

Высоковольтные диоды Шоттки

из карбида кремния в источниках электропитания с преобразованием частоты

Полевые транзисторы, диоды и другие электронные приборы на основе карбида кремния обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными кремниевыми приборами. Среди них — возможность работы при температурах до 600 °С, высокое быстродействие и высокая радиационная стойкость.

Александр Полищук

a.polishuk@terraelectronica.ru

Тенденция последних лет к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры предъявляет жесткие требования к вторичным источникам электропитания (ИВЭП) в части увеличения их удельной мощности без потерь функциональных возможностей. Это в свою очередь требует повышения эффективности ИВЭП, снижения тепловой нагрузки элементов при одновременном уменьшении объема, увеличении частоты преобразования, снижения электромагнитных и радиопомех. Для достижения указанных целей помимо новых схемотехнических решений, снижающих потери в ИВЭП, требуется улучшать и характеристики силовых полупроводниковых приборов.

Как известно, существенный вклад в потери в источниках электропитания с преобразованием частоты вносит эффект обратного восстановления мощных высоковольтных диодов. В первую очередь это касается активных корректоров коэффициента мощности (ККМ), снабберных диодов инверторов с прямоугольной формой тока, в том числе и антипараллельных диодов мощных MOSFET и IGBT, выпрямителей с выходным напряжением более 100 В и частотой выше 100 кГц. Большие токи при обратном восстановлении диодов также являются причиной возникновения радиопомех, что требует применения экранов, увеличивающих массу и габариты устройства. Появление диодов с ультрабыстрым восстановлением, таких, как HEXFRED™, позволило

Введение

лишь частично решить указанные проблемы. Практически кардинально решить проблемы обратного восстановления позволяет использование диодов на основе карбида кремния (SiC). Полевые транзисторы, диоды и другие электронные приборы на основе карбида кремния обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными кремниевыми приборами. Среди них — возможность работы при температурах до 600 °С, высокое быстродействие и высокая радиационная стойкость. Электронные приборы на основе SiC, включая в перспективе и интегральные схемы, найдут самое широкое применение в научном и коммерческом применении на Земле и в космосе [1].

Свойства и характеристики SiC

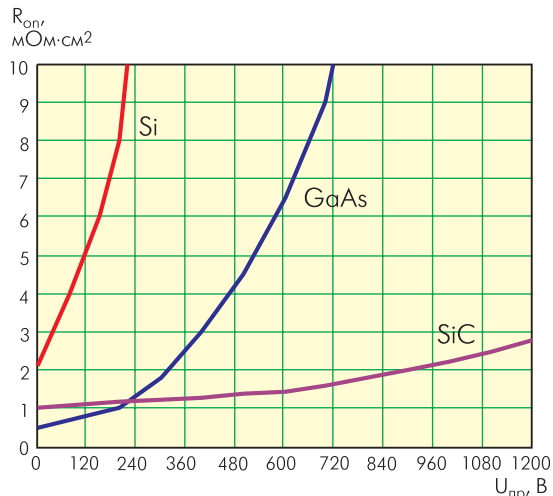
Хотя существует около 170 известных политипов карбида кремния, только два из них доступны для серийного изготовления полупроводниковых приборов — это 4H-SiC и 6H-SiC. Для большинства полупроводниковых приборов предпочтительным является политип 4H-SiC благодаря большей подвижности электронов. В таблице 1 приводится сравнение основных электронных свойств 4H-SiC с кремниевыми (Si) и арсенидгалиевыми (GaAs) полупроводниковыми материалами [2].

Основные преимущества 4H-SiC в сравнении с Si и GaAs:

1. Напряженность электрического поля пробоя 4H-SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии R_{on} . На рис. 1 показана зависимость R_{on} от напряжения пробоя кристалла. Можно видеть, что при напряжении 600 В SiC-диод имеет $R_{on} \approx 1,4 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, GaAs-диод — $R_{on} \approx 6,5 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, Si-диод — $R_{on} \approx 70 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$. Малое сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

Таблица 1

Наименование параметра	Si	GaAs	4H-SiC
Ширина запрещенной энергетической зоны, эВ	1,12	1,5	3,26
Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$	1400	9200	800
Подвижность дырок, $\text{см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$	450	400	140
Концентрация собственных носителей, см^{-3} при 300К	$1,5\cdot 10^{10}$	$2,1\cdot 10^6$	$5\cdot 10^{-9}$
Скорость объемного заряда электронов, $\text{см}/\text{с}\cdot 10^7$	1	1	2
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	0,25	0,3	2,2
Теплопроводность, Вт/см·К	1,5	0,5	3,0–3,8

Рис. 1. Зависимость $R_{он}$ от пробивного напряжения

2. Большая ширина запрещенной энергетической зоны является результатом более высокого барьера Шоттки по сравнению с Si и GaAs. В результате чрезвычайно малый ток утечки (менее 70 мкА при 200 °C) при повышенной температуре кристалла снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера.
3. Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (почти в два раза по сравнению с Si-диодами).

Характеристики SiC-диодов

На рис. 2 показана типовая зависимость прямого падения напряжения от тока при различных температурах Si- и SiC-диодов. Поскольку с ростом температуры у карбида кремния снижается подвижность электронов и повышается сопротивление в открытом состоянии, прямое падение напряжения, в отличие от кремниевых диодов, имеет положительный температурный коэффициент.

При $T_j = 25\text{ °C}$ прямое падение у карбид-кремниевых диодов ниже, чем у кремниевых. С повышением температуры до $T_j = 50\text{...}70\text{ °C}$ величины падений напряжения при характеристическом токе становятся приблизительно

но одинаковыми. Однако положительный температурный коэффициент имеет важное достоинство: появляется возможность параллельного включения любого количества кристаллов без дополнительных мер по выравниванию токов. С учетом малых по сравнению с кремниевыми диодами размеров кристаллов SiC-диодов возможно изготовление мощных высоковольтных сборок в малогабаритных корпусах.

В отличие от *pn*-диодов, выключение *pin*-диодов Шоттки не сопровождается процессом рассасывания заряда в области *n* и ток обратного восстановления отсутствует. Существует лишь незначительный ток заряда емкости перехода. Поэтому по аналогии с зарядом обратного восстановления Q_{rr} *pn*-диодов вводят понятие емкостного заряда Q_c *pin*-диодов Шоттки. На рис. 3 показаны зависимости зарядов Q_{rr} и Q_c от скорости спада тока через диод.

Можно видеть, что величина емкостного заряда практически не зависит от di/dt , в то время как заряд обратного восстановления увеличивается, и, соответственно, растут потери на высоких частотах.

На рис. 4 показаны осциллограммы токов, протекающих через SiC- и Si-диоды при их выключении.

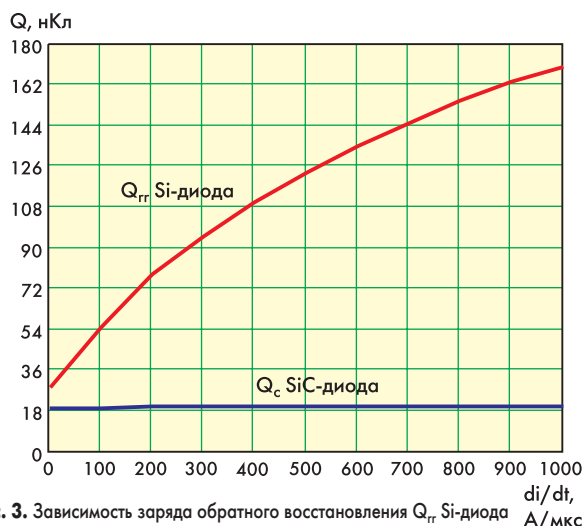
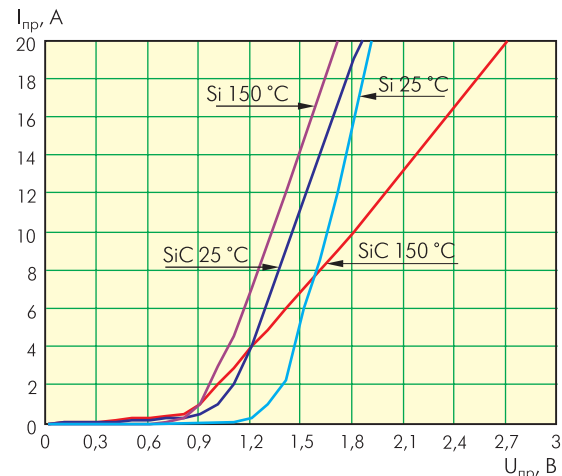
Рис. 3. Зависимость заряда обратного восстановления Q_{rr} Si-диода и емкостного заряда Q_c SiC-диода от di/dt 

Рис. 2. Зависимость прямого падения напряжения от прямого тока при различных температурах

Ток через SiC-диод Шоттки имеет характер слабого переходного процесса, амплитуда которого не зависит от температуры, в то время как у ультрабыстрого *pn*-диода наблюдается ярко выраженный эффект обратного восстановления, причем амплитуда тока и временной интервал его протекания имеют существенную температурную зависимость.

Производство SiC-кристаллов и приборов на их основе

Большинство важных электрических характеристик карбида кремния были известны давно. На заре развития полупроводниковой электроники SiC рассматривался в качестве материала для изготовления транзисторов раньше, чем кремний и германий. Однако не было технологических возможностей получения требуемого качества, размеров и необходимых количеств кристаллов для массового производства полупроводниковых приборов. Большинство монокристаллов полупроводниковых материалов производят по методу Чохральского путем расплава поликристаллического сырья с последующей кристаллизацией в монокристалл больших размеров. Но поскольку для получения карбида кремния требовалось высокое давление, традиционные

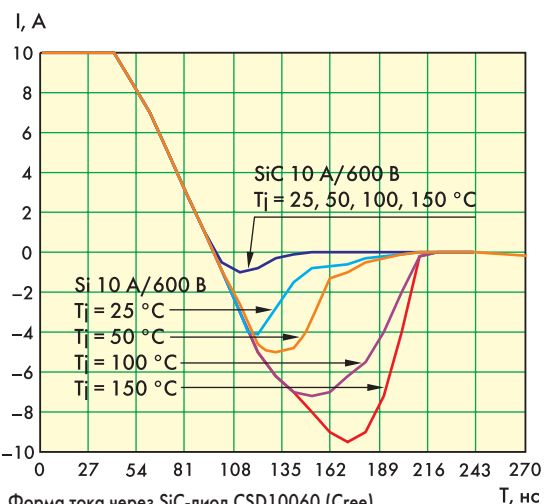


Рис. 4. Форма тока через SiC-диод CSD10060 (Cree) и Si-FRED-диод DSEI12-06A (IXYS)

Таблица 2. Высоковольтные диоды Шоттки производства Cree Inc.

Наименование	CSD04060A CSD04060D CSD04060E	CSD06060A CSD06060D CSD06060G	CSD10060A CSD10060D CSD10060E	CSD20060D	CSD05120A	CSD10120A CSD10120D	CSD20120D
$U_{макс}$, В	600	600	600	600	1200	1200	1200
$I_{пост}$, А	4	6	10	20	5	10	20
Типы корпусов	TO220-2	TO252 TO220-2 TO220-3	TO263 TO220-2 TO220-3	TO247-3	TO220-2	TO220-2 TO247-3	TO247-3

технологии были не применимы. Это не позволяло использовать карбид кремния для массового производства полупроводников, и его вытеснили кремний и германий [3].

Интерес к развитию производства приборов на основе SiC возобновился в начале 80-х годов XX века, развивались новые технологии производства монокристаллов, и в 1989 году компания Cree Research разработала технологию и представила первый в мире доступный для коммерческого использования монокристалл диаметром 2,5 см.

В настоящее время компания Cree Inc. является одним из лидеров в производстве кристаллов карбида кремния для компонентов силовой электроники, светодиодов с длиной волны излучения 250...280 нм, ВЧ- и СВЧ-транзисторов. Номенклатура высоковольтных (600–1200 В) диодов Шоттки ZERO RECOVERY™ производства Cree Inc. приведена в таблице 2.

Применение SiC-диодов Шоттки в активных корректорах коэффициента мощности

Одним из основных компонентов, определяющих массогабаритные показатели корректоров коэффициента мощности (ККМ), является дроссель бустерного преобразователя. Уменьшение его размеров возможно за счет повышения частоты преобразования, однако это неизбежно приводит к росту динамических потерь в ключевом транзисторе и бустерном диоде, а также требует увеличения размеров теплоотвода.

Рассмотрим потери в двух основных схемах мощных ККМ — классической (рис. 5) и с мягким переключением транзистора и бустерного диода (рис. 6).

Среднеквадратичное значение тока, протекающего через ключевой транзистор в схеме рис. 5 [4]:

$$I_{sw} = I_{in} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4V_{in}}{3\pi V_0}}, \quad (1)$$

где V_{in} — амплитуда сетевого напряжения, V_0 — выходное напряжение,

$I_{in} = \frac{\sqrt{2}P_{0max}}{\eta V_{inmin}}$ — пиковый входной ток,

P_{0max} — максимальная мощность нагрузки, η — КПД преобразователя. Среднеквадратичное значение тока, протекающего через диод VD1:

$$I_d = 2I_{in} \sqrt{\frac{V_{in}}{3\pi V_0}} \quad (2)$$

Величина индуктивности L:

$$L = \frac{V_{inmin} D_{max}}{f_s \Delta i}, \quad (3)$$

где f_s — частота преобразования, Δi — амплитуда пульсаций тока дросселя (обычно принимают $\Delta i = 0,2I_{in}$), D_{max} — максимальный рабочий цикл:

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{inmin}}{V_0} \quad (4)$$

Потери проводимости в полупроводниковых компонентах преобразователя (без учета входного выпрямителя):

$$P_c = I_{sw}^2 R_{ds} + I_d U_F, \quad (5)$$

где U_F — прямое падение напряжения на диоде.

Динамические потери при использовании в качестве VD1 Si-диода:

$$P_{sw} = \frac{1}{2} I_{sw} V_0 f_s (t_f + t_r) + \frac{1}{2} I_{rr} V_0 f_s t_{rr} + \frac{1}{2} C_{22} V_0^2 f_s + \frac{1}{2} I_d V_0 f_s t_{rr}, \quad (6)$$

где I_{rr} — ток обратного восстановления диода, C_{22} — выходная емкость транзистора, t_f , t_r — время спада и нарастания тока через транзистор и время обратного восстановления диода соответственно. Величина I_{rr} зависит от скорости изменения тока через диод di/dt и приводится в справочных данных производителя на конкретное изделие. Величина di/dt определяется скоростью включения транзистора:

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_d}{t_r} \quad (7)$$

Снизить di/dt можно путем затягивания времени нарастания t_r , но это приведет к росту потерь включения.

Динамические потери в схеме рис. 5 при использовании в качестве VD1 SiC-диода составляют

$$P_{sw} = \frac{1}{2} I_{sw} V_0 f_s (t_f + t_r) + \frac{1}{2} C_{22} V_0^2 f_s + \frac{1}{2} C_d V_0^2 f_s, \quad (8)$$

где C_d — емкость обратно смещенного диода.

Рассмотрим потери в схеме рис. 6. Работа данной схемы подробно рассмотрена в соответствующем отчете [5], отметим лишь одну ее особенность. В момент времени, когда транзистор VT1 открылся, а VT2 закрылся, ток через дроссель L2 достигает нулевого значения. Но поскольку диод VD3 находится в проводящем состоянии в течение времени обратного восстановления, этот ток меняет направление, и в дросселе запасается энергия

$$E_r = \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{L_2} t_{rr} \right]^2 L_2 \quad (9)$$

После запираания диода возникает переходной процесс с амплитудой около $2V_0$ отрицательной полярности. Это приводит к трехкратному перенапряжению на VD3. Для устранения выбросов применяют одну из снаберных цепей — либо последовательную VD4-R_{сн}, как показано на рис. 6, либо последовательно с L2 включают насыщающийся дроссель. В последнем случае в сердечнике дросселя выделяется значительная мощность, что заставляет либо отводить от него тепло, либо использовать сердечник больших размеров. Указанные потери в снаберной цепи также необходимо учитывать.

Расчет параметров цепи «мягкого переключения» приведен в [5]. Величина индуктивности L2:

$$L_2 = \frac{V_0}{I_{in}} t_n, \quad (10)$$

где t_n — время нарастания тока дросселя (обычно выбирается из соотношения $t_n = 3t_{rr(VD1)}$).

Пиковый ток дросселя:

$$I_{L2} = I_{in} + V_0 \sqrt{\frac{C_{22}}{L_2}} \quad (11)$$

Время открытого состояния транзистора VT2:

$$t_{on} = \frac{I_{in} L_2}{V_0} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_2 C_{22}} \quad (12)$$

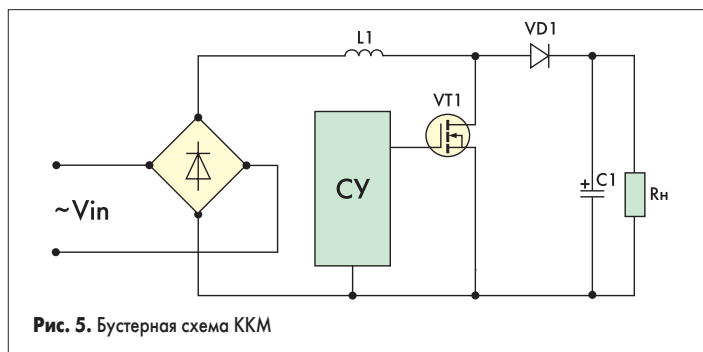


Рис. 5. Бустерная схема ККМ

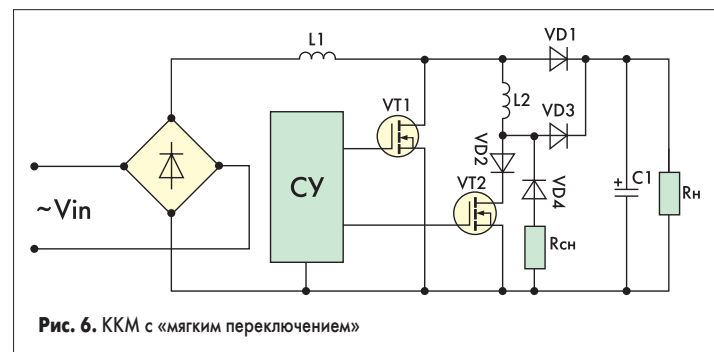


Рис. 6. ККМ с «мягким переключением»

Статические потери определяются аналогично бустерному преобразователю:

$$P_c = I_{sw}^2 R_{ds} + I_d U_F \quad (12)$$

Динамические потери:

$$P_{sw} = \frac{1}{2} I_{sw} V_0 f_s t_f + \frac{1}{2} C_{22(VT2)} V_0^2 f_s + I_{L2}^2 R_{on(VT2)} \sqrt{f_s t_{on}} + I_{L2} U_{F(VD2)} \sqrt{f_s t_{on}} + I_{L2} U_{F(VD3)} \sqrt{f_s t_{on}} + E_r f_s \quad (13)$$

Приведенная методика оценки потерь в бустерных преобразователях хорошо согласуется с экспериментальными данными [4], ошибка составляет около $\pm 5\%$.

В таблице 3 для сравнения представлены характеристики, элементная база и величины потерь в активных компонентах трех вариантов ККМ — бустерный с HEXFRED-диодом (ККМ1), бустерный с SiC-диодом (ККМ2) и с «мягким переключением» (ККМ3).

Как следует из приведенных результатов, простая замена HEXFRED-диодов на ZERO RECOVERY позволяет снизить тепловую нагрузку в бустерном ККМ почти вдвое. Практически такой же результат получается при использовании схемы с «мягким переключением», но при этом количество элементов повышается в 3 раза, что увеличивает габариты, снижает надежность и соответственно выигрывает от повышения частоты преобразования.

Таблица 3

Параметр	ККМ1	\$	ККМ2	\$	ККМ3	\$
$U_{пит}$, В	~220 $\pm$ 15%		~220 $\pm$ 15%		~220 $\pm$ 15%	
P_0 , В	500		500		500	
f_s , кГц	250		250		250	
U_0 , В	400		400		400	
T_r , °C	50		50		50	
VT1	IRFP460	2,5	IRFP460	2,5	IRFP460	2,5
VD1	HFA15TB60	1,3	CSD10060A	12	HFA15TB60	1,3
VT2	—		—		IRF840	0,9
VD2	—		—		HFA08TB60	0,8
VD3	—		—		HFA08TB60	0,8
VD4	—		—		HFA04TB60	0,6
Контроллер	UC2854	1,8	UC2854	1,8	UC2855A	11
P_{α} , Вт	4,6		5,4		4,6	
P_{sw} , Вт	39,1		17,2		24,5	
P_{Σ} , Вт	43,7		22,6		29,1	
Стоимость, \$	5,6		16,3		17,9	

Заключение

Помимо корректоров коэффициента мощности, SiC-диоды Шоттки находят важное применение в качестве антипараллельных диодов мощных IGBT- и MOSFET-транзисторов и модулей. Это особенно актуально для мостовых инверторов, работающих на индуктивную нагрузку, например приводов электродвигателей, где потери за счет обратного восстановления диода вносят существенный вклад в рассеиваемую мощность. Например, фирма Advanced Power Technology объявила

о соглашении с Cree о поставках кристаллов SiC-диодов для корпусирования совместно с IGBT- и MOSFET-модулями.

Благодаря высокой радиационной стойкости и сохранению работоспособности кристаллов SiC-диодов до 600 °C, весьма перспективно их использование в военной и космической технике.

Литература

1. A. Agarwal, R. Singh, S.-H. Ryu, J. Richmond, C. Capell, S. Schwab, B. Moore, J. Palmour. 600 V, 1-40 A, Schottky Diodes in SiC and Their Applications. Cree Inc. Durham.
2. P. G. Neudeck. Progress Towards High Temperature, High Power SiC Devices. In Institute of Physics Conference Series. No. 141. Compound Semiconductors 1994. H. Goronkin, U. Mishra, Eds. Bristol, UK: IOP Publishing, 1995.
3. P. G. Neudeck. SiC Technology. In The VLSI Handbook. The Electrical Engineering Handbook Series. W.-K. Chen, Ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press and IEEE Press, 2000.
4. S. Lee. Effects of input power factor correction on variable speed drive systems. Virginia Polytechnic Institute. Faculty of Electrical and Computer Engineering. February, 1999.
5. J. Noon. UC3855A/B High Performance Power Factor Preregulator. Application Report. Texas Instruments. May 1996.