

# СИЛОВЫЕ МОДУЛИ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

## КОМПАНИИ INFINEON

С момента появления технологии SiC-диодов интерес к ней не угасает. SiC обладает великолепным сочетанием свойств для применения в приборах силовой электроники: работает при высоких (свыше 500°C) температурах, имеет высокую теплопроводность 3–5 Вт/см·град. и большие плотности рабочих токов до 1000 А/см<sup>2</sup>. Карбид кремния демонстрирует на много более высокое пробивное напряжение по сравнению с традиционно используемым кремнием, что позволяет создавать более компактные приборы с улучшенными параметрами.

Силовые приборы на SiC применяются в следующих областях: импульсные источники питания; высоковольтные корректоры коэффициента мощности (ККМ) с режимом непрерывного тока; источники бесперебойного питания (ИБП) и преобразователи для солнечных батарей; промышленный электропривод; высоковольтные умножители напряжения. Особенно востребованы они в специальных областях применения: нефтедобывающее оборудование, энергетика, автомобильная электроника, аэрокосмическая и военная техника. Основные характеристики SiC в сравнении с GaAs и Si приведены в табл.1 и на рис.1.

Основные преимущества SiC перед Si и GaAs таковы:

- напряженность электрического поля пробоя SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии;
- малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать для силовых приборов кристаллы очень маленького размера;
- из-за большой ширины запрещенной энергетической зоны по сравнению с Si и GaAs токи утечки чрезвычайно малы (менее 70 мкА при 200°C) при повышенной температуре кристалла;
- высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si-диодами почти в два раза);

Е.Обжерин  
evgeny.obzherin@infineon.com

- электронные свойства приборов на основе SiC стабильны и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий;
- карбид кремния устойчив к жесткой радиации, воздействие которой не приводит к деградации электронных свойств кристалла;
- высокая рабочая температура кристалла (более 500°C) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальной аппаратуры.

Хорошая подвижность электронов в сочетании с возможной высокой концентрацией, а следовательно, и большая (на порядок) критическая напряженность электрического поля (3–5)10<sup>6</sup> В/см для SiC по сравнению с (2–5)10<sup>5</sup> В/см позволяют улучшить все характеристики приборов силовой электроники: быстродействие, предельные коммутируемые токи и напряжения, статические и динамические потери. Приборы силовой электроники на основе SiC позволяют радикально уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования, увеличить надежность работы за счет более высоких частот преобразования, более высокой температуры перехода и упрощенной системы охлаждения.

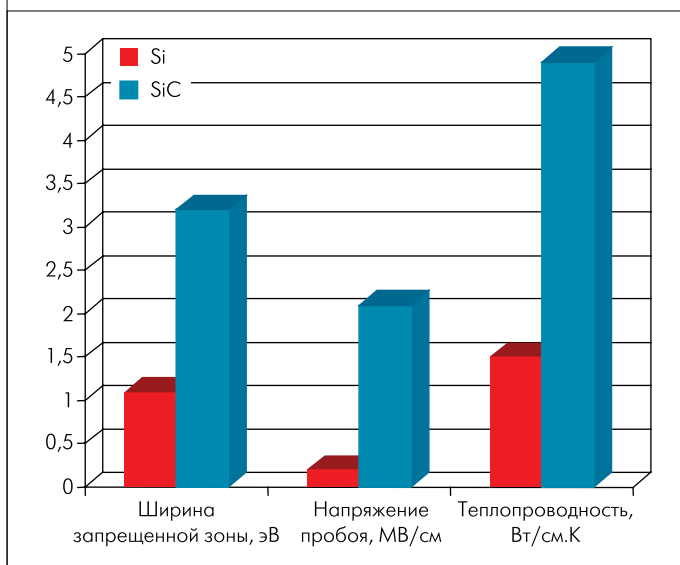


Рис. 1. Сравнение характеристик Si и SiC



**Таблица 1. Основные характеристики SiC, GaAs и Si**

| Наименование  | Si                   | GaAs                | SiC               |
|---|----------------------|---------------------|-------------------|
| Ширина запрещенной энергетической зоны, эВ                    | 1,12                 | 1,5                 | 3,26              |
| Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /с·В                  | 1400                 | 9200                | 800               |
| Подвижность дырок, см <sup>2</sup> /с·В                       | 450                  | 400                 | 140               |
| Концентрация собственных носителей, см <sup>-3</sup> при 300К | 1,5·10 <sup>10</sup> | 2,1·10 <sup>6</sup> | 5·10 <sup>9</sup> |
| Скорость объемного заряда электронов, см/с·10 <sup>7</sup>    | 1,0                  | 1,0                 | 2,0               |
| Критическая напряженность электрического поля, МВ/см          | 0,25                 | 0,3                 | 2,2               |
| Теплопроводность, Вт/см·К                                     | 1,5                  | 0,5                 | 3,0–3,8           |

Однако широкому внедрению приборов силовой электроники на основе SiC препятствуют сложность получения высококачественного исходного материала и эпитаксиальных пленок (проблема микропор – micropipes), а также их высокая стоимость, сложность и дороговизна технологических процессов осаждения CVD (Chemical Vapor Deposition), ионной имплантации, плазмохимии и т.п. Сегодняшний уровень разработок и производства позволяет получать исходный SiC в пластинах диаметром до 3 дюймов с плотностью дефектов до 5 см<sup>-2</sup>. Для увеличения процента выхода годных SiC-приборов силовой электроники этот показатель должен быть уменьшен минимум в пять раз, так как нынешний уровень качества исходных SiC-пластин допускает производство приборов площадью не более нескольких квадратных миллиметров. Интенсивные разработки последнего десятилетия прошлого века уже обусловили запуск промышленного производства SiC-диодов Шоттки на токи до 25 А и напряжение до 1200 В, а также экспериментальную отработку конструкции и технологии производства сверхвысоковольтных диодов, высоковольтных полевых транзисторов (с изолированным затвором SiC-MOSFET и управляемых *p-n*-переходом SiC-JFET), каскодных SiC-Si-ключей.

Сегодня на рынке присутствуют следующие типы SiC-приборов силовой электроники:

- быстродействующие диоды (Шоттки) с блокирующим напряжением 4,9 кВ;
- MOSFET с коммутируемыми напряжениями более 1000 В и сопротивлением в открытом состоянии, которое на три порядка меньше по сравнению с MOSFET на базе Si;
- JFET (полевой транзистор, управляемый *p-n*-переходом) с блокирующими напряжениями 3,5 кВ и удельным сопротивлением в открытом состоянии 25 мОм·см<sup>2</sup> (как у 600 В CoolMOS), что соответствует плотностям коммутируемых токов 100 А/см<sup>2</sup> и прямым падениям напряжения около 2,5 В (для 3300 В приборов);
- каскодные SiC-Si-приборы;
- высоковольтные быстродействующие биполярные силовые приборы (диоды, транзисторы, тиристоры) с коммутируемыми напряжениями более 10 кВ (19 кВ!) и частотами коммутации в несколько килогерц.

Рассмотрим более подробно SiC силовые приборы компании Infineon.

Диоды SiC производства Infineon характеризуются:

- исключительно малым временем обратного восстановления;
- практическим отсутствием обратного тока переключения;
- практическим отсутствием влияния температуры на динамические характеристики переключения;
- практическим отсутствием тока утечки;
- низким прямым сопротивлением потерь по сравнению с Si- и GaAs-диодами;
- высокой плотностью тока при очень малых размерах кристалла, так как проводимость SiC в три раза больше чем у Si, т.е. сравнима с медью.

Основные особенности приборов:

- высокая скорость переключения, не зависящая от номинального тока, скорости его нарастания (di/dt) и температуры;
- положительный температурный коэффициент, позволяющий легко включать приборы в параллель;
- отсутствие процессов прямого и обратного восстановления, достигаемое в результате максимального снижения паразитной емкости.

Серия SiC-диодов ThinQ от фирмы Infineon – это почти идеальные высоковольтные полупроводниковые выпрямительные диоды Шоттки на основе карбида кремния на напряжения 600 В и 1200 В (табл.2).

Компания Infineon впервые в мире запустила в серийное производство полумостовой IGBT-модуль FF600R12IS4F на 600 А с обратными SiC-диодами Шоттки в корпусе PrimePack (рис.2). Для этого модуля коммутационные потери значительно ниже при включении IGBT (рис.3, 4), поскольку импульс тока через включаемый IGBT, необходимый для восстановления запертого состояния SiC-диода, гораздо меньше, чем для такого же модуля с Si-диодами.

На выставке PCIM 2009В, которая состоялась в мае в Нюрнберге (Германия), компания Infineon представила новое семейство интеллектуальных силовых IGBT-моду-

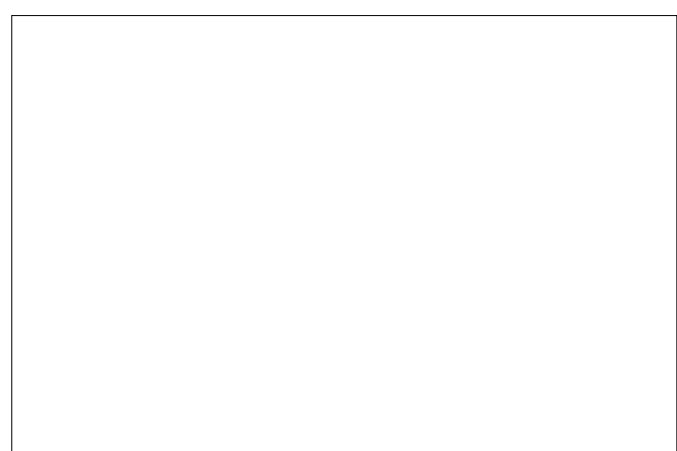







Таблица 2. Корпусные SiC-диоды

|       | TO220-2-2  | TO220-2-1  | TO263  | TO263-2  | TO252-3  |
|-------|--|--|--|--|--|
|       | TO220-DML<br> | TO220-R2L<br> | D2PAK<br> | D2PAK-R2L<br> | D-PAK<br> |
| 600В  | IDTxxS60C<br>02,03,04,05,06,<br>08,10,12,16  | IDHxxSG60C<br>02,03,04,05,06,<br>08,09,10,12,16  | IDBxxS60C<br>06, 10  | IDKxxSG60C<br>02,03,04,05,06,<br>08,09,10,12   | IDDxxSG60C<br>02,03,04,05,06,<br>08,09,10,12   |
| 1200В |  | IDHxxSG120<br>02,05,08,10,15   |  | IDK02SG120   |  |

лей SmartPIM и SmartPACK. В основе новых модулей лежит новый конструктив, который позволяет проводить сборку всех компонентов модуля без использования пайки. Интеллектуальный модуль состоит из трех основных компонентов: радиатора, собственно IGBT-модуля и печатной платы с драйверами. Четвертый элемент – прижим – обеспечивает соединение компонентов в единый модуль с помощью одного винта. Главным элементом этого модуля, позволившим получить такой быстрый и, соответственно, недорогой способ сборки, является IGBT-модуль с выводами типа PressFIT. Выводы PressFIT, запатентованные Infineon для силовых модулей, представляют собой расщепленный пружинный контакт, который вставляется в металлизиро-



Рис.2. Силовой модуль PrimePack с SiC-диодами

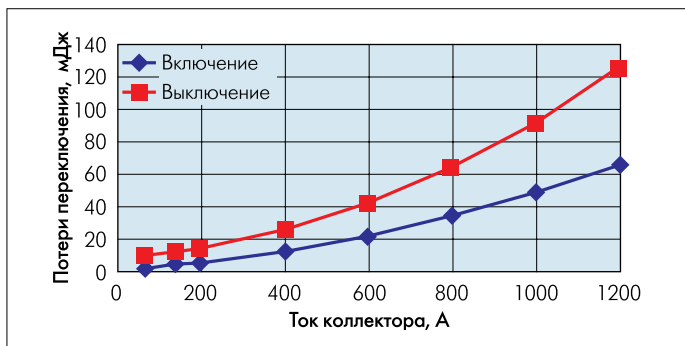


Рис.3. Типичные потери переключения модуля FF600R12IS4F при температуре 125°C

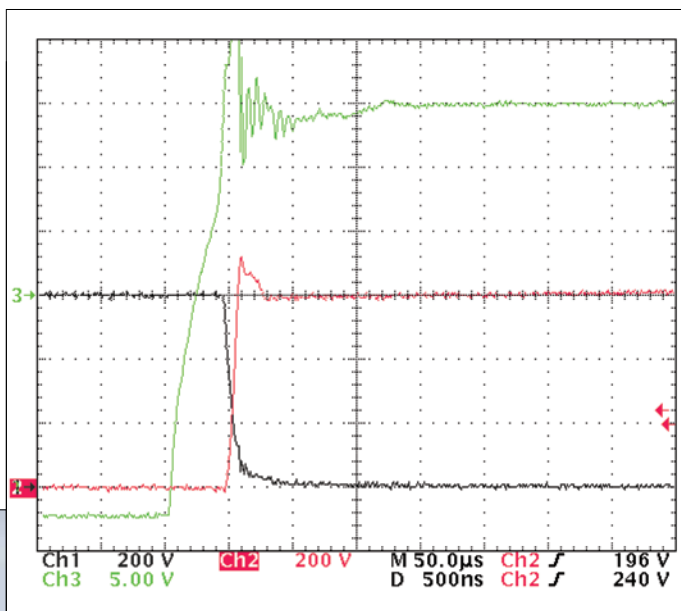


Рис.4. Осциллограммы включения полумостового IGBT-модуля FF600R12IS4F с обратными SiC-диодами

ванное отверстие печатной платы и обеспечивает высоконадежное соединение без пайки.

Первые представители семейства интеллектуальных модулей SmartPACK1 и SmartPIM1 имеют топологию трехфазного моста и трехфазного моста с выпрямителем и чоп-пером. Они позволяют реализовать инверторы мощностью от 2,2 до 11 кВт.

При дальнейшем развитии представителей семейства – SmartPIM2, SmartPACK2, SmartPIM3 и SmartPACK3 – эта мощность возрастет до 55 кВт при рабочих токах до 200А.

Начать серийное производство модулей SmartPACK1 и SmartPIM1 планируется в четвертом квартале 2009 года.

**ЛИТЕРАТУРА**

Efficiency improvement with silicon carbide based power modules, Zhang Xi, Infineon Technology AG. – Материалы конференции PCIM 2009.

Обжерин Е., Карбид кремния – новые горизонты в силовой электронике. – Материалы конференции "Силовая Электроника 2009".