

Чем заменить SiC-диоды Шоттки?

На вопрос, применяет ли он SiC-диоды Шоттки, разработчик аппаратуры из Чебоксар ответил неожиданно мрачно: «Горят, как спички. Использую импортные кремниевые UFRED HFA08TB120». В полемику никто не вступал, так как никто не сомневается, что широкозонные полупроводники будут доминировать и почти вытеснят кремний к 2025–2030 гг., как это произошло с германием. Но есть варианты и на переходный период, один из них предложен в данной статье.

Виктор Войтович, д. т. н.

vvoitovtsh@gmail.com

Александр Гордеев

iskragai@mv.ru

Анатолий Думаневич, к. т. н.

sport-style@inbox.ru

Резкое увеличение энергопотребления послужило толчком к развитию силовой преобразовательной техники, а также отечественной элементной базы — MOSFET, IGBT, FRED и др. По высоковольтным ДМОП и низковольтным Trench MOSFET усилиями ОАО «Ангстрем» Россия достигла зарубежного уровня, но по Trench NPT FS IGBT, а также по IGCT, UFRED, нитрид-галлиевым и карбид-кремниевым технологиям мы лишь с тоской следим за достижениями западных компаний.

Несмотря на заметные успехи ряда фирм (ЗАО «Группа «Кремний», ФГУП «НПП «Пульсар», ОАО «ВЗПП-Сборка», ЗАО «ВЗПП-Микрон» и др.) по созданию отечественных кремниевых UFRED, проблемы с их качеством и серийным выпуском остаются. Причины в свойствах исходного материала, технологических и электрофизических параметрах готовых структур UFRED, радиационных способах регулирования динамических свойств и сильно выраженной зависимости быстродействия от температурного фактора при эксплуатации.

В настоящее время на мировом рынке появилась целая гамма высокотемпературных ультрабыстровосстанавливающихся диодов (ultrafast recovery diodes) на основе GaN- и SiC-материалов, которые имеют рабочие температуры $-60...+200$ °C, и рынок данных приборов стремительно прогрессирует. Тормозящими факторами являются их стоимость, технологические сложности реализации чипов на больших площадях (до 100–200 кв. мм) и др.

Рассмотрим, насколько реальна возможность быстро и эффективно улучшить характеристики кремниевых диодов, приблизить их к 4H-SiC-диодам Шоттки и JBS-диодам или превзойти их.

Компания CLIFTON AS из Эстонии (на территории России и СНГ есть ее эксклюзивный дистрибьютор — компания «Интон», г. Ульяновск) разработала и начала промышленный выпуск серии мощных ультрабыстрых высокотемпературных GaAs *p-i-n*-диодов с параметрами:

- $V_{RRM} = 200-1200$ В;
- $I_F = 1-200$ А;
- $V_F = 1,4-2,3$ В;
- $t_{rr1} = 15-40$ нс ($jF = 10$ А/см², $di/dt = 200$ А/мкс, $V_R = 100$ В);
- $t_{rr2} = 30-80$ нс ($jF = 200$ А/см², $di/dt = 200$ А/мкс, $V_R = 200$ В);

- T_{jmax} — до 300 °C.

На рынке силовой ЭКБ это самые высокотемпературные диоды, рабочая температура которых в металлокерамических корпусах типа SMD-1, SMD-2, SHD-6 (KT-94, KT-95, KT-105), KT-106, KT-43 достигает 250–260 °C. Высокую надёжность работы на этих температурах показали опытные сборки GaAs *p-i-n*-диодов в ОАО «ОКБ «Искра» (г. Ульяновск).

Научно-технической базой, платформой для разработки и выпуска новых GaAs *p-i-n*-диодов послужили исследования, разработки и труды советских ученых и инженеров в конце 70-х — начале 80-х годов в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) и НИИ Таллиннского электротехнического института им. М.И. Калинина и др.

Арсенид галлия по сравнению с другими широкозонными полупроводниками — недорогой материал, широко используемый на российских предприятиях при выпуске СВЧ-приборов. В силовой электронике несколькими западными фирмами (IXYS, TT Electronics-Semelab и др.) выпускаются только GaAs-диоды Шоттки с рабочими напряжениями до 300 В и токами до 50–80 А на структурах прямого эпитаксиального выращивания из газовой фазы.

Технология CLIFTON использует методы эпитаксиального выращивания слоев из жидкой фазы (LPE). В настоящее время разработана базовая технология изготовления GaAs *p⁺-p-i-n-n⁺*-структур на подложках диаметром два дюйма; чипы новых UFRED GaAs *p-i-n*-диодов значительно дешевле SiC-чипов, с позиций однородности и качества структуры данная технология также предпочтительнее.

Высокие пробивные напряжения достигаются заданным профилем легирования эпитаксиальных слоев (слаболегированной базы и высокоомного катода) и технологически сформированной шириной *i*-области. Структурное совершенство кристалла, обеспечивающее высокий уровень лавинообразования, достигается выращиванием слаболегированной базовой *p-i-n*-области в одном LPE процессе, когда высоковольтный *p-i-n*-переход формируется за счет перекompенсации акцепторных примесей термо-донорными, образующимися в процессе управляемого (регулируемого) охлаждения. Контролируемая концентрация рекомбинационных центров в эпитаксиальных слоях диодной структуры позволяет достичь исключительно низких значений t_{rr} и Q_{rr} . Проводимые в настоящее время исследования

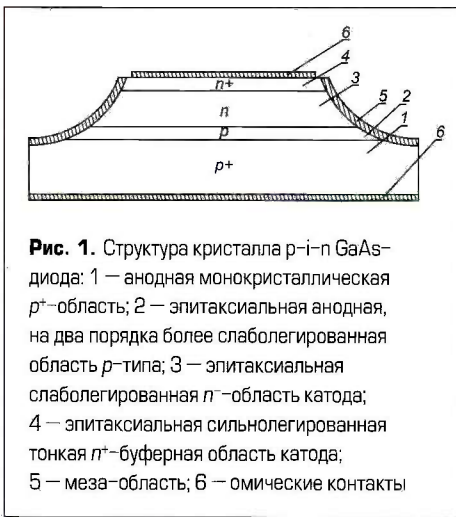


Рис. 1. Структура кристалла *p-i-n* GaAs-диода: 1 — анодная монокристаллическая *p*⁺-область; 2 — эпитаксиальная анодная, на два порядка более слаболегированная область *p*-типа; 3 — эпитаксиальная слаболегированная *n*-область катода; 4 — эпитаксиальная сильнолегированная тонкая *n*⁺-буферная область катода; 5 — меза-область; 6 — омические контакты

по радиационной обработке GaAs *p-i-n*-структур могут позволить GaAs *p-i-n*-диодам практически сравняться с SiC-диодами по быстрдействию, при этом у GaAs *p-i-n*-диодов сохраняется ряд преимуществ.

На рис. 1 приведена базовая структура кристалла GaAs *p-i-n*-диода.

Профили распределения примесей в структуре показаны на рис. 2.

Промежуточная *p*-область создана для увеличения коэффициента мягкости $S = t_f/t_s$, за счет более равномерного распределения электронно-дырочной плазмы в высокоомной катодной зоне и снижения ее градиента (профиля) неосновных носителей вблизи инжекционного перехода. Данная конструкция решает еще одну задачу, какой является динамическая устойчивость (несмотря на мягкий режим коммутации). При режиме обратного восстановления, из-за неравномерности электронно-дырочной плазмы, в силу неизбежных факторов, таких как толщина эпитаксиального слоя и время жизни неосновных носителей, через диод протекает «хвост» тока, когда в то же время приложено максимальное постоянное напряжение. Если IGBT- или MOSFET-ключ переключается резко, на диоде будут расти обратный и хвостовой ток, резкий перепад напряжения $U_{кэ}$ и $U_{си}$ приведет к большой скорости нарастания напряжения dU/dt при очень высоком dI/dt . Эта проблема заметно снижена данной конструкцией кристалла GaAs *p-i-n*-диода, что отражено на рис. 3. Минимальное значение энергии вторичного пробоя GaAs *p-i-n*-диодов в корпусах TO-220 (15 А, 600 В) составляет 20 мДж (на рис. 3 это 20.6 мДж), максимальное — достигает 60 мДж, что говорит о высокой динамической устойчивости диодов CLIFTON.

Что такое высокая рабочая температура GaAs *p-i-n*-диода (CLIFTON)?

Это:

- независимость времени восстановления t_{rr} от температуры;
- независимость и отсутствие роста Q_{rr} от температуры;
- независимость обратного пикового тока от температуры;
- независимость коэффициента «мягкости» от температуры;

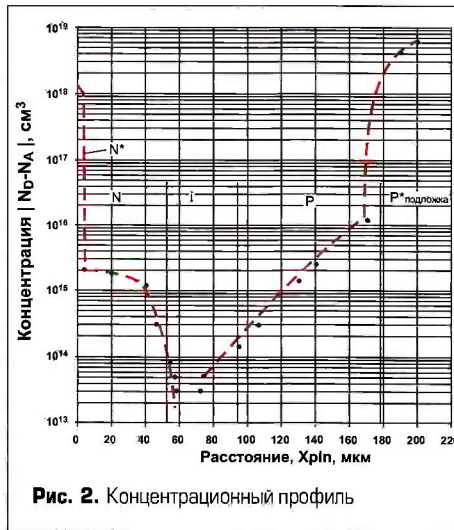


Рис. 2. Концентрационный профиль

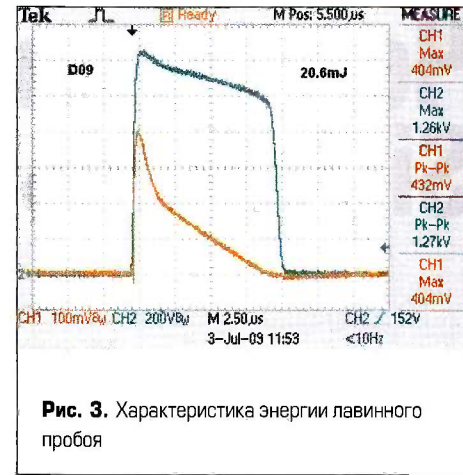


Рис. 3. Характеристика энергии лавинного пробоя

- управляемость зависимости прямого падения U_F от температуры (положительная или отрицательная), чего нет и не может быть у SiC-диода Шоттки.

Жесткая «мягкость» кремниевых UFRED и мягкая «мягкость» GaAs *p-i-n*-диодов с ростом температуры показаны на рис. 4. Лучшей антирекламы для Si UFRED нет.

По своим динамическим характеристикам восстановления и сопутствующим энергетическим потерям GaAs *p-i-n*-диоды в диапазоне до 200 °C практически не уступают SiC-диодам Шоттки, выше этой температуры — превосходят их. (Попросту

SiC-ДПП не работают при температуре выше 200 °C, они превращаются в терморезистор.)

Благодаря широкой *i*-области емкость диода значительно — в три раза (!) — меньше, чем у SiC-диода Шоттки и значительно в меньшей степени зависит от напряжения. А это — частоты. Предельная частота GaAs *p-i-n*-диодов почти на два порядка превосходит кремниевые диоды и, предположительно, в два раза (при $T = 250$ °C) превосходит частоту коммутации SiC-диодов Шоттки.

Энергия динамических потерь при $T = 25$ °C и $T = 100$ °C показана на рис. 5. Расчеты показывают возрастание потерь при переключении у SiC-диодов Шоттки при $T > 175$ °C.



Рис. 4. Температурная зависимость характеристик обратного восстановления: а) кремниевый ультрабыстрый мощный диод; б) гипербыстрый мощный GaAs-диод

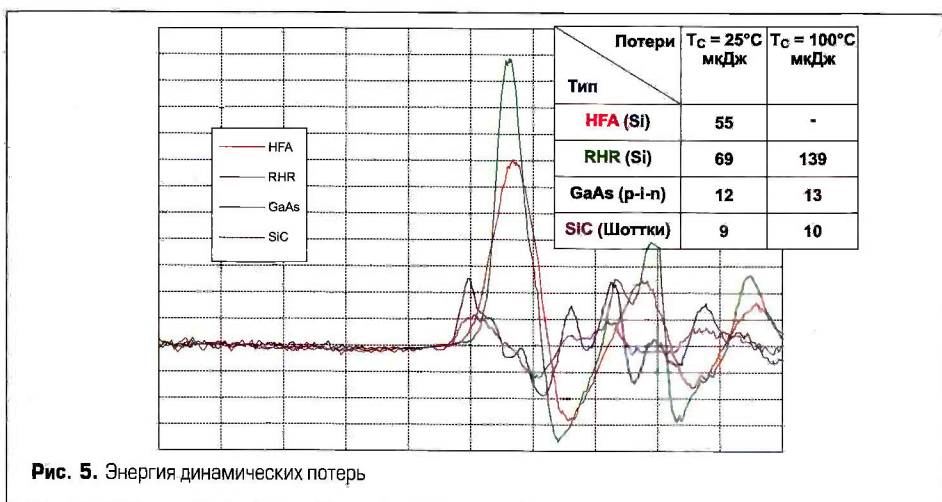
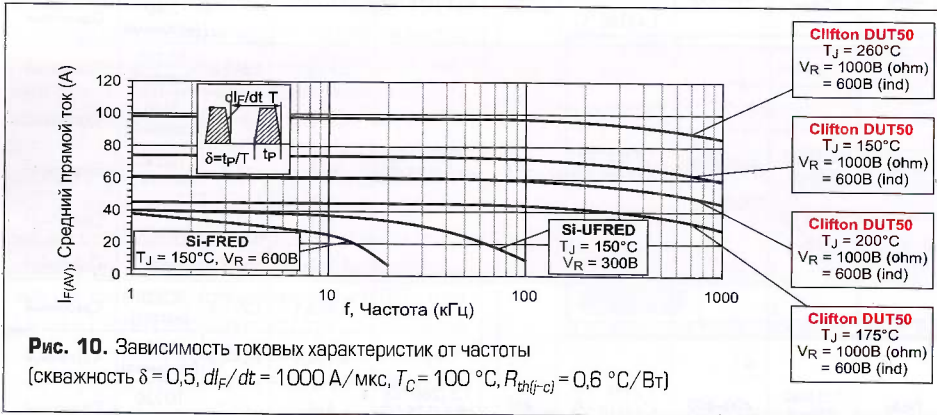


Рис. 5. Энергия динамических потерь

Таблица 3. Реальные характеристики готовых к выпуску GaAs p-i-n-диодов

Тип	U _{RRM} , В	I _F (250 °C), А	U _F (250 °C), В	τ _{rr} (250 °C), нс	T _{раб} , °C	f _{переобр.} , МГц	Спецстойкость	Корпус
UFRED-1	250	>10	1,6	≤30	-65...+250	>1,0	4Ус, 2к-7к	SMD-0,5 SMD-1 TO-254 TO-259
UFRED-2	250	>50	1,6	≤30	-65...+250	>1,0	4Ус, 2к-7к	SMD-1 SMD-2 TO-254 TO-259 (KT-97A) TO-259 (KT-105) SHD-6 (KT-106) ThinKey*
UFRED-3**	600-1200	15	1,8	≤50	-65...+250	>1,0	4Ус, 2к-7к	SMD-0,5 SMD-1 SMD-2 TO-254 TO-259 (KT-97A) TO-259 (KT-105) SHD-6 (KT-106) ThinKey*
UFRED-4	600-1200	50	1,6-2,2	≤50	-65...+250	>1,0	4Ус, 2к-7к	SMD-1 SMD-2 TO-254 TO-259 (KT-97A) TO-259 (KT-105) SHD-6 (KT-106) ThinKey*
UFRED-5	600-1200	100	1,6-2,2	≤80	-65...+250	>1,0	4Ус, 2к-7к	TO-259 (KT-105) SHD-6 (KT-106) ThinKey*
UFRED-6	1200	150	2,2	≤80	-65...+250	>1,0	4Ус±5Ус, 2к-3к по 7к	TO-259 (KT-105) SHD-6 (KT-106) ThinKey*

Примечания. UFRED легко интегрируются с MOSFET и IGBT в одном корпусе, резко повышая их частотные и энергетические характеристики.
 * Корпус для поверхностного монтажа ThinKey планируется к разработке (максимальная рабочая температура 200 °C, нулевая индуктивность, f_{переобр.} до 2 МГц).
 ** На напряжение 600-900 В поставка в течение 3 недель с момента заявки в корпусах SMD-0,5; SMD-1 или др., в том числе бескорпусное исполнение. По остальным позициям сроки поставки — 2-3 месяца.



Реальные характеристики готовых к выпуску GaAs p-i-n-диодов приведены в таблице 3.

Сравнительные динамические параметры FRED, UFRED Si-диодов и GaAs p-i-n-диодов показаны в таблицах 4, 5 и на соответствующих графиках зависимостей токовых характеристик от частоты, приведенных на рис. 10, 11.

Гибридизация (микросборка) данных диодов с чипами 2П829Б (полумостовая схема) показала устойчивость работы такого полумоста и моста на этой основе на частоте 250 кГц не хуже, чем схмотехнический и функциональный аналог АРТС80Н29SCT с SiC-диодами Шоттки. Во всяком случае, уже сейчас GaAs p-i-n-диоды — хорошее подспорье для создания новых высокоэффективных преобразователей электроэнергии (энергосберегающая программа ОАО «Российская электроника»).

Необходимо отметить, что конструкция кристалла в сочетании металлизации анодной и катодной областей по типу золото/золото позволяет выполнять монтаж кристаллов в DirectFET- или ThinKey-корпусах с достижением частот коммутации (преобразованных) до 2 МГц и выше во всем рабочем диапазоне температур, а также с хорошей возможностью прямого монтажа в гибридных мощных модулях, микросборках ВИП.

Новые возможности LPE-технологии это не только GaAs p-i-n-диодные структуры. Появляется возможность создания в течение ближайшего времени аналога IGBT-ключа на токе до 150 А, напряжении 1200 В с частотой коммутации до 300 кГц, то есть выше, чем у кремниевых IGBT, на полпорядка, с потерями энергии при переключении значительно более низкими, чем у кремниевых приборов. Конструкция данного ключа будет приведена в публикации в следующем номере журнала «СЭ».

В течение года планируются следующие разработки на основе GaAs p⁺-p-i-n-n⁺-структур:

1. Мощный GaAs p-i-n-диод с параметрами: 1200 В; 1000 А; 2,0 В; 1 МГц, 200 °C.
2. Высоковольтный столб. Параметры: 600 В; 12 кВ; 1-100 А; 50-200 нс; 200 °C.
3. В поле зрения — проработка следующих направлений: динисторы (до 300 кГц), управляемые тиристоры (до 300 кГц), эффективные

Таблица 4. Сравнительные характеристики Si-FRED, Si-UFRED и GaAs p-i-n-диодов

Параметр	Обозначение	Si-FRED Размер кристалла 7×7 мм			Si-UFRED Площадь кристалла ~45-48 мм ²			Clifton Размер кристалла 7×7 мм								
		Условия			Условия			Условия								
Максимальное обратное напряжение, В	V _{RRM}	1200			1000			1000, 1200								
Прямой ток, А	I _F	50			45			50								
Температура перехода, °C	T _J	-40...+150			-40...+150			-65...+260								
Прямое напряжение, В	V _F	I _F = 50 А	T _J = 25 °C	1,7	1,9	2,3	I _F = 45 А	T _J = 25 °C	-	1,9	2,35	I _F = 50 А	T _J = 25 °C	-	1,65	1,8
			T _J = 125 °C	-	1,9	-		T _J = 100 °C	-	1,5	-		T _J = 260 °C	-	1,7	2,1
Обратный ток утечки, А	I _R	V _R = 1200 В	T _J = 25 °C	-	-	100	V _R = 1000 В	T _J = 25 °C	-	10	250	V _R = 1200 В	T _J = 25 °C	-	150×10 ⁻⁶	300×10 ⁻⁶
			T _J = 125 °C	-	0,8	-		T _J = 150 °C	-	0,15	-		T _J = 200 °C	-	0,5×10 ⁻³	1×10 ⁻³
Ток обратного восстановления, А	I _{RRM}	-			60			-								
Заряд обратного восстановления, мкКл	Q _{RR}	-			6			-								
Время обратного восстановления, нс	t _{rr}	-			140			-								
1-й этап, нс	t ₁	-			70			-								
2-й этап, нс	t ₂	-			70			-								
Энергия потерь при переключении, мДж	E _{rec}	-			0,6			-								

Таблица 5. Сравнительные характеристики Si-FRED и GaAs p-i-n-диодов

Параметр	Обозначение	Si-FRED Размер кристалла 9×9 мм			Clifton Размер кристалла 9×9 мм						
		Условия	min	тип	max	Условия	min	тип	max		
Максимальное обратное напряжение, В	V_{RRM}	-	1200			-	1000, 1200				
Прямой ток, А	I_F	-	100			-	100				
Температура перехода, °C	T_J	-	-40...+150			-	-65...+260				
Прямое напряжение, В	V_F	$I_F = 100 \text{ A}$	$T_J = 25 \text{ °C}$	1,7	1,9	2,3	$I_F = 50 \text{ A}$	$T_J = 25 \text{ °C}$	-	1,65	1,8
			$T_J = 125 \text{ °C}$	-	1,9	-		$T_J = 25 \text{ °C}$	-	1,7	2,1
Обратный ток утечки, А	I_R	$V_R = 1200 \text{ В}$	$T_J = 25 \text{ °C}$	-	-	100	$V_R = 1200 \text{ В}$	$T_J = 25 \text{ °C}$	-	150×10^{-6}	300×10^{-6}
			$T_J = 200 \text{ °C}$	-	-	-		$T_J = 200 \text{ °C}$	-	1×10^{-3}	2×10^{-3}
			$T_J = 125 \text{ °C}$	-	1,2	-		$T_J = 260 \text{ °C}$	-	10×10^{-3}	12×10^{-3}
Ток обратного восстановления, А	I_{RRM}	$I_F = 100 \text{ A VCC} = 600 \text{ В}$ $di/dt = 1600 \text{ А/мкс}$ $L\sigma = 50 \text{ нГн}$ $T_J = 125 \text{ °C}$ Индуктивная нагрузка	-	70	-	$I_F = 100 \text{ A VCC} = 600 \text{ В}$ $di/dt = 1600 \text{ А/мкс}$ $T_J = 25-260 \text{ °C}$ Индуктивная нагрузка	-	54	-		
Заряд обратного восстановления, мкКл	Q_{RR}		-	18	-		-	1	-		
Время обратного восстановления, нс	t_{rr}		-	400	-		-	40	-		
1-й этап, нс	t_a		-	44	-		-	34	-		
2-й этап, нс	t_b		-	356	-		-	6	-		
Энергия потерь при переключении, мДж	E_{tes}		-	6,5	-		-	0,09	-		

ные фотоприемники, радиоизотопные источники питания, JFET, p-n-p-транзисторы до 400 В, >1,5 ГГц, термодатчики, детекторы гамма-нейтронного излучения и др.

У России появляется возможность вспомнить свое славное прошлое и достаточно быстро и эффективно развить данное перспективное инновационное направление в области энергосбережения. Аналогов приборов, приведенных в данной статье или планируемых к разработке, не существует.

Изложенные конструктивные, технологические, технические решения настоящей статьи являются интеллектуальной собственностью авторов статьи, фирм CLIFTON AS (г. Тарту, Эстония); «Интелсоб», «ИНТОН» (г. Ульяновск).

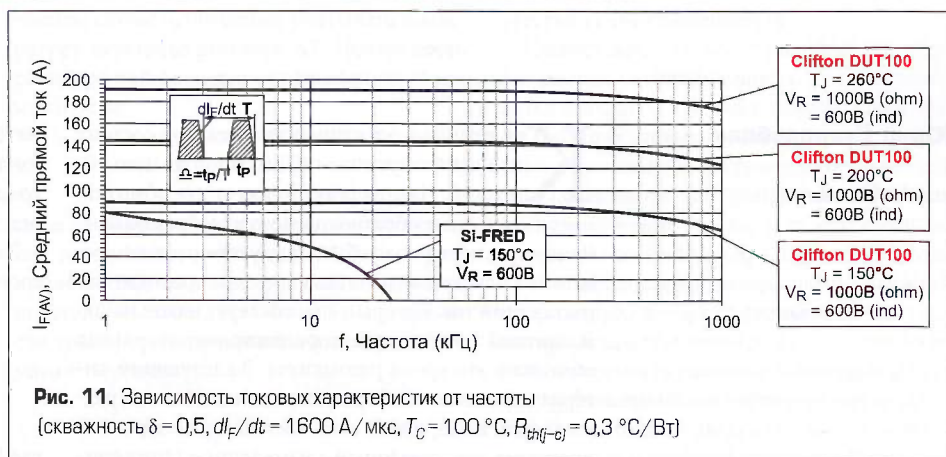


Рис. 11. Зависимость токовых характеристик от частоты (скважность $\delta = 0,5$, $di_F/dt = 1600 \text{ А/мкс}$, $T_C = 100 \text{ °C}$, $R_{\theta(j-c)} = 0,3 \text{ °C/Вт}$)

Макро Групп – официальный дистрибьютор Power Integrations на территории России и СНГ



МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

- * ШИРОКИЙ ДИАПАЗОН ВХОДНЫХ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ 85–265VAC
- * ПОЗВОЛЯЮТ СТРОИТЬ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ МОЩНОСТЬЮ ДО 300 Вт.
- * РАБОЧИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –40...+140°C
- * ТЕХНОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ECOSMART
- * ШИРОКАЯ ЛИНЕЙКА КОРПУСНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ
- * НАЛИЧИЕ БОЛЬШОГО КОЛИЧЕСТВА ВСТРОЕННЫХ ФУНКЦИЙ



Санкт-Петербург тел.: (812) 370 60 70
Москва тел.: (495) 988 02 72

Екатеринбург тел.: (343) 379 03 68
Ростов-на-Дону тел.: (863) 227 03 93

Чебоксары тел.: (8352) 42 61 03
Новосибирск тел.: (383) 233 34 87

