

# 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.

vvoitovitch@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/см<sup>2</sup>,  $di/dt = 200$  А/мкс,  $V_R = 100$  В);
- $t_{rr2} = 30-80$  нс ( $jF = 200$  А/см<sup>2</sup>,  $di/dt = 200$  А/мкс,  $V_R = 200$  В);

- $T_{jmax}$  — до 300 °C.

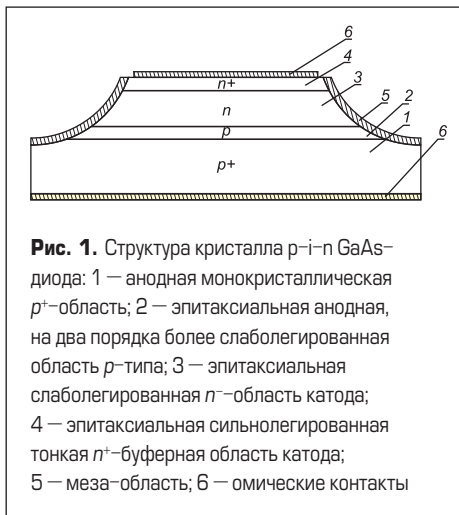
На рынке силовой ЭКБ это самые высокотемпературные диоды, рабочая температура которых в металлокерамических корпусах типа SMD-1, SMD-2, SHD-6 (КТ-94, КТ-95, КТ-105), КТ-106, КТ-43 достигает 250–260 °C. Высокую надёжность работы на этих температурах показали опытные сборки GaAs *p-i-n*-диодов в ОАО «ОКБ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



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

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

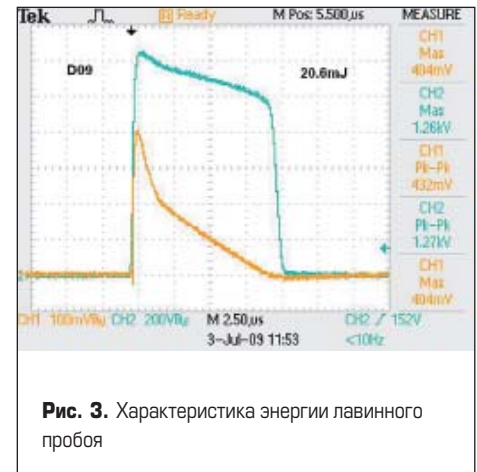
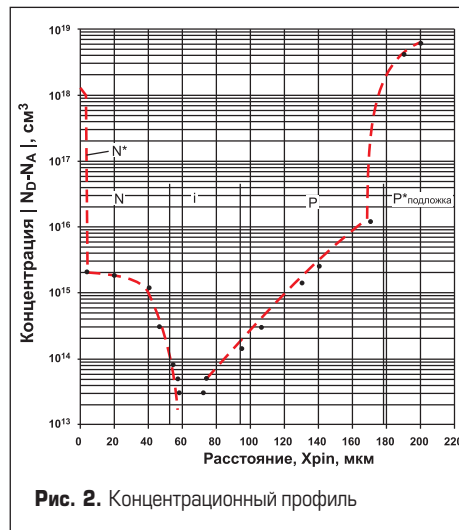
Профили распределения примесей в структуре показаны на рис. 2.

Промежуточная  $p$ -область создана для увеличения коэффициента мягкости  $S = t/t_s$  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 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;



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

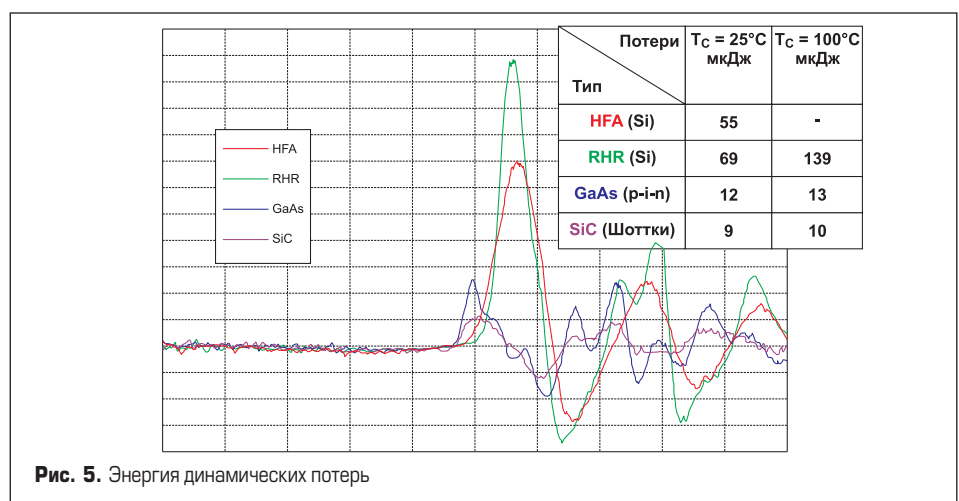
Жесткая «мягкость» кремниевых UFRED и мягкая «мягкость» GaAs  $p-i-n$ -диодов с ростом температуры показаны на рис. 4. Лучшей антирекламы для Si UFRED нет.

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

SiC-ДШ не работают при температуре выше 200 °С, 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  $T = 250$  °С) превосходит частоту коммутации SiC-диодов Шоттки.

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



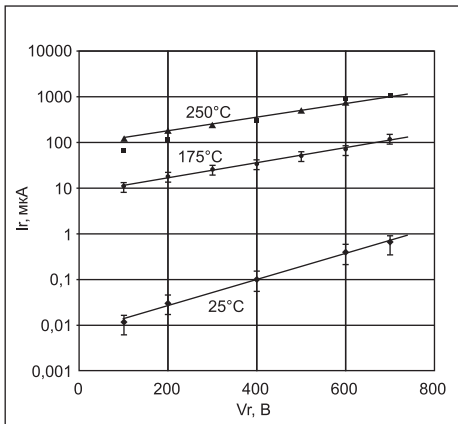


Рис. 6. Типичная обратная ВАХ при разных температурах (размер кристалла 3×3 мм)

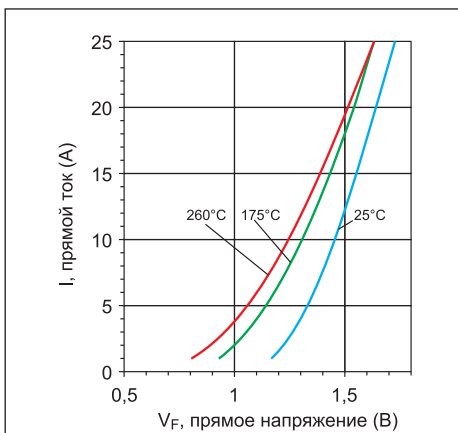


Рис. 7. Типичные прямые ВАХ ультрабыстрых GaAs-диодов (размер кристалла 3×3 мм, V<sub>RRM</sub> = 400–800 В, отрицательный температурный коэффициент V<sub>F</sub>)

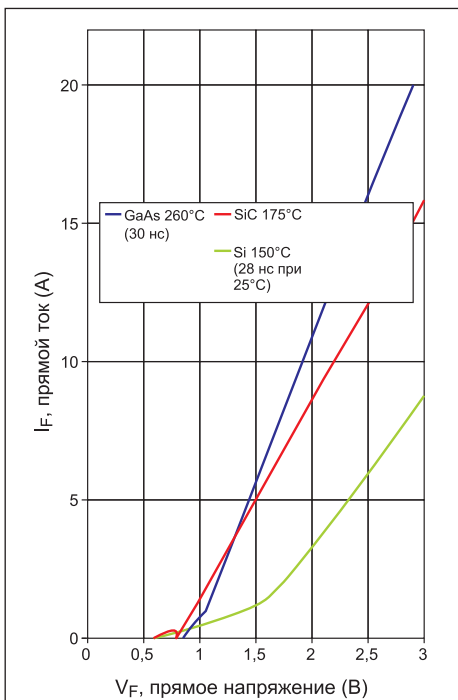


Рис. 8. Сравнительные прямые ВАХ UFRED (1200 В) – Si, SiC-ДШ и GaAs p-i-n-диодов, положительный температурный коэффициент

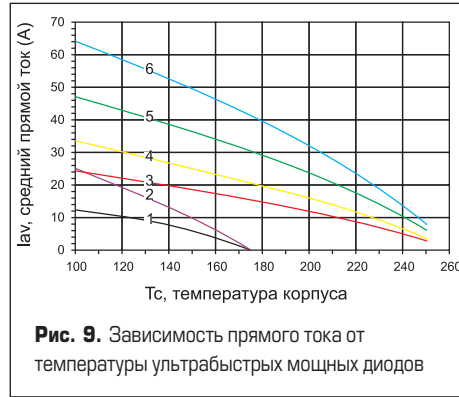


Рис. 9. Зависимость прямого тока от температуры ультрабыстрых мощных диодов

На рис. 6–8 показаны обратные и прямые вольт-амперные характеристики GaAs p-i-n-диодов в зависимости от температуры.

Необходимо отметить возможность регулировки коэффициента температурной зависимости прямой ВАХ от отрицательного (рис. 7) до положительного (рис. 8) или стабилизации его, это важно при работе с MOSFET, IGBT или при использовании в выпрямительных блоках.

Сравнение нагрузочных характеристик быстродействующих диодов на основе различных материалов приводится на рис. 9 и в таблице 1, что показывает эффективность применения GaAs p-i-n-диодов в различных преобразовательных устройствах и возможность их успешной конкуренции по плотности преобразованной энергии на единицу объема.

Сравнительные характеристики новых GaAs-диодов и SiC-диодов Шоттки приведены в таблице 2.

Таблица 1. Сравнение токовых характеристик в зависимости от температуры ультрабыстрых мощных диодов

Материал	Наименование изделия	Обратное напряжение, В	Прямое падение напряжения (max), В	T <sub>J</sub> (max), °C	I <sub>R</sub> (max), mA	Размер кристалла, мм	R <sub>th(jc)</sub> (max), °C/Вт	Корпус	Примечание
SiC	1DT08S60C (Infineon)	600	1,7 (25 °C) 2,1 (150 °C)	175	1 (150 °C)	Нет данных	2	TO-220	Одиночный
Si	8ETH06(IR)	600	2,4 (25 °C) 1,8 (150 °C)	175	0,5 (150 °C)	~3,5×3,5	2	D2PAC TO-220	Одиночный Одиночный
GaAs	DUTM15 (Clifton)	600–1200	1,9 (25 °C) 2,5 (260 °C)	260	2 (260 °C) <0,1 (175 °C)	3,1×3,1	2,4	TO220 (металл) SMD (керамика)	Одиночный Одиночный
GaAs	DULM20 (Clifton)	400–800	1,6 (25 °C) 1,4 (260 °C)	260	1,5 (260 °C) <0,1 (175 °C)	3,1×3,1	2,4	TO220 (металл) SMD (керамика)	Одиночный Одиночный
GaAs	DUTM30 (Clifton)	600–1200	1,9 (25 °C); 2,5 (260 °C)	260	2 (260 °C); <0,1 (175 °C)	3,1×3,1 3,1×3,1 5×5 5×5	1,2–1,3 1,2–1,3 ~1,2 ~1,2	TO220 (металл) SMD (керамика) TO220 (металл) SMD (керамика)	Сдвоенный Сдвоенный Одиночный Одиночный
GaAs	DULM40 (Clifton)	400–800	1,6 (25 °C); 1,4 (260 °C)	260	1,5 (260 °C); <0,1 (175 °C)	3,1×3,1 3,1×3,1 5×5 5×5 3,1×3,1	1,2–1,3 1,2–1,3 ~1,2 ~1,2 ~1,2	TO220 (металл) SMD (керамика) TO220 (металл) SMD (керамика) DirectFET	Сдвоенный Сдвоенный Одиночный Одиночный Одиночный

Таблица 2. Сравнительное сопоставление новых UFRED и SiC-диодов Шоттки (SiC-ДШ)

Наименование параметра	GaAs p-i-n-диод	SiC-ДШ	Примечание
Токи, А/чип	150	80 (Cree)	–
Максимальная допустимая рабочая температура корпуса, °C	250	200	Максимум T <sub>p-i-n</sub> GaAs = 300 °C
Значение U <sub>F</sub> при T <sub>кorp</sub> = 200 °C, В	2,0	4,0	–
τ <sub>rr</sub> при T = 200 °C при токах 10–20 А, напряжении 1200 В, нс	15–40	10–20	–
Энергия потерь при переключении E при T ≥ 200 °C	Незначительный рост	Резкий рост потерь	–
Максимальная частота коммутации в преобразователе (для I <sub>max</sub> = 20 А, U <sub>max</sub> = 1200 В, T <sub>роб</sub> = 200 °C), МГц	>2,0	>1,0*	–
Температурный коэффициент зависимости ВАХ	Положительный, отрицательный	Положительный, резко выраженный	–
Лавинная энергия вторичного пробоя, мДж	>50	Нет данных	–

Примечание. \*Предполагаемое значение.

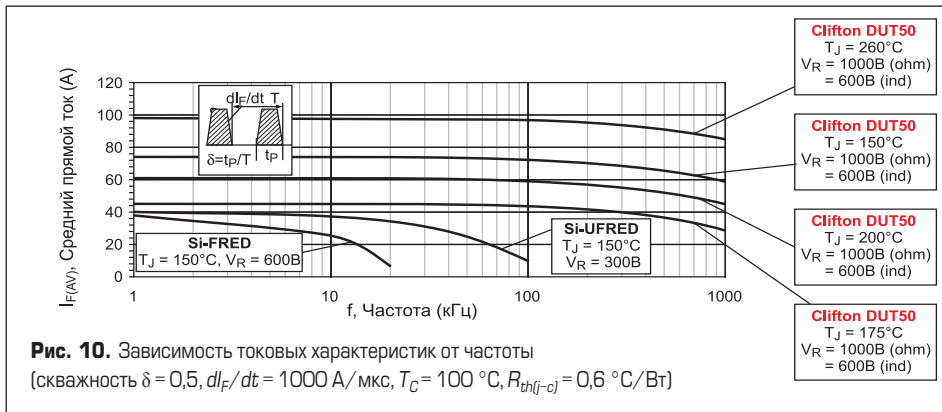
Таблица 3. Реальные характеристики готовых к выпуску GaAs p-i-n-диодов

Тип	$U_{RRM}$ , В	$I_F$ (250 °C), А	$U_F$ (250 °C), В	$\tau_{rr}$ (250 °C), нс	$T_{раб}$ , °C	$f_{пробр}$ , 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 (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 (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 (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,  $f_{пробр}$  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 металлизацией анодной и катодной областей по типу золото/золото позволяет выполнять монтаж кристаллов в DirectFET- или ThinKey-корпусах с достижением частот коммутации (преобразования) 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 токи до 150 А, напряжение 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<sup>+</sup>-p-i-n-n<sup>+</sup>-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: 6,5-12 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), эффектив-

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 <sup>2</sup>			Clifton Размер кристалла 7×7 мм								
		Условия		Значение	Условия		Значение	Условия		Значение						
			min	typ	max		min	typ	max		min	typ	max			
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
			$T_J = 25$ °C	-	-	100		$T_J = 25$ °C	-	10	250		$T_J = 25$ °C	-	$150 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$
			$T_J = 125$ °C	-	0,8	-		$T_J = 150$ °C	-	0,15	-		$T_J = 200$ °C	-	$0,5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
			$T_J = 260$ °C	-	-	-			-	-	-		$T_J = 260$ °C	-	$5 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
Обратный ток утечки, А	$I_R$	$V_R = 1200$ В					$V_R = 1000$ В					$V_R = 1200$ В				
Ток обратного восстановления, А	$I_{RRM}$				-	40	-				-	60	-			
Заряд обратного восстановления, мкКл	$Q_{RR}$				-	9	-				-	6	-			
Время обратного восстановления, нс	$t_{rr}$				-	400	-				-	140	-			
1-й этап, нс	$t_a$				-	45	-				-	70	-			
2-й этап, нс	$t_b$				-	355	-				-	70	-			
Энергия потерь при переключении, мДж	$E_{rec}$				-	3,3	-				-	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		Значения		Условия		Значения			
			min	typ	max		min	typ	max		
Максимальное обратное напряжение, В	$V_{RRM}$	-		1200		-		1000, 1200			
Прямой ток, А	$I_F$	-		100		-		100			
Температура перехода, °С	$T_J$	-		-40...+150		-		-65...+260			
Прямое напряжение, В	$V_F$	$I_F = 100$ А	$T_J = 25$ °С	1,7	1,9	2,3	$I_F = 50$ А	$T_J = 25$ °С	-	1,65	1,8
			$T_J = 125$ °С	-	1,9	-		$T_J = 260$ °С	-	1,7	2,1
Обратный ток утечки, А	$I_R$	$V_R = 1200$ В	$T_J = 25$ °С	-	-	100	$V_R = 1200$ В	$T_J = 25$ °С	-	$150 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$
			$T_J = 125$ °С	-	1,2	-		$T_J = 200$ °С	-	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
Ток обратного восстановления, А	$I_{RRM}$	-		-	70	-	-	54	-		
Заряд обратного восстановления, мкКл	$Q_{RR}$	-		-	18	-	-	1	-		
Время обратного восстановления, нс	$t_{rr}$	-		-	400	-	-	40	-		
1-й этап, нс	$t_n$	-		-	44	-	-	34	-		
2-й этап, нс	$t_b$	-		-	356	-	-	6	-		
Энергия потерь при переключении, мДж	$E_{rec}$	-		-	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).

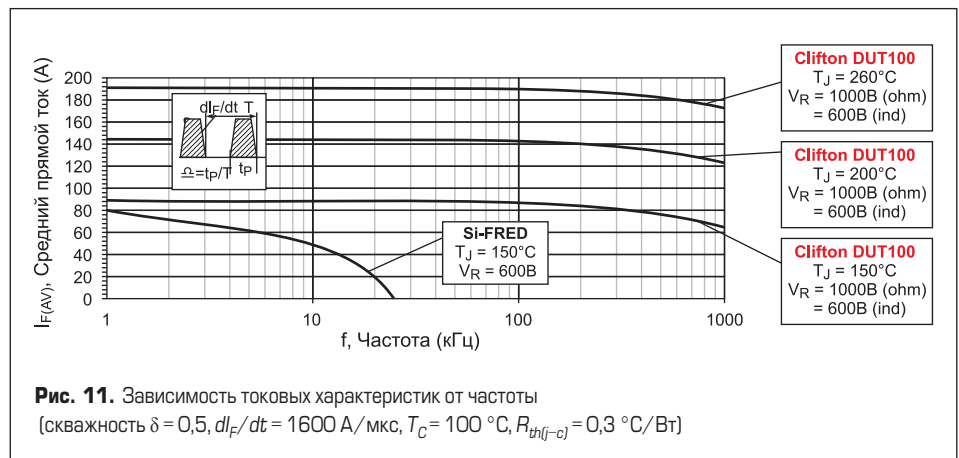


Рис. 11. Зависимость токовых характеристик от частоты (скважность  $\delta = 0,5$ ,  $dI_F/dt = 1600$  А/мкс,  $T_C = 100$  °С,  $R_{th(j-c)} = 0,3$  °С/Вт)