

ПРИМЕНЕНИЕ SiC-ТРАНЗИСТОРОВ В СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

О.Д. Андронов

andronovod@student.bmstu.ru

Е.В. Глинская

glinskaya@bmstu.ru

SPIN-код: 5430-3023

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Исследованы перспективы применения карбид-кремниевых (SiC) полевых транзисторов в силовых преобразовательных устройствах. Рассмотрены физические основы и ключевые преимущества полупроводниковых приборов на основе широкозонных материалов (Wide Band Gap), такие как высокое критическое поле пробоя, повышенная теплопроводность и возможность работы при температуре 200 °C и выше. Проведен сравнительный анализ статических и динамических характеристик силовых ключей на основе транзисторов SiC-MOSFET с традиционными кремниевыми силовыми ключами IGBT и MOSFET. Подробно описаны практические аспекты применения SiC-транзисторов в импульсных источниках питания, инверторах и системах тягового электропривода. Показано, что использование SiC-технологии позволяет существенно повысить КПД преобразователей, уменьшить массогабаритные показатели систем и расширить частотный диапазон работы. Особое внимание уделено вопросам управления SiC-приборами, влиянию паразитных индуктивностей на динамические процессы и методам защиты от перенапряжений. Продемонстрировано, что переход на SiC-транзисторы является ключевым направлением развития энергоэффективной силовой электроники.

Ключевые слова: карбид кремния, транзисторы SiC-MOSFET, силовая электроника, широкозонные полупроводники, КПД, коммутационные потери, тепловые характеристики, импульсные преобразователи

Введение. Современные тенденции развития силовой электроники характеризуются постоянным требованием к повышению энергоэффективности, уменьшению массогабаритных показателей и увеличению надежности преобразовательных устройств. Традиционные кремниевые силовые ключи, такие как IGBT и MOSFET, в значительной степени приблизились к своим теоретическим пределам по быстродействию, рабочей температуре и плотности тока. Это стимулировало активные исследования и внедрение полупроводниковых приборов на основе широкозонных материалов (Wide Band Gap, WBG), среди которых лидирующие позиции занимает карбид кремния (SiC) [1–3].

SiC-транзисторы сочетают в себе преимущества полевых транзисторов (высокочастотное управление напряжением) и уникальные свойства нового материала, что открывает возможности для создания преобразователей нового поколения. Цель данной работы — комплексный анализ преимуществ, особенностей применения и практической эффективности силовых ключей

на основе транзисторов SiC-MOSFET по сравнению с кремниевыми аналогами. В задачи исследования входит рассмотрение физических основ WBG-приборов, сравнение их вольт-амперных и коммутационных характеристик, а также оценка выгод от их применения в типовых силовых схемах.

Физические основы и преимущества SiC-технологии. Ключевые преимущества карбида кремния как полупроводникового материала обусловлены его широкой запрещенной зоной ($\approx 3,26$ эВ для 4H-SiC против $\approx 1,12$ эВ для Si). Это фундаментальное свойство определяет ряд превосходных характеристик [2, 4]:

1) высокая критическая напряженность пробоя (в 10 раз выше, чем у Si). Это позволяет создавать приборы с более тонкой эпитаксиальной структурой и более высокой концентрацией легирующей примеси, что приводит к резкому снижению сопротивления канала $R_{DS(on)}$ для одного и того же класса напряжения. Например, силовой ключ на основе SiC-MOSFET на 1200 В имеет удельное сопротивление в десятки раз ниже, чем кремниевый аналог [4, 5];

2) высокая теплопроводность (в 3 раза выше, чем у Si). Обеспечивает лучший отвод теплоты от кристалла, позволяя работать при больших плотностях тока и более высокой температуре перехода (до 200 °C и выше, в то время как для Si пределом часто является 150 °C);

3) возможность работы на высоких частотах. Малое время переключения и низкие потери восстановления обратного диода тела (body diode) позволяют увеличить частоту коммутации в преобразователях до сотен килогерц, что ведет к уменьшению размеров пассивных компонентов (дрроселей, трансформаторов, конденсаторов).

Сравнительный анализ характеристик ключей SiC-MOSFET и кремниевых ключей. Статические характеристики. В открытом состоянии силовой ключ на основе транзистора SiC-MOSFET ведет себя как резистор с низким сопротивлением $R_{DS(on)}$. Для напряжений 600...1200 В это сопротивление значительно ниже, чем у ключей Si-MOSFET аналогичного класса, и сопоставимо или выше, чем у ключей IGBT, но без характерного для IGBT порогового напряжения (напряжения насыщения). Это приводит к меньшим потерям проводимости при частичных нагрузках [5, 6].

Динамические характеристики и потери переключения. Главное преимущество ключей SiC-MOSFET проявляется в динамических режимах. Благодаря высокой скорости переключения (время нарастания и спада тока составляет единицы-десятки наносекунд) потери включения/выключения (E_{on} , E_{off}) значительно снижаются по сравнению с IGBT. Однако по причине высокой скорости нарастания напряжения (dv/dt) и тока (di/dt) требования к монтажу и схемотехнике управления должны быть повышены для подавления паразитных колебаний и перенапряжений [6, 7].

Практическое применение силовых ключей на основе SiC-транзисторов в силовых преобразовательных устройствах. Импульсные источники питания. Использование силовых ключей на основе SiC-транзисторов в импульсных источниках питания позволяет поднять частоту коммутации с типичных 20...100 кГц до 200...500 кГц и выше. Это приводит к пропорциональному уменьшению габаритов силового трансформатора и выходных фильтров. Суммарное увеличение КПД на 1...3 % за счет снижения коммутационных потерь и потерь проводимости позволяет создавать более компактные и эффективные источники питания для серверов, телекоммуникационного оборудования и промышленных систем [8].

Инверторы и тяговый привод. В электромобилях и промышленных приводах применение SiC-инверторов позволяет увеличить запас хода транспортного средства на 5...10 % за счет повышения КПД на 2...4 % в типовом ездовом цикле. Кроме того, уменьшение размеров системы охлаждения и самих силовых модулей способствует облегчению конструкции [8, 9].

Системы бесперебойного питания. В системах бесперебойного питания с двойным преобразованием энергии использование SiC-транзисторов в выпрямителе и инверторе позволяет достичь КПД до 98...99 % в широком диапазоне нагрузок, что существенно снижает эксплуатационные расходы на электроэнергию и затраты на охлаждение [8].

Особенности схемотехники и управления. Переход на SiC-технология требует адаптации подходов к проектированию.

1. *Необходимость в особых драйверах затвора.* Требуются драйверы с большей выходной мощностью и минимальной собственной задержкой для обеспечения быстрых и чистых переключений. Часто необходимо применение отрицательного смещения на затвор для надежного запирающего и предотвращения ложных включений из-за паразитных помех [10].

2. *Подавление перенапряжений.* Высокое значение dv/dt приводит к возникновению перенапряжений на стоке транзистора из-за резонансных процессов в паразитных индуктивностях монтажа. Необходимо тщательно проектировать силовую часть, минимизировать индуктивность силового контура и применять снабберные цепи [10].

3. *Защита от короткого замыкания.* Время выдерживания короткого замыкания силовыми ключами на основе SiC-MOSFET составляет всего несколько микросекунд (против 10...20 мкс у IGBT), что обуславливает жесткие требования к быстродействию систем защиты и драйверов [10].

Заключение. Проведенный анализ подтверждает, что карбид-кремниевые транзисторы представляют собой качественный скачок в развитии силовой электроники. Их ключевые преимущества — высокое рабочее напряже-

ние, низкие потери переключения и проводимости, а также высокая рабочая температура — позволяют создавать преобразовательные устройства с беспрецедентными показателями КПД, мощности и компактности.

Несмотря на существующие вызовы, связанные с управлением, защитой и пока еще более высокой стоимостью по сравнению с кремниевыми аналогами, тенденция к массовому внедрению SiC-технологии является необратимой. Дальнейшее развитие связано с оптимизацией технологического процесса производства кристаллов, снижением стоимости, а также с разработкой специализированных микросхем управления и защиты, что сделает SiC-транзисторы стандартом для новых поколений энергоэффективных систем в транспорте, промышленности и энергетике.

Литература

- [1] Балабух Н.В. *Силовые полупроводниковые приборы*. Москва, Academia, 2020, 456 с.
- [2] Kimoto T., Cooper J.A. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices, and Applications*. Wiley, 2014.
- [3] Baliga B.J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer, 2018.
- [4] Харитонов С.А., Левинштейн М.Е. *Широкозонные полупроводниковые структуры для силовой электроники*. Москва, Техносфера, 2019, 320 с.
- [5] Hefner A.R. et al. Silicon Carbide Power MOSFET Model and Parameter Extraction for Circuit Simulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 8, pp. 7892–7904.
- [6] Lee J. et al. Comparison of 1200V SiC MOSFET and Si IGBT Based on Power Loss Analysis in Induction Heating Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 5, pp. 4880–4888.
- [7] Иванов В.П., Петров К.С. Анализ потерь в силовых ключах на основе SiC и GaN. *Электротехника*, 2021, № 5, с. 34–41.
- [8] Wang J., Chung H.S.-H. A Critical Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, vol. 69, no. 2, pp. 1255–1277.
- [9] Zhang Z. et al. Design and Performance Evaluation of a 10-kW High-Efficiency SiC-Based PV Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, vol. 69, no. 4, pp. 3451–3461.
- [10] Williams R.K. et al. The Unstoppable Force of SiC: Technology, Design, and Applications. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 28–39.

Поступила в редакцию 20.11.2025

Андронов Олег Дмитриевич — студент кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Глинская Елена Вячеславовна — старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Басараб Михаил Алексеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андронов О.Д., Глинская Е.В. Применение SiC-транзисторов в силовой электронике. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 03 (104). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1115.html>

APPLICATION OF SiC TRANSISTORS IN POWER ELECTRONICS

O.D. Andronov

andronovod@student.bmstu.ru

E.V. Glinskaya

glinskaya@bmstu.ru

SPIN-code: 5430-3023

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

This article explores the potential of silicon carbide (SiC) field-effect transistors in power converter devices. It examines the physical foundations and key advantages of wide-bandgap semiconductor devices, including high critical breakdown field, increased thermal conductivity, and operation at temperatures of 200 °C and above. A comparative analysis of the static and dynamic characteristics of power switches based on SiC MOSFETs and conventional silicon power switches based on IGBTs and MOSFETs is provided. The practical aspects of using SiC transistors in switching power supplies, inverters, and traction drive systems are described. It is shown that SiC technology can significantly improve converter efficiency, reduce system weight and dimensions, and expand the operating frequency range. Particular attention is paid to SiC device control, the influence of parasitic inductances on dynamic processes, and overvoltage protection methods. The work demonstrates that the transition to SiC transistors is an important direction in the development of energy-efficient power electronics.

Keywords: silicon carbide, power switches based on SiC MOSFETs, power electronics, wide-bandgap semiconductors, efficiency, switching losses, thermal characteristics, switching converters

Received 20.11.2025

Andronov O.D. — Student of the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Glinskaya E.V. — Senior Lecturer at the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Basarab M.A., Dr. of Phys. and Math. Sci., Head of Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Andronov O.D., Glinskaya E.V. Application of SiC transistors in power electronics. *Politekhnikeskij molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 03 (104). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1115.html>