

Подход к решению проблем

разработки планарных структур высоковольтных IGBT

Анализ развития конструктивного исполнения и технологии формирования элементарной ячейки IGBT показывает бесперспективность использования эпитаксиального наращивания рабочего слоя для высоковольтных приборов с напряжением более 800 В. Передовые зарубежные фирмы работают с пластинами с тонким рабочим слоем исходного кремния или непосредственно с тонкими исходными пластинами кремния (bulk-diffused silicon). Другим возможным решением проблемы высокотемпературной обработки тонких рабочих пластин кремния является использование структур типа КНД, формируемых оригинальным процессом склейки через тонкий слой высокотемпературного стекла. Реализованные на базе этого конструктивно-технологического решения планарные варианты IGBT показали высокие эксплуатационные характеристики и приемлемую технологическую воспроизводимость стабильности.

Владимир Громов

gromov@sitsemi.ru

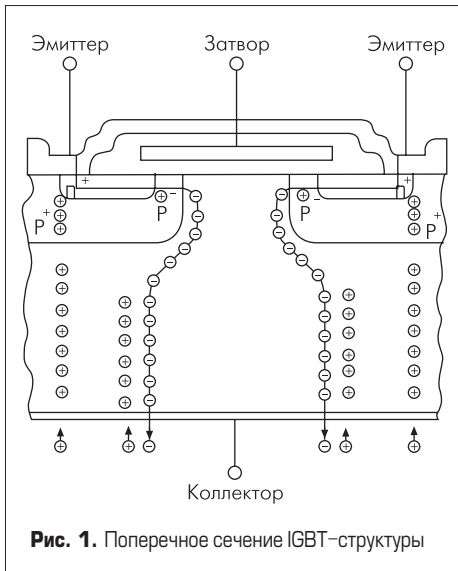
Основные параметры электронных преобразовательных схем определяются характеристиками применяемых ключевых полупроводниковых приборов. В настоящее время наиболее качественное преобразование электроэнергии при максимальной компактности и надежности устройств обеспечивается преобразовательным оборудованием, построенным на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов (СПП с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor, БТИЗ — биполярный транзистор с изолированным затвором) с высокой степенью интеграции.

Бесспорно, в настоящее время IGBT являются наиболее совершенными серийно выпускаемыми ключевыми приборами. Поэтому отсутствие в России производства подобных комбинированных ключей создает острейшую проблему в плане конкурентоспособности отечественных изделий не только собственно силовой электроники, но и многих других важнейших отраслей народного хозяйства, образцов вооружения и военной техники. Зависимость отечественной экономики от импорта все более широкого круга преобразовательных устройств и самих ключевых СПП приобретает стратегически важное значение. Серьезность проблемы признается всеми экспертами без исключения, однако в отношении поиска путей выхода из кризиса мнения расходятся. Существуют предложения ряда ведущих специалистов и руководителей по закупке оборудования и лицензий на производство IGBT у известных зарубежных фирм с внедрением и организацией производства на ведущих отечественных фирмах микроэлектроники. Существует и другое мнение: нынешнее состояние российской микроэлектроники в принципе не позволяет создание СПП, по качеству и характеристикам, сравнимых с зарубежными

приборами. На наш взгляд, обе эти позиции имеют существенные изъяны, и на примере данной статьи мы попытаемся доказать обратное: что существующие на нашем предприятии оригинальные научно-технические наработки позволяют реализовать серийное производство силовых IGBT четвертого поколения без закупки дорогостоящего зарубежного оборудования и лицензий.

Повышенный интерес к приборам IGBT объясняется, прежде всего, чрезвычайно малой мощностью управления и высоким быстродействием, что позволяет создавать на их основе компактные силовые устройства с частотой переключения до нескольких десятков килогерц. Активными элементами IGBT-модулей являются собственно кристаллы IGBT.

Чтобы понять сложность проблемы, необходимо остановиться на одном очень важном свойстве IGBT-приборов. Каждый кристалл IGBT-транзистора представляет собой параллельное соединение большого количества отдельных транзисторных IGBT-структур (ячеек). Плотность размещения отдельных ячеек достигает нескольких сотен тысяч на 1 квадратный сантиметр. Устойчивая совместная работа столь большого количества элементарных IGBT-структур обеспечивается за счет положительного температурного коэффициента сопротивления и вытекающего из этого факта самовыравнивания по току, что и является основой создания IGBT-приборов на большие токи. Сборка силовых IGBT-приборов на токи свыше 50 А осуществляется исключительно в конструкции модульного исполнения. В связи с этим за рубежом силовые IGBT-модули за последнее десятилетие практически полностью вытеснили различные модификации силовых тиристоров в диапазоне напряжений 600–1700 В и постепенно заменяют последние при напряжении до 4500 В.



Технология изготовления IGBT весьма сложна, соответствует технологии изготовления СБИС, организация их производства требует больших затрат, использования проекционной фотолитографии, ионного легирования и применения особо чистого высокоомного кремния, выращенного зонной плавкой. Ведущими фирмами-изготовителями, определяющими сегодня «уровень» изделия, являются Infineon, International Rectifier, Toshiba, Mitsubishi, ABB. Этими фирмами в настоящее время достигнут уровень, позволяющий получить комплекс характеристик прибора, близкий к теоретически предельно возможному. Технические характеристики во многом определяются уровнем технологии создания MOS-структуры на поверхности кристалла, в частности минимальным размером элементарной ячейки (плотностью упаковки ячеек). Наиболее «продвинутой» является trench-технология (пятое поколение IGBT), обеспечивающая минимальный размер ячейки 5–8 мкм, тогда как планарная «самосовмещенная» технология предыдущего, четвертого поколения обеспечивает размер ячейки 10–15 мкм.

Рассмотрим кратко отличительные особенности IGBT-приборов на примере структуры, приведенной на рис. 1.

В отличие от MOSFET, IGBT содержит p^+ -проводящую область на обратной стороне кристалла. По прохождении p^- дрейфовой области электроны попадают в p^+ -область и вызывают инжекцию дырок из p^- -зоны в p^- -зону. Инжектированные дырки будут проходить прямо из дрейфовой области к p^- -контакту эмиттера, и чем ближе к краю эмиттера проходят MOS-канал и p^- -ячейка, тем лучше. В этом случае p^- -дрейфовая область будет наполнена носителями заряда, которые проводят основной ток (ток коллектора); это обогащение зарядом приведет к снижению сопротивления p^- -области и, следовательно, к снижению напряжения «коллектор — эмиттер». Хотя по сравнению с линейным сопротивлением MOSFET в открытом состоянии IGBT имеет дополнительное пороговое напряжение на p^- -переходе коллектора (0,7 В), но напряжение на открытом высоковольтном IGBT (при $U_c \sim 400$ В и более) меньше, чем у MOSFET из-за обогащения основными но-

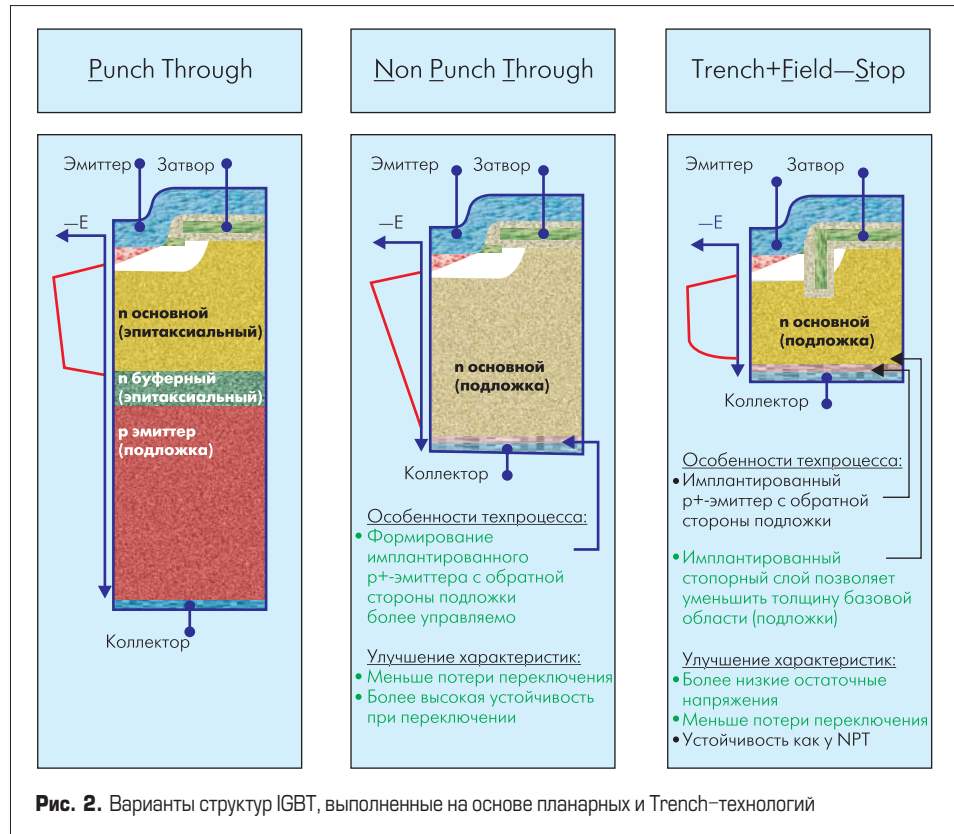


Рис. 2. Варианты структур IGBT, выполненные на основе планарных и Trench-технологий

сителями высокоомной p^- -зоны. По сравнению с MOSFET, IGBT рассчитан на значительно больший ток и напряжение при одинаковых площадях кристалла. С другой стороны, остаточный заряд Q_s , который не был нейтрализован за период уменьшения напряжения на коллекторе, должен рекомбинировать в p^- -зону во время выключения, так как, в отличие от MOSFET, p^- -зона IGBT не имеет внешнего вывода. Это и объясняет более низкое быстродействие IGBT и необходимость дополнительных технологических операций по уменьшению времени жизни в высокоомной p^- -зоне, например создания в ней рекомбинационных центров.

На рис. 2 показаны различные структуры IGBT, выполненные на основе планарных и Trench-технологий, и характеристики их элементов поля в выключенном состоянии.

Существуют две планарные структуры ячейки IGBT: PT-структура (Punch Through) — самый первый вариант IGBT и NPT-структура (Non Punch Through). PT-IGBT имеет буферный p^+ -слой (слой Field stop) между p^- и p^+ -зонами, создаваемый в процессе изготовления. Если p^- и p^+ -слои в PT-IGBT обычно образуются на p^- -подложке с помощью эпитаксиального наращивания, то основа NPT-IGBT — это тонкая монокристаллическая p^- -подложка, с другой стороны которой образуется p^+ -зона коллектора путем имплантации. MOS-управляющие структуры с верхней стороны обеих типов IGBT идентичны по своей планарной структуре. Зона пространственного заряда в PT-IGBT проходит через всю p^- -область в выключенном состоянии. Для того чтобы удерживать эпитаксиальный слой насколько возможно тонким и для обеспечения высоких пробивных напряжений в выключенном состоянии, электрическое поле замыкается высокопримесным p^- -буфером в конце p^- -дрейфовой об-

ласти. В NPT-IGBT p^- -дрейфовая область создана достаточно большой, так что электрическое поле может полностью разрядиться внутри p^- -дрейфовой области в выключенном состоянии при максимальном внешнем напряжении и не достигает p^+ -области, то есть не достигается напряжение «прокола» высокоомной p^- -области.

Структура, выполненная по Trench-технологии, использует технологический процесс с разрешением менее 1 мкм, обычно применяемый для производства кристаллов динамических ОЗУ. Trench-ячейка заметно компактнее планарных, существенно снижено сопротивление канала, уменьшен уровень статических потерь.

Рассмотрим пути совершенствования параметров IGBT. В настоящее время наиболее важными целями при разработке IGBT-кристаллов являются:

- уменьшение падения напряжения в открытом состоянии;
- уменьшение потерь на переключение;
- способность выдерживать перегрузки (по току, напряжению, условиям коммутации);
- высокое напряжение для высоковольтных транзисторов;
- увеличение плотности тока;
- уменьшение площади кристалла и стоимости;
- оптимизированное быстродействие.

За последние годы главной целью разработчиков было усовершенствование конструкции горизонтальной и вертикальной областей ячеек, уменьшение площади ячейки и разработка технологических процессов обработки очень тонких кремниевых подложек. На базе освоения тонкослойной технологии (толщина рабочего слоя менее 100 мкм), например, стало возможно изготовление IGBT с исключительно малыми потерями на 600 В.

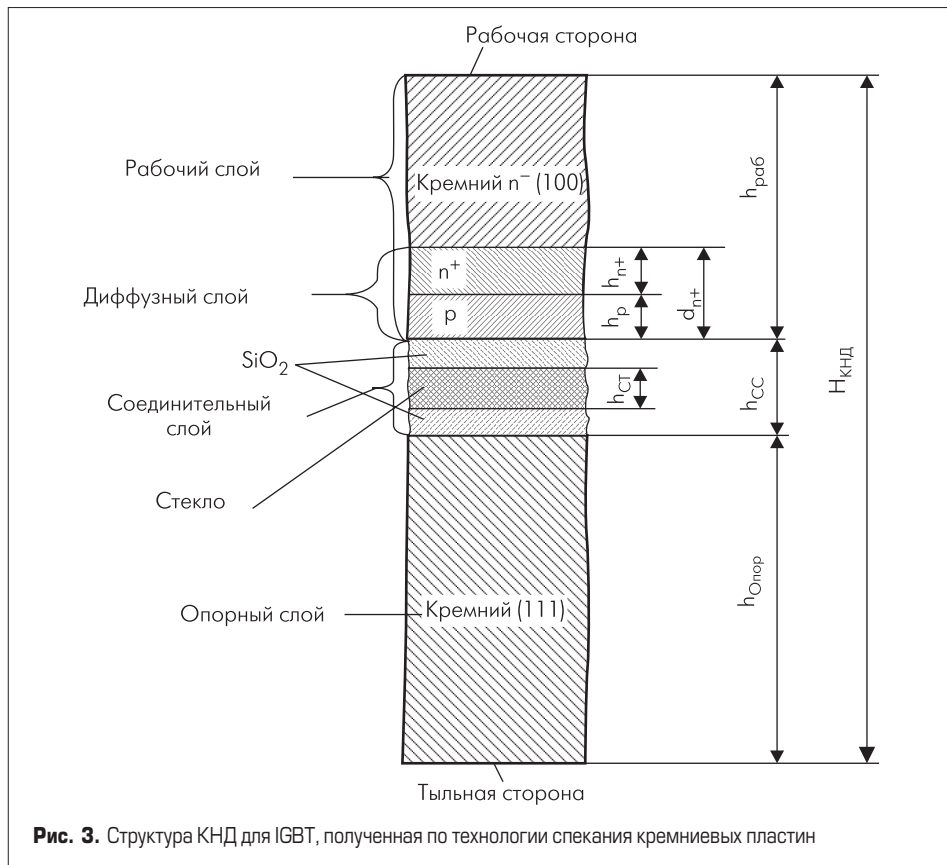


Рис. 3. Структура КНД для IGBT, полученная по технологии спекания кремниевых пластин

Таблица 1

$U_{кз}$	$h_{раб}$	$h_{опор}$	$d_{п+}$	$h_{п+}$	$h_{п}$	$h_{SiO2Pаб}$	$h_{ст}$	$h_{SiO2Oпор}$	$h_{сст}$	$H_{кнд}$
1200	150–160	449–455	10–18	5–12	5–6	1,0–1,5	4–6	1,8–2,2	6,8–9,7	600–630
1800	195–205	404–410								

Чем же характеризуется предлагаемое конструктивно-технологическое решение? Во-первых, оно сочетает в себе положительные моменты известных вариантов:

- Исходный монокристаллический FZ NTD-кремний — как у NPT-структур — (FZ NTD — Float Zone Neutron Transmutation Doped) монокристаллический бездефектный кремний, выращенный бестигельной зонной плавкой и модифицированный до требуемого сопротивления радиационным облучением методом изотопной трансформации Si_{30} в P_{31} .
- Слой Field stop — как у PT.
- Дважды совмещенная ионно-легированная MOS-ячейка (Infineon).

Другой особенностью является исходная структура (рис. 3), которая представляет собой структуру типа кремний на диэлектрике (КНД, SOI — Silicon on Insulator), где рабочим слоем является сошлифованная до требуемой толщины монокристаллическая кремниевая пластина FZ NTD (130, 190 или 250 мкм — пропорционально пробивному напряжению 1200, 1800, 2500 В), а опорной пластиной — обычная кремниевая пластина, изготовленная из кремния, выращенного по методу Чохральского, с высокими требованиями по геометрии без требований по электрическим характеристикам. Опорная и рабочая пластина соединяются тонким слоем высокотемпературного стекла. При этом технологический процесс создания IGBT (FRD) выглядит следующим образом:

- На нижней стороне рабочей n^- -пластины создаются диффузионные p^- -буферный и p^+ -коллекторный слои.

- К рабочей пластине тонким слоем высокотемпературного стекла приклеивается опорная пластина.
- Рабочая пластина в составе склеенной КНД утоняется до требуемой толщины (шлифовка, полировка, суперфиниш).
- Со стороны рабочей пластины полученной структуры создаются MOS-ячейки, периферийный блок высоковольтной изоляции, защитное покрытие.
- Опорная пластина и соединительное стекло отделяются от рабочей пластины.
- На обратной стороне тонкой рабочей пластины формируется металлизация (Al-Ti-Ni-Au или Al-Ti-Ni-Ag).
- Пластина разделяется на кристаллы (скрайбирование).
- Визуальный контроль внешнего вида кристаллов (отбраковка).
- Классификация I (контроль статистических электропараметров).
- Набор в транспортно-операционную тару.
- Протонная обработка для повышения быстродействия.
- Низкотемпературный отжиг (радиационных дефектов).
- Классификация II (контроль статистических и динамических параметров).

Размеры в микронах для структур на напряжении $U_{кз}$ 1200 и 1800 В приведены в таблице 1.

Для снижения трудоемкости и улучшения воспроизводимости процесса радиационной обработки приборов для создания рекомбинационных центров в объеме кремния использовано оригинальное решение: облучается не

Таблица 2

Напряжение, В	Ток, А	Площадь истоковой области, мм ²	Количество ячеек, тыс. шт.
1200	50	40,5	28
	75	70,1	50
	100	118	85
1800	80	110	79

пластина, а годный по статистическим параметрам кристалл скрайбированного прибора. Для этого решения были специально разработаны технологический процесс и оригинальная технологическая оснастка:

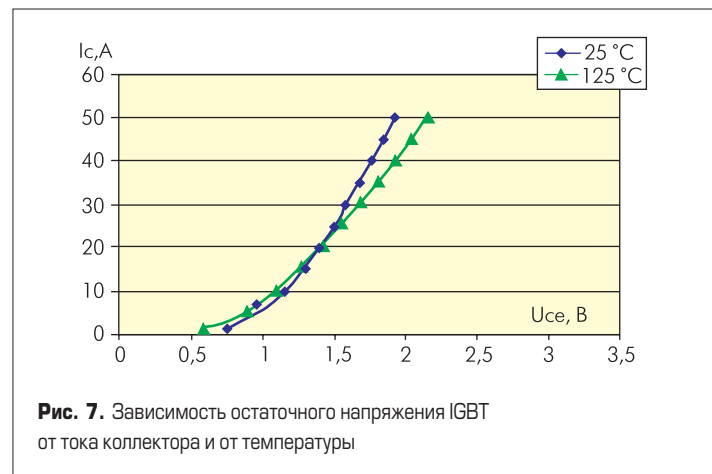
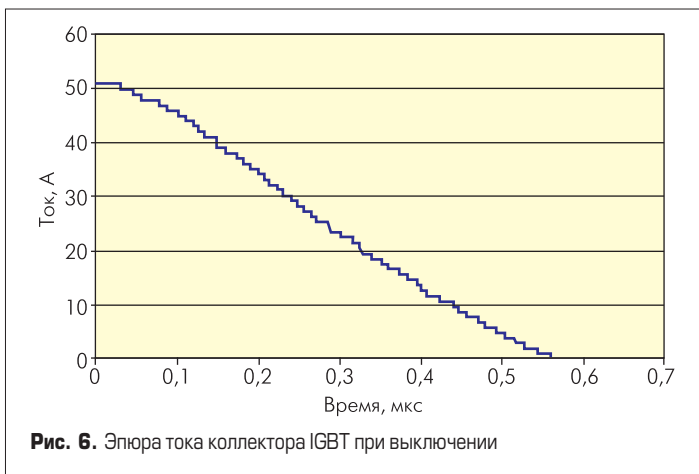
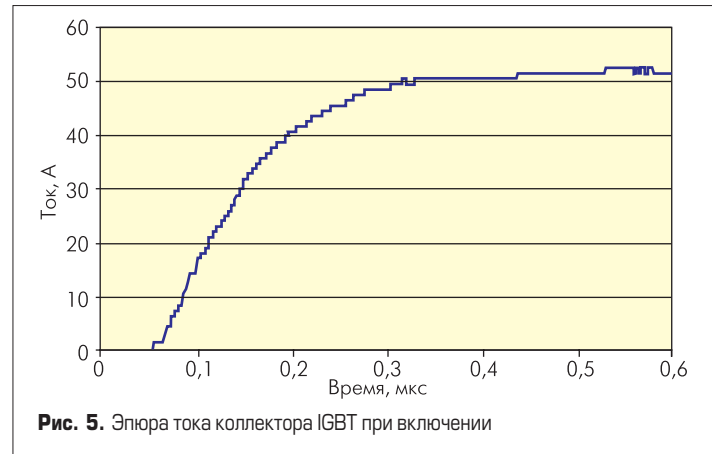
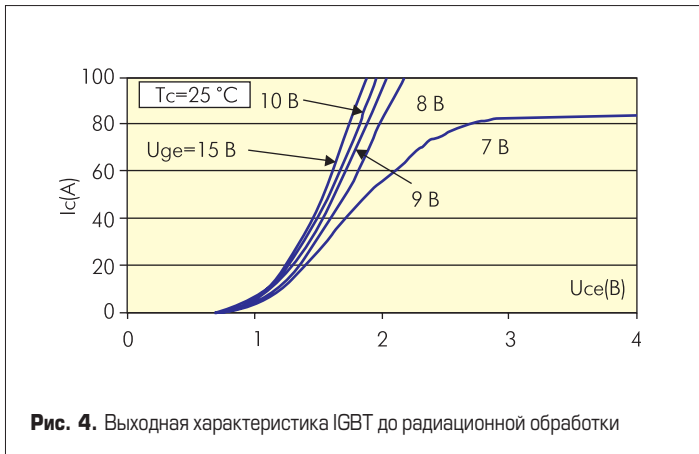
- Комплект мягких зондов с устройствами коммутации к автоматическим измерительным системам, позволяющий измерения статистических параметров с напряжением до 1200 В и токами до 150 А, а также динамических параметров.
- Транспортно-операционная тара для транспортировки и протонной обработки пучком диаметра 60 мм.

Конструктивной базой IGBT является топология многоячейковой структуры с гексагональной формой областей эмиттера и затвора, позволяющая проектировать приборы с высокой степенью интеграции — до сотен тысяч элементов на квадратный сантиметр площади кристалла. Как правило, локальные ячейки отличаются только геометрическими размерами и конфигурацией (квадратные, гексагональные и т. д.). Площадь элементарной ячейки на кристалле составляет 297 мкм², шаг 40 мкм. Площади истоковых областей транзисторов и количество ячеек на напряжение 1200 и 1800 В указаны в таблице 2.

Главное достоинство данного конструктивно-технологического варианта и технологического процесса изготовления состоит в том, что на стандартной технологической линейке (все оборудование отечественного производства) с проектными нормами 2,5–3 мкм без каких-либо модернизаций и усовершенствований была реализована «де-факто» работа с исходными пластинами высококачественного высокоомного бездефектного кремния толщиной 100–250 мкм.

На базе этих решений возможна реализация различных планарных дважды самосовмещенных ионнолегированных вариантов IGBT-ячеек с линейными размерами до 8 мкм (рекордным размером на сегодняшний момент является 6 мкм по Trench-технологии), что уже сейчас позволило достичь следующих реальных результатов:

- Уменьшено падение напряжения в открытом состоянии, на 1200-вольтовых приборах до радиационной обработки достигнуто значение 1,4 В при токах 50–75 А (см. рис. 4).
- Использование оригинальной протонной обработки позволило оптимизировать малое падение напряжения на открытом транзисторе с высокими скоростями переключения $t_{вкл} \leq 100$ нс, $t_{выкл} \leq 400$ нс (см. рис. 5 и 6).
- Реализована устойчивая работа транзисторов с положительным температурным коэффициентом во всем диапазоне рабочих температур и диапазоне токов свыше 20% номинального значения (см. рис. 7).



Большой объем экспериментальных результатов измерений и испытаний опытных образцов IGBT, изготовленных по технологии с использованием структур КНД и корпусированных в силовой модуль типа 2M435,

показывает принципиальную возможность реализации IGBT с требуемыми параметрами и характеристиками, используя при этом отнюдь не самое передовое технологическое оборудование. Исследования подтверждают

корректность выбранного конструктивно-технологического решения, высокие эксплуатационные характеристики и приемлемую технологическую воспроизводимость и стабильность.