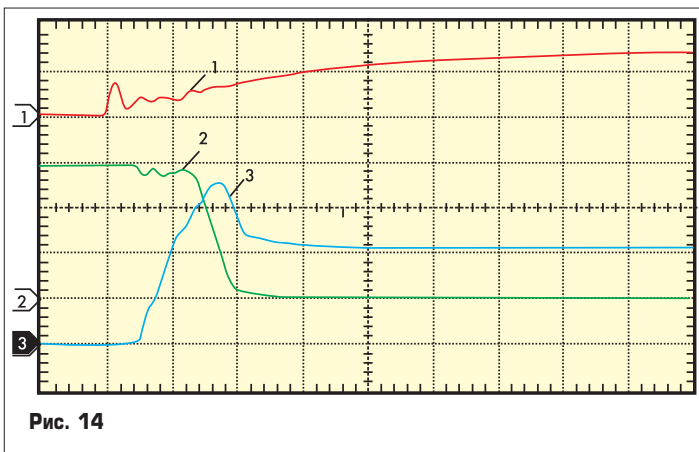
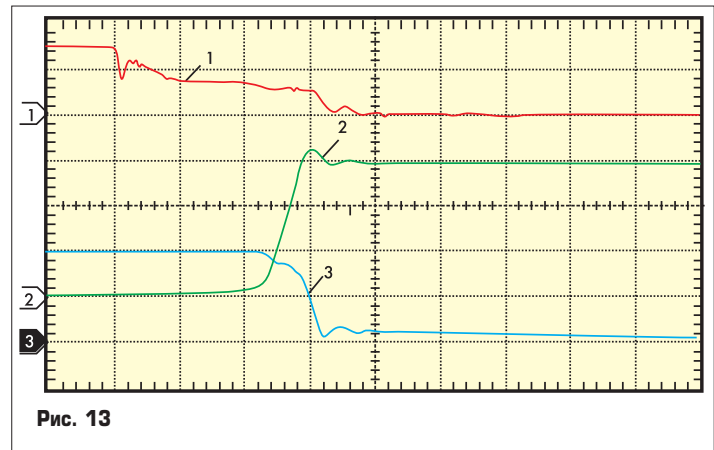
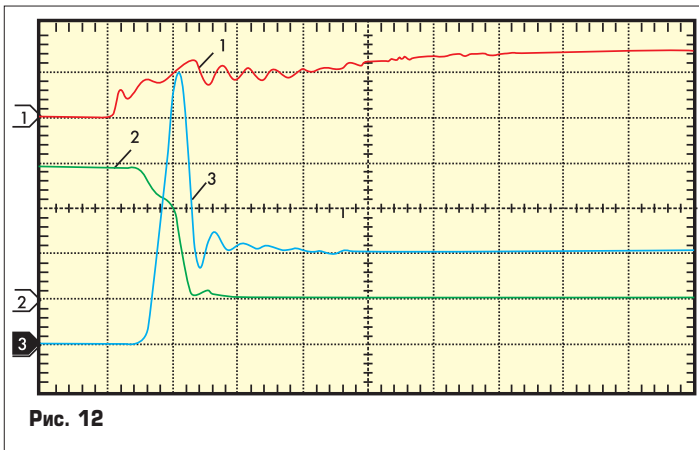
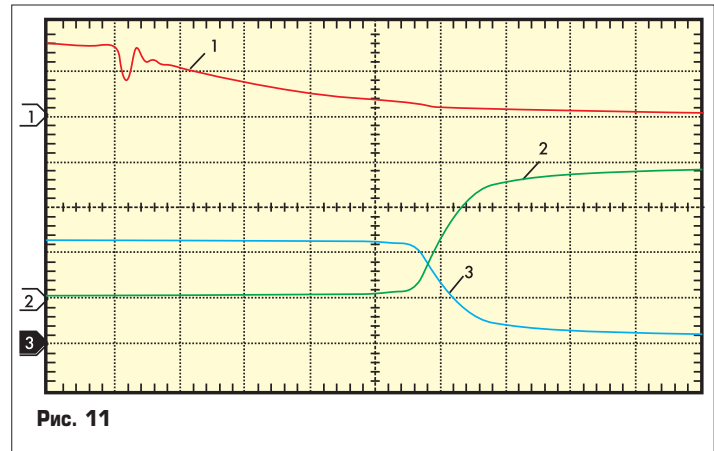
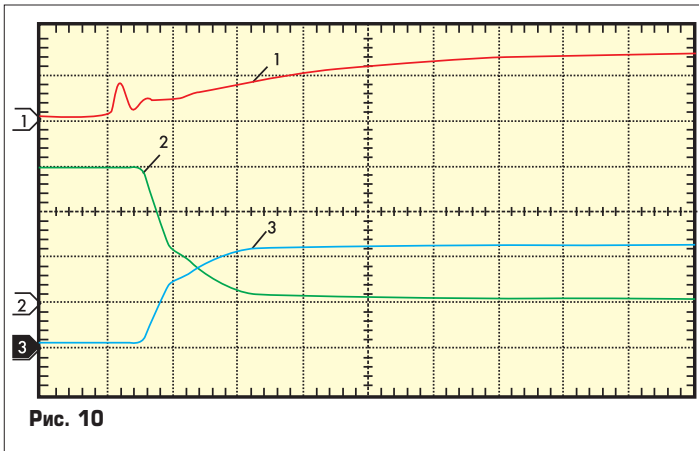
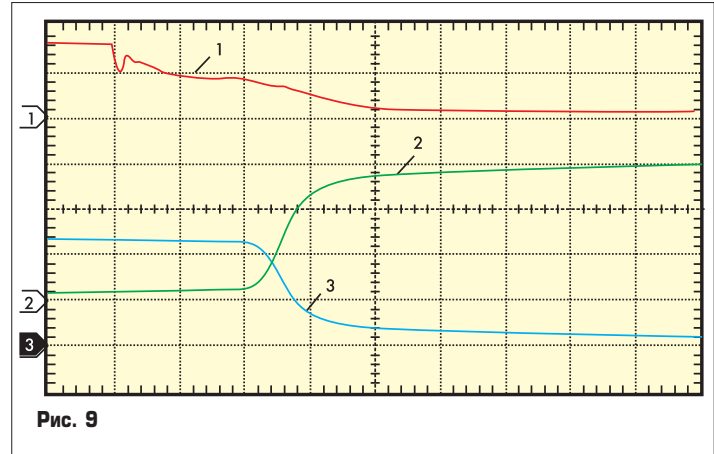
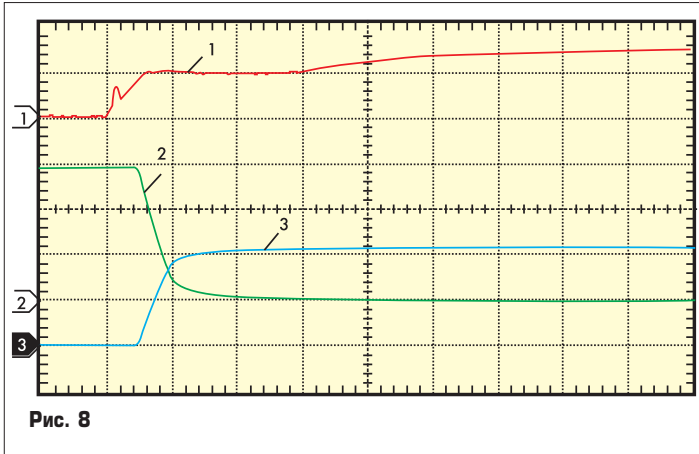


Рис. 6



Рис. 7. Силовые модули КСМТ серии M2TKC-50-12 и IGBT серии CM50DY-24H



Сравнительная характеристика основных параметров обоих модулей представлена в таблице 2.

В реальных условиях силовой ключ применяется чаще всего при индуктивной нагрузке. Поэтому были проведены также ис-

следования динамических процессов в ключах в режиме непрерывных токов для индуктивной нагрузки, шунтированной встречно-параллельным диодом. В качестве обратного применялся диод противоположного ключа в полумостовой конструкции модуля.

Переходные процессы включения и выключения (схема индуктивной нагрузки) транзисторов модуля CM50DY-24H показаны соответственно на рис. 12 и 13, а транзисторов модуля M2TKC-50-12 — соответственно на рис. 14 и 15.

Таблица 2

Тип модуля	$t_{d(on)}$ нс	$t_{rr}$ нс	$t_{d(off)}$ нс	$t_{fr}$ нс	$t_{tr}$ нс	$E_{onr}$ мкДж (по уровню 10%)	$E_{offr}$ мкДж (по уровню 10%)	$E_{onr}$ мкДж (по уровню 2%)	$E_{offr}$ мкДж (по уровню 2%)	$U_{ds(sat)}$ В ( $I_d = 50$ А)
CM50DY-24H	45	60	225	325	700	40	120	50	240	2.7
M2TKC-50-12	45	125	460	250	600	60	115	75	200	2.0

Таблица 3

Тип модуля	$t_{d(on)}$ нс	$t_{rr}$ нс	$t_{d(off)}$ нс	$t_{fr}$ нс	$t_{tr}$ нс	$E_{onr}$ мкДж (по уровню 10%)	$E_{offr}$ мкДж (по уровню 10%)	$E_{onr}$ мкДж (по уровню 2%)	$E_{offr}$ мкДж (по уровню 2%)	$U_{ds(sat)}$ В ( $I_d = 50$ А)
CM50DY-24H	50	15	220	80	700	200	170	205	280	2.7
M2TKC-50-12	50	35	460	90	600	330	150	340	250	2

Канал 1 отображает форму входного напряжения управления ключа в масштабе 10 В/дел, канал 2 — форму выходного напряжения ключа в масштабе 100 В/дел, а канал 3 — силовой ток ключа в масштабе 5 А/дел (маркер канала указывает нулевой уровень соответствующего сигнала). Масштаб развертки — 100 нс/дел.

Сравнительная характеристика основных параметров обоих модулей представлена в таблице 3.

Представленные экспериментальные данные показывают, что в России создан принципиально новый силовой транзисторный модуль, параметры которого не хуже (а в некоторых позициях и лучше), чем параметры IGBT третьего поколения (по классификации Mitsubishi Electric).

По мнению авторов настоящей статьи возможности КСМТ и модулей на их основе только начинают раскрываться, а доказательства их преимуществ перед IGBT требуют

более детальных исследований. Однако очевиден тот факт, что у IGBT появился реальный и серьезный конкурент, причем создан он в России.

Для освоения серийного выпуска модулей КСМТ создан производственный консорциум, в который вошли ОАО «Ангстрем» (производство кристаллов статических индукционных тиристоров — СИТ), ЗАО «Квартал-2000» (нестандартные технологические операции и патентная поддержка) и ОАО «Контур» (сборка в модуль). В настоящий момент отечественная промышленность в состоянии производить комплектующие (прежде всего СИТ) в любом требуемом количестве. Узким местом пока продолжает оставаться качественная сборка приборов. Консорциум открыт для новых участников, как производителей, так и будущих предприятий-потребителей. Разработчики готовы также сотрудничать с потребителями для всесторонних испытаний приборов.

## Литература

1. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2003.
2. Бономорский О., Воронин П. Тенденции развития комбинированных полупроводниковых ключей с полевым управлением // Электронные компоненты. 2002. № 6.
3. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. М.: Додэка-XXI. 2001.
4. Reimann T. Muller A. Application of SiC-JFET-Cascodes in SMPS 48 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. T.U. Ilmenau. 2003. ISSN 1619-4098.
5. Бономорский О. И., Воронин П. А. Полупроводниковое ключевое устройство с полевым управлением. Патент РФ на изобретение № 2199795. Оpubл. 27.02.2003. Бюл. № 6.
6. Сурма А. М., Приходько А. И., Покровский С. В. и др. Полупроводниковый высоковольтный быстродействующий ECT-ключ. Сб. научн. тр.: Системы управления и силовая электроника. М.: ГУП ВЭИ. 2001.
7. Бономорский О. И., Воронин П. А. Сравнительный анализ падения напряжения в открытом состоянии IGBT и комбинированного СИТ-МОП-транзистора / Применение силовой электроники в электротехнике: Мат. докл. н.-тех. сем. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова. 2000.
8. Воронин П. А., Щепкин Н. П. Устройство контроля параметров силовых транзисторов. Практическая силовая электроника. Вып. 11. 2003.