

Новые отечественные высоковольтные р-і-п GaAs-диоды

Виктор Войтович, д. т. н.

vvoitovitch@gmail.com

Александр Гордеев

Gordeev.iskragai@gmail.com

Анатолий Думаневич, к. т. н.

sport-style@inbox.ru

Совсем недавно в Ханты-Мансийске Президент России нажал кнопку запуска в эксплуатацию новейшей ТЭЦ, работающей на сжигаемом попутном газе. Ему отрапортовали — экономика России получит еще 2 тыс. МВт электроэнергии. Замечательно. Однако все скромно умолчали, что из данной заявленной мощности эффективно будет использовано около 600 МВт, остальное окажется бессмысленно сожжено. Почему? Потому что из каждого дошедшего до потребителя киловатта с пользой тратится не более 30–40%. Заметим, что в развитых странах эффективность использования энергетических мощностей близка сегодня к 75%. Таким образом, в России ежегодно около 80 тыс. МВт электроэнергии выбрасывается на ветер, но это же 12 Саяно-Шушенских ГЭС! Транжируется необходимого экономике важнейшего энергетического продукта ни много ни мало — на ~200 млрд руб.!

Снизить потери можно за счет активного применения преобразовательной техники, основу которой составляют мощные полупроводниковые приборы силовой электроники: диоды, тиристоры, полевые транзисторы, биполярные транзисторы с полевым управлением.

Свыше 90% от всего потребляемого в России объема силовых приборов — импорт. На отечественный рынок ввозится продукции данного вида (причем отнюдь не самой лучшей и не самой дешевой) на \$200–300 млн. Возникают вопросы: почему отечественная промышленность «спит», почему неэффективно работает «Программа импортозамещения»? В России перевелись разработчики? Нет, это вовсе не так. От советской научно-технической школы России достались в наследство очень сильные позиции в двух областях:

- полупроводниковая СВЧ-техника;
- электронная компонентная база силовой электроники.

Инновации в энергетике имеют для России исключительное значение. Но, к сожалению, пока можно констатировать, что в 2010 г. ни одно министерство или ведомство не вложило ни рубля в постановку новой НИР или ОКР, направленной на повышение энергоэффективности экономики за счет развития ЭКБ силовой электроники. Неужели не во что вкладывать? Как раз есть во что.

Одно из направлений ЭКБ силовой электроники, которыми мы занимаемся, — высоковольтные ультрабы-

Таблица 1. Параметры высокотемпературных, сверхбыстродействующих, бескорпусных и корпусных р-і-п GaAs-диодов АД683А-Д

S _A , мм	S _K , мм	P, Вт	I _F , А	I _{FSM} , А	U _F , В	U _{RRM} , В	T _J , °С	Q _{rr} *, нкул	t _{rr1} *, нс (200 °С)	t _{rr2} *, нс (200 °С)	C _J , пФ (200 В)	Корпуса	
												Пластмассовый	Металлокерамический
1,4×1,4	0,9×0,9	>3	1	10	1,6	250, 600, 800, 1000, 1200	260	50	20	30	2,4	КТ-89, КТ-90, КТ-92	КТ-47, КТ-93-1
1,7×1,7	1,2×1,2	>10	3	30	1,6–1,8		260	75	25	35	4,0		
2,2×2,2	1,7×1,7	>20	8	80	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	150	30	45	8,0	КТ-28, КТ-89, КТ-90, КТ-92	КТ-28А, КТ-93-1
3,1×3,1	2,6×2,6	>30	15	150	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	350	35	50	18	КТ-28, КТ-90	КТ-28А, КТ-93-1, КТ-97
4,8×4,8	4,3×4,3	>80	40	400	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	1000	40	60	50,0	КТ-28, КТ-90	КТ-28А, КТ-94-1, КТ-96-1, КТ-97
8,0×8,0	7,5×7,5	>100	80	800	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	3000	50	70	150,0	КТ-43	КТ-95-1, КТ-28А-2.01, КТ-43А-01, КТ-97
10,0×10,0	9,5×9,5	>120	100	1000	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	4700	60	80	240,0	КТ-43	КТ-105-1, КТ-106-1
12,5×12,5	12,0×12,0	>150	200	2000	1,8–2,0	250, 600, 800, 1000, 1200	260	7500	100	120	390,0	ТО-247	КТ-105-1, КТ-106-1

Примечание: t_{rr1} при di/dt — 200 А/мкс, I_{F1} = 0,10I_{Fmax}; 200 В; t_{rr2} при di/dt — 200А/мкс, при I_{F1} = I_{Fmax}; 200 В; *t_{rr} = const (–60...+250 °С); Q_{rr} = const (–60...+250 °С); I_{RRM} = const (–60...+250 °С)

Таблица 2. Общая сравнительная характеристика

Наименование параметра	Si	GaAs	SiC
Удельная цена (чипа), у.е.	1,0	2,5	10
Приведенное рабочее напряжение $U_{обр}$, В	1200	1200	1200
Время обратного восстановления $t_{обр.восст.}$ ($T = 150^\circ\text{C}$, 8 А/1200 В), нс	>80	≤35	≤15
Заряд обратного восстановления $Q_{обр.восст.}$ ($T = 150^\circ\text{C}$), нКл	>500	≤150	≤35
Предельная частота коммутации f_T (граничная частота), МГц	<0,4	≥2,0	<0,5
Удельная емкость, условных пФ	5	1	30
Максимальная рабочая температура перехода T_j , $^\circ\text{C}$	200	300	200

стрые переключающие диоды (ultrafast recovery diodes — UFRED) на основе LPE-технологии выращивания p-i-n-GaAs-структур. Работа ведется в тесном сотрудничестве с эстонскими коллегами из компании AS Clifton, г. Тарту. На базе практической технологии внутреннему и внешним рынкам предлагается серия UFRED высоковольтных диодов АД683А–Д в бескорпусном и корпусном исполнениях, основные статические и динамические параметры которых приведены в табл. 1. Их типы:

- АД683А–Д А-5 (бескорпусные);
- АД683А–Д (Р) в металлопластмассовых корпусах;
- АД683А–Д (С) в металлокерамических корпусах;
- АД683А–Д (К) в металлокерамических корпусах.

Качественная оценка:

- ультрабыстрое переключение;
- высокая рабочая температура;
- высокая радиационная стойкость;
- минимизированная емкость;
- малый заряд восстановления;
- сверхчастоты коммутации;
- высокая динамическая устойчивость;
- абсолютная независимость заряда восстановления, времени обратного восстановления и обратного тока восстановления от температуры.

ТУ общего применения разработаны на базе комплекса стандартов «Климат-7» и будут утверждены в апреле 2010 г.

Ниже приводятся характеристики диодов АД683А–Д в сравнении с лучшими мировыми кремниевыми UFRED и SiC-диодами Шоттки.

В табл. 2 приводится общая сравнительная характеристика Si, GaAs и SiC ультрабыстрых высоковольтных диодов на рабочие напряжения 1200 В и токи 8 А.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что нет смысла сравнивать АД683А–Д с кремниевыми UFRED даже признанных мировых лидеров (IRF — США; Microsemi — США; TT Electronics-Semelab — Великобритания). По всем компонентам (кроме цены) подавляющее превосходство за АД683А–Д, что дополнительно подтверждается графиками (рис. 1, 2).

Здесь уместно отметить, что в западных каталогах значения t_{rr} , Q_{rr} и I_{RRM} приводятся, как правило, для малых токов и при $T = 25^\circ\text{C}$. С этими данными надо быть повнимательнее. Рабочие режимы и рабочие температуры никогда не были тепличными, поэтому если для суперскоростного высоковольтного диода какой-нибудь известной мировой фирмы приводится $t_{rr} \leq 28$ нс при $T = 25^\circ\text{C}$, то фактически это означает, что t_{rr} на рабочих токах и при рабочей температуре эксплуатации будет 100–120 нс.

GaAs-диоды Шоттки компаний IXYS, TT Electronics-Semelab имеют допустимые токи не более 50 А, напряжения 300 В и не рассматриваются как конкуренты.

С карбид-кремниевыми диодами сравнительная оценка посложнее. Всех подкупают значения t_{rr} и Q_{rr} . Да, они великолепны: t_{rr} , как правило, не превосходит 15 нс. Но и в этой семье «не без уродов».

1. Диодная структура на высокой частоте — это эквивалентная комплексная L-R-C цепочка, где L — индуктивность высокоомного эпитак-

сиального *n*-слоя, R — сопротивление высокоомного слоя, C — барьерная емкость перехода. SiC-диод Шоттки — это «глухой» вариант с начальной емкостью, как правило, в несколько сотен или более одной тысячи пикофарад. Этим параметром и определяется его предельная частота коммутации. На перезарядку этой емкости в цепи затвора транзистора тратится много энергии. Частоты коммутации свыше 500 кГц — «мертвая зона» для SiC-ДПП. Это отражено в статье компании IXYS, впервые опубликованной в 2005 г. на Конференции PCIM в Германии, в каталоге компании Microsemi за 2009 г. и в работах [1, 2].

2. SiC-диоды Шоттки имеют разумный потолок рабочей температуры $T_j \leq 200^\circ\text{C}$. Прямое падение напряжения у SiC-ДПП при $T \geq 200^\circ\text{C}$ возрастает в два раза по сравнению с $T = 25^\circ\text{C}$. Потери при высоких частотах резко увеличиваются.

3. Поверхность MOCVD эпитаксиального *n*-типа слоя 4H-SiC — это не 2–10 атомных слоев после молекулярно-лучевой эпитаксии, а «шведская» дорожка, рельеф с перепадом в десятки–сотни атомов, с дефектами упаковки. На этот слой для создания барьера Шоттки осаждается металл, вектора инжекции носителей из которого в приборьерном слое имеют случайные направления. Возникают приповерхностные сверхмикрорельефы по насыщению носителями слою, а это энергетическая составляющая включения/выключения или коммутации диодного ключа. При коммутационном резонансе dU/dt и dl/dt , когда рабочая температура сосредоточена в приповерхностном, приборьерном слое, в нем можно твердо ожидать нестабильности *p-n*-перехода Шоттки.

Кристаллическая структура АД683А–Д является эпитаксиальной с залеганием *p-n*-перехода глубоко в объеме. Уникальность характеристик АД683А–Д обеспечивается созданием достаточно толстого *i*-слоя с проводимостью, близкой к собственной. Данный *i*-слой играет одну из ключевых ролей в p-i-n-GaAs-структуре:

- обеспечивает бездефектный пьедестал для эпитаксии высокоомного *n*-базы;

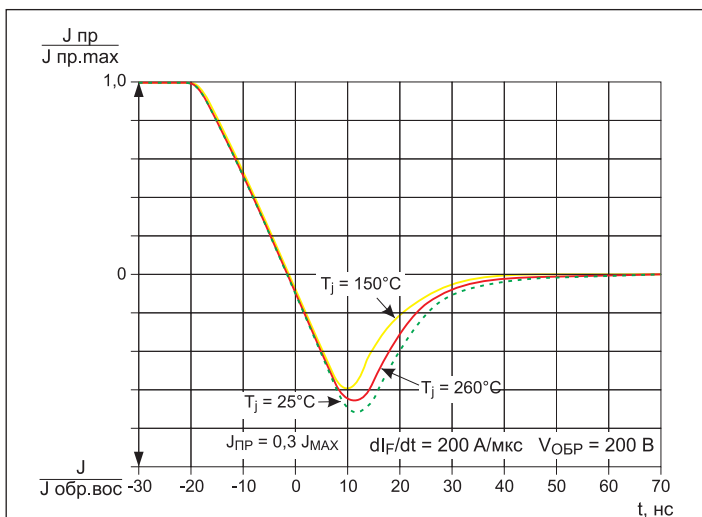


Рис. 1. Типовая зависимость тока обратного восстановления от температуры и уровня прямого тока

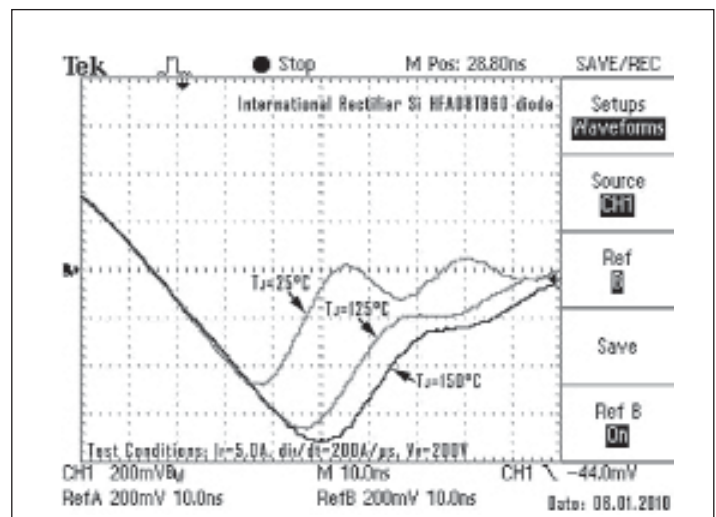


Рис. 2. Типовая зависимость тока обратного восстановления от температуры кремниевых UFRED HFA08TB60

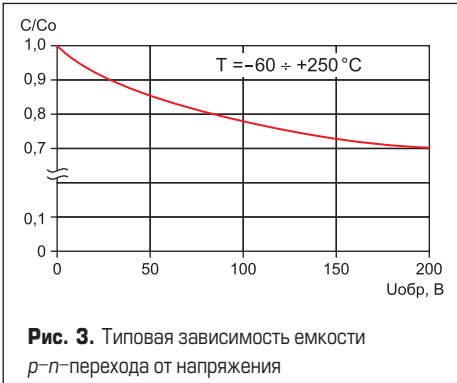


Рис. 3. Типовая зависимость емкости p - n -перехода от напряжения

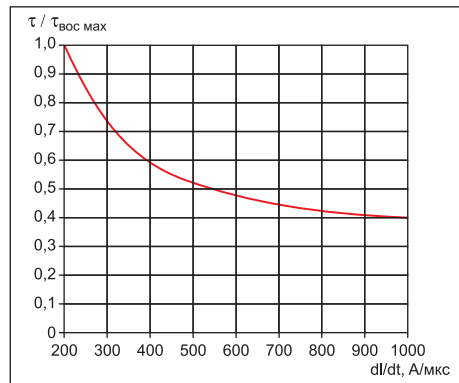


Рис. 5. Типовая зависимость времени восстановления от dl/dt (при $I < I_{пр, max}$)

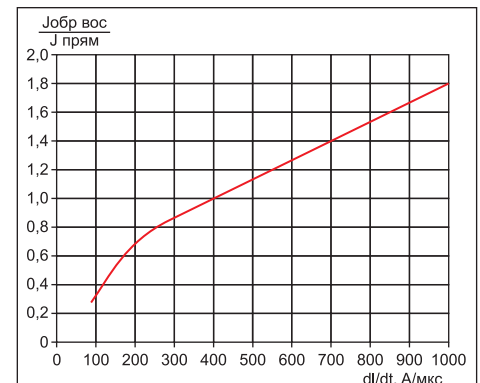


Рис. 7. Зависимость тока обратного восстановления от dl/dt ($T_{корп} = -60... +250$ °C)

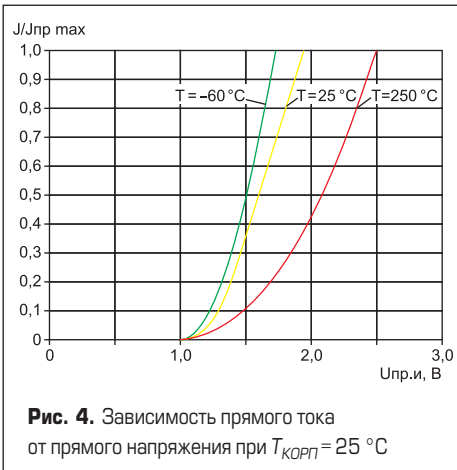


Рис. 4. Зависимость прямого тока от прямого напряжения при $T_{корп} = 25$ °C

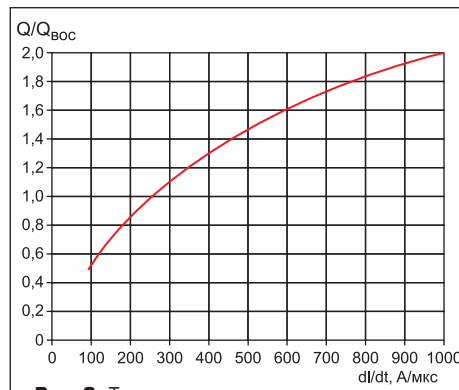


Рис. 6. Типовая зависимость заряда восстановления от dl/dt (при $I \leq I_{пр, max}$)

- резко снижает барьерную емкость p - n -перехода (рис. 3);
- на нем сосредоточено до 70% напряженности электрического поля;
- это своеобразный встроенный тепловой радиатор p - n -перехода.

Отсюда вытекают очевидные преимущества АД683А-Д перед SiC-диодами Шоттки, не говоря уже о цене. На рис. 4 показана зависимость прямого падения напряжения вольт-амперной характеристики от температуры. Но при необходимости можно «заморозить» зависимость ВАХ от температуры и даже сделать ее отрицательной, как у необлученных кремниевых диодов.

На рис. 5–7 приведены зависимости времени обратного восстановления, заряда обратного восстановления и тока обратного восстановления от dl/dt во всем диапазоне температур.

На рис. 8, 9 приведены частотные свойства АД683А-Д в «заповедной зоне» для Si и SiC UFRED. Они показывают, что «соловьиная песня» SiC-диодов Шоттки в ВЧ ВИП, в том числе для АФАР, спета. А использовать SiC-диоды Шоттки в мощных преобразователях частотно-регулируемого электропривода —

детская фантазия. Эти мощные, «платиновые» с точки зрения стоимости преобразователи оставим рекламодателям.

И, наконец, температурные характеристики. Кроме рис. 1, они продемонстрированы на рис. 10–12. Иллюстрации в комментариях не нужны.

В течение 2010 г. планируется проведение дополнительных конструктивно-технологических работ по усилению характеристик p - i - n -GaAs-диодных структур:

- С целью улучшения параметров, точнее, для резкого снижения значений времени обратного восстановления t_{rr} , заряда обратного восстановления Q_{rr} , тока обратного восстановления I_{RRM} запланированы экспериментальные работы по легированию кристаллической решетки p - i - n -GaAs-структуры высокоэнергетичными электронами и протонами без ухудшения минимальных значений емкости p - n -перехода и прямого падения напряжения.
- В катодной области p - i - n -структуры планируется создание CVD методом n^+ -гетерообласти AlGaAs, что позволит снизить значение прямого падения напряжения на 0,2–0,3 В и приблизить его значения к кремниевым диффузионным диодам.

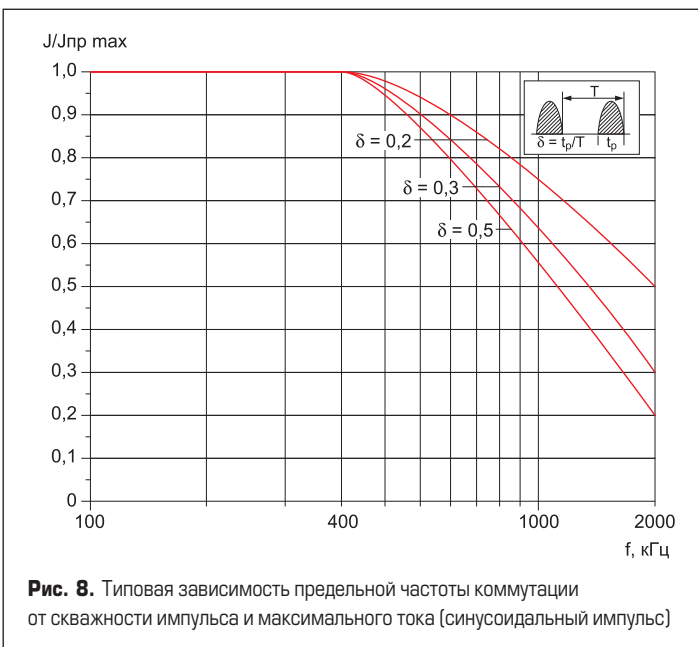


Рис. 8. Типовая зависимость предельной частоты коммутации от скважности импульса и максимального тока (синусоидальный импульс)

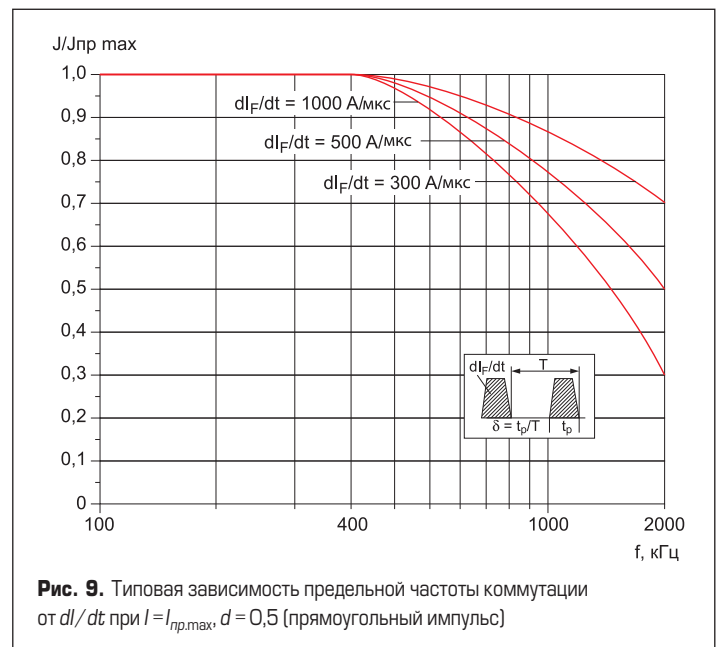


Рис. 9. Типовая зависимость предельной частоты коммутации от dl/dt при $I = I_{пр, max}$, $d = 0,5$ (прямоугольный импульс)

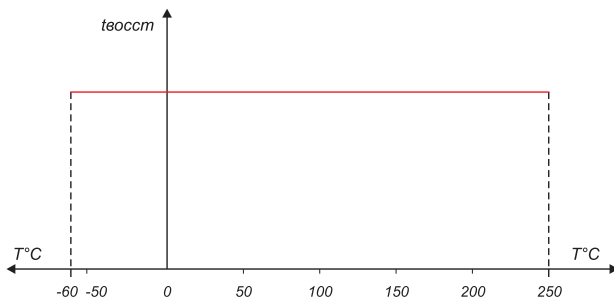


Рис. 10. Зависимость времени восстановления от температуры корпуса

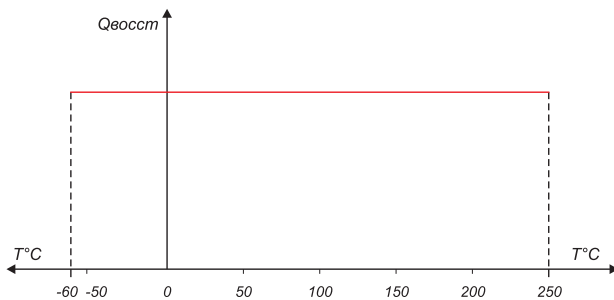


Рис. 11. Зависимость заряда восстановления от температуры корпуса

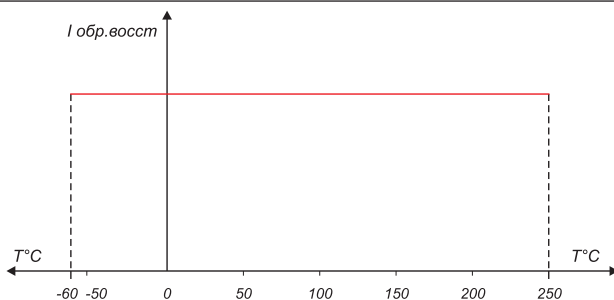


Рис. 12. Зависимость тока обратного восстановления от температуры корпуса

Проведение указанных работ позволит практически приблизить значения t_{rr} , Q_{rr} , I_{RRM} р-і-n-GaAs-диодных структур к значениям тех же параметров SiC-диодов Шоттки, но при этом сохранится огромное преимущество по емкостным характеристикам. Конечным итогом должно быть перекрытие зоны частотной коммутации р-і-n GaAs-диодов до зоны свойств системы GaN, AlGaN/GaN.

Необходимо отметить также, что технологической подготовкой производства р-і-n-GaAs-кристаллов на основе LPE «сэндвич»-структур в настоящее время активно занимается ОАО «Протон», г. Орел (Меньшов В. В.), а также неподдельный интерес к этой теме проявляет ОАО «Орбита», г. Саранск (Гармашов А. В.). Мы искренне благодарны генеральным директорам указанных предприятий за партнерство.

В заключение следует подчеркнуть, что мировой рынок кремниевых быстродействующих диодов оценивается более чем в \$4 млрд, а SiC-диодов Шоттки — в \$0,2 млрд. Рынок есть, но предстоит еще много поработать, чтобы добиться признания и занять достойное место на нем.

Литература

1. Полянский И. Новые GaAs-диоды для корректора коэффициента мощности компании IXYS // Силовая электроника. 2005. № 2
2. Steinhoff S., Reddig M., Knigge S. A new generation of 600V GaAs Schottky diodes for high power density PFC applications. www.ixyspower.com.

Конструктивно-технологические решения исполнения р-і-n GaAs-диодов запатентованы авторами статьи. По поводу поставок диодов АД683А-Д обращаться: E-mail: Gordeev.iskragai@gmail.com