

# Создание карбида кремния.

## Структура ячеек и производственный процесс

**В первой части статьи («Силовая электроника», №4'2017, с. 4) был описан процесс изготовления пластин карбида кремния (SiC) начиная с производства сырья (порошок SiC) до получения так называемых «эпи-полированных» (epi-ready) подложек. Во второй части рассматриваются возможные типы SiC-приборов, особое внимание уделяется различным вариантам структур, включая SiC-диоды Шоттки (SBD), планарные SiC-MOSFET и двойные Trench MOSFET. Показано, что структура ячеек существенно влияет на физические свойства и производительность конечного прибора. В конце обсуждается процедура тестирования продукции ROHM в целях обеспечения качества.**

**Али Машали**  
(Aly Mashaly)

**Минео Миура**  
(Mineo Miura)

**Перевод:**  
**Евгений Карташов**

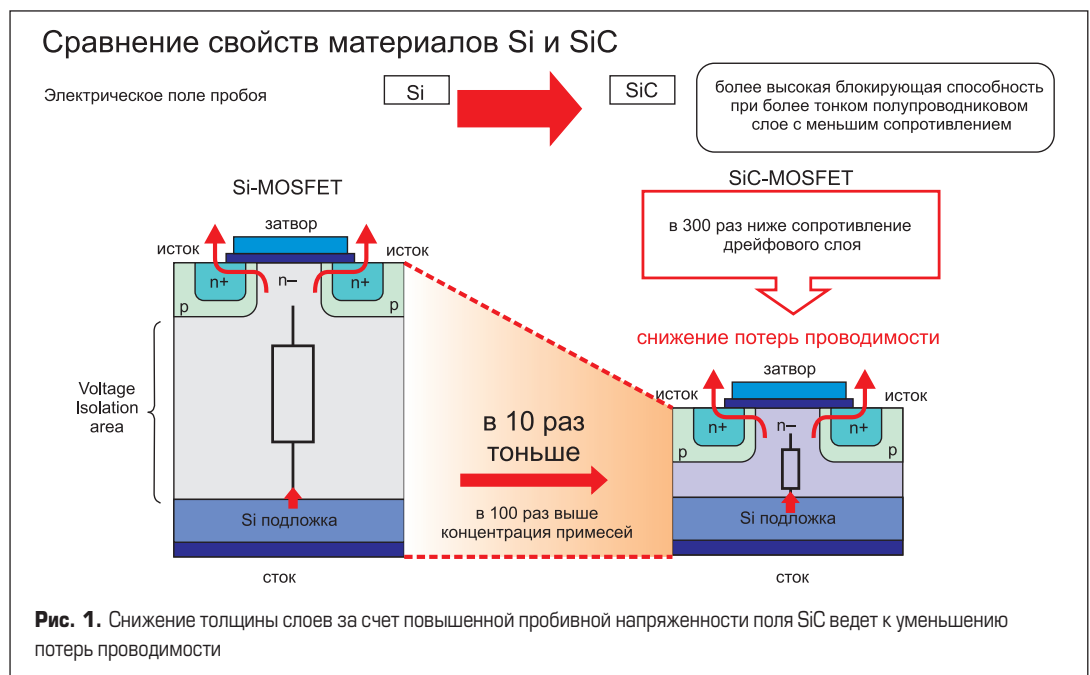
### Введение

Конвертеры AC/DC, DC/AC, DC/DC и AC/AC являются самыми популярными силовыми электронными устройствами. Эффективность преобразования существующих силовых систем, как правило, находится в диапазоне между 85 и 95%. Другими словами, около 10% электрической энергии рассеивается в виде тепла на каждом этапе преобразования энергии. В общем случае именно производительность полупроводниковых ключей является основным фактором, ограничивающим КПД силовых электронных устройств. Поэтому создание высоковольтных мощных полупроводников с низкими потерями является необходимым условием для построения энергетических систем будущего.

По сравнению с кремниевыми (Si) полупроводниками напряженность электрического поля в SiC-

приборах почти в десять раз выше (2,8 МВ/см против 0,3 МВ/см). Увеличение напряженности поля в SiC-материале позволяет использовать более тонкую структуру слоев, которые называются эпитаксиальными слоями на подложке из SiC. Их толщина составляет около одной десятой от толщины эпитаксиальных Si-слоев. При аналогичном пробивном напряжении концентрация примесей в SiC может быть на два порядка выше, чем у эквивалентных Si-структур. Это позволяет снизить удельное сопротивление прибора ( $R_{onA}$ ), что приводит к значительному уменьшению потерь проводимости (рис. 1).

Согласно законам физики полупроводников,  $R_{onA}$  резко возрастает с увеличением напряжения пробоя (рис. 2). Благодаря вышеперечисленным свойствам SiC, значение  $R_{onA}$  при высоком напряжении у SiC в 100 раз меньше, чем у Si. За счет этого отпадает



необходимость в структурах с неосновными носителями, обычно используемых в кремниевых высоковольтных приборах IGBT и FRD.

Силовые SiC-устройства на основных носителях, такие как MOSFET и SBD, могут выпускаться с диапазоном рабочих напряжений от 600 до 3,3 кВ. Из-за отсутствия неосновных носителей заряда в процессе проводимости, резко возрастает скорость переключения SiC, что приводит к существенному снижению коммутационных потерь. Указанные особенности делают SiC очень перспективным материалом для высоковольтных приложений, где тепловые характеристики особенно важны.

Задачи, стоящие перед силовыми электронными системами, значительно возросли в последние годы. Главную роль здесь играют массогабаритные показатели и эффективность преобразования. Кроме того, важна общая стоимость системы, соответственно, следует снижать производственные расходы, причем без ухудшения качества и надежности конечного продукта. Благодаря своим физическим свойствам SiC имеет огромный потенциал для решения этих проблем и удовлетворения потребностей рынка (рис. 3). В силовых электронных устройствах система охлаждения играет важную роль для повышения плотности мощности и уменьшения размеров. SiC отлично подходит для решения таких задач, поскольку его теплопроводность в три раза лучше, чем у кремниевых полупроводников. Кроме того, SiC имеет расширенный диапазон рабочих температур (предельная температура может быть даже выше +250 °C) по сравнению с Si благодаря большей ширине запрещенной зоны (в три раза больше, чем у кремния).

### Производство SiC-приборов

Технология производства SiC-подложек была подробно описана в упомянутой выше первой части данной серии статей. Такие подложки используются в качестве базового материала для последующего производства SiC-приборов. Конкретные структуры, состоящие из эпитаксиальных слоев, процессы легирования и металлизации в конце концов создают устройство, которое может быть SiC-диодом, SiC-MOSFET или даже SiC-IGBT, в зависимости от технологии. При разработке SiC-приборов прецизионный процесс эпитаксиального выращивания является основой для производства дрейфовых слоев нужной толщины и оптимальной концентрации легирующей примеси. Используя процесс оптимизации, надлежащей очистки и кондиционирования полированной поверхности подложки, можно добиться очень высокого качества SiC-структур и эпитаксиальных слоев.

Активирующий отжиг селективно легированных зон, образованных ионной имплантацией, при температурах свыше +1600 °C — вот одна из многих проблем, возникающих при производстве SiC-приборов. Это связано с высокой стабильностью материала. Оксидация затвора представляет собой еще один вызов. Из-за оставшихся углеродных кластеров в MOS-интерфейсе

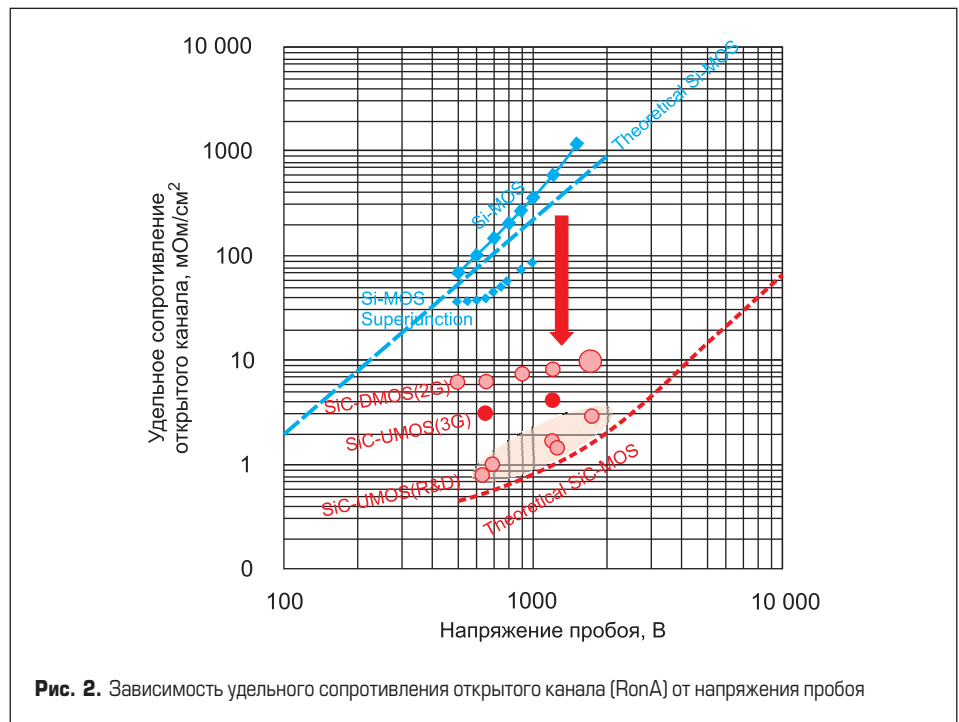


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления открытого канала (RonA) от напряжения пробоя

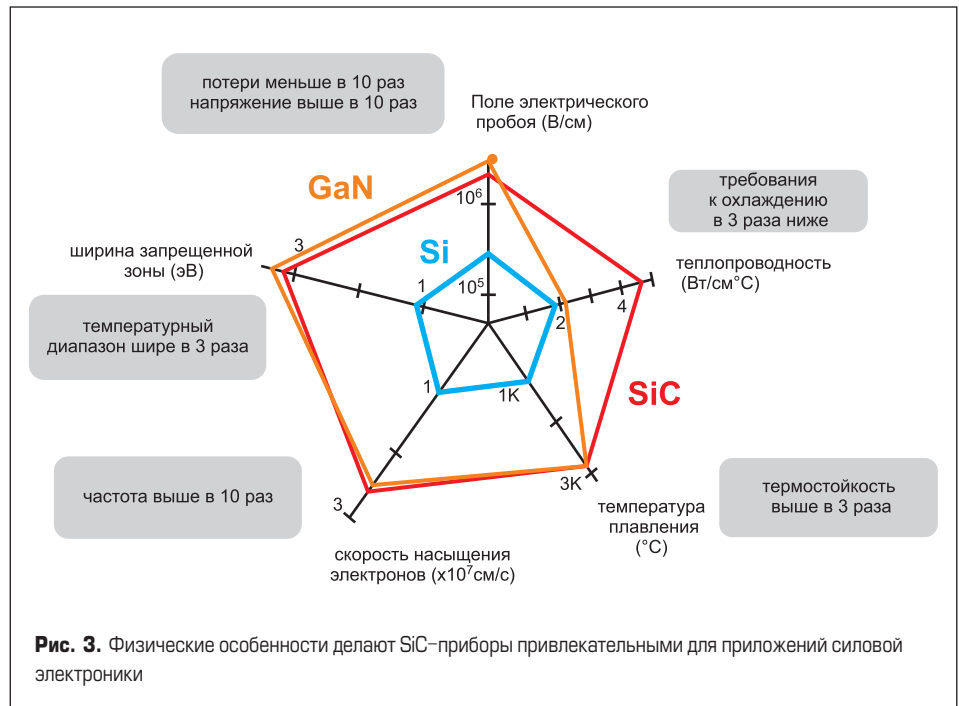


Рис. 3. Физические особенности делают SiC-приборы привлекательными для приложений силовой электроники

( $SiC + O_2 \Rightarrow SiO_2 + \uparrow CO_2 + \uparrow CO + C$ ) канальная подвижность SiC-MOSFET очень низка по сравнению с Si, что обуславливает повышенное сопротивление канала даже при высоких напряжениях на затворе ( $V_{gs} = 20$  В).

Таким образом, удельное сопротивление ( $R_{onA}$ ) коммерческих MOSFET оказывается выше ожидаемых идеальных значений. Кроме того, такой интерфейс иногда приводит к нестабильным значениям  $V_{th}$  или малым величинам  $Q_{bd}$ . Используя собственную технологию оксидации затвора, компания ROHM смогла выпустить на рынок SiC-MOSFET, отличающиеся стабильным значением  $V_{th}$  и высоким уровнем  $Q_{bd}$  по сравнению с Si-MOSFET.

Производственный процесс заканчивается выпуском так называемых SiC-пластин (рис. 4). На последующих этапах распиливают, и по-

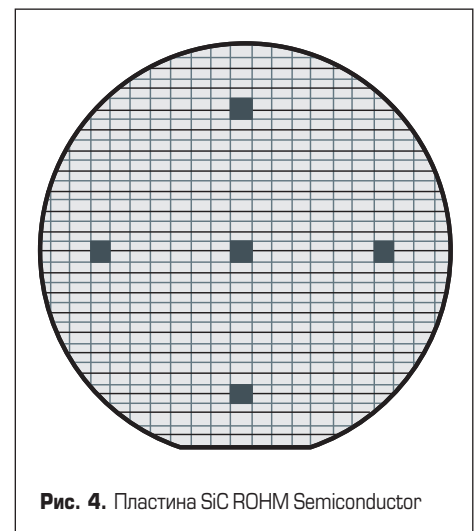
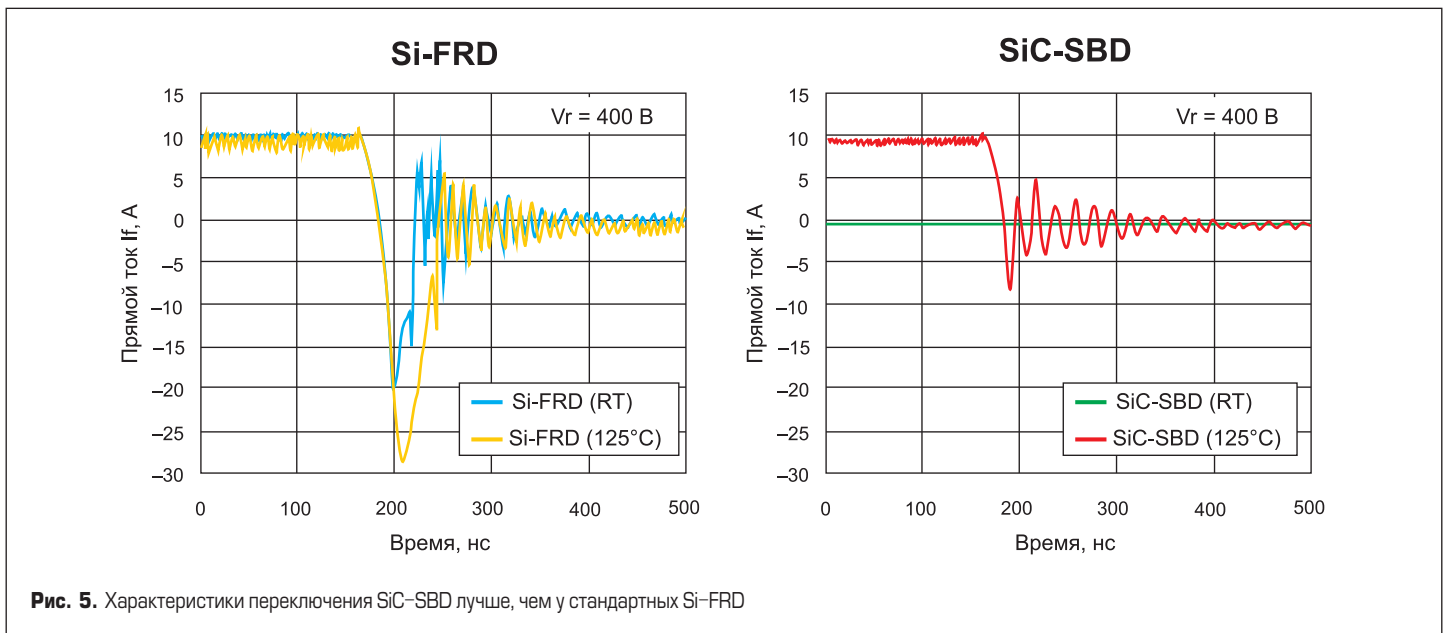


Рис. 4. Пластина SiC ROHM Semiconductor



лучившиеся кристаллы используются для изготовления конечной продукции (дискретные элементы или силовые модули).

**SiC-диоды**

По сравнению с кремниевыми диодами, SiC-SBD гораздо более привлекательны для силовой электроники, особенно при рабочем напряжении 600 В и выше. SiC-SBD обеспечивают гораздо лучшую эффективность за счет снижения потерь переключения и отсутствия процесса обратного

восстановления при выключении (рис. 5). Характеристики EMI всей системы также улучшаются благодаря соответствующему уменьшению уровня электромагнитного излучения.

У SiC-SBD значительно меньше ток и время обратного восстановления, что существенно снижает соответствующие потери энергии. Компания ROHM представила свои технологические достижения, выпустив на рынок компоненты SiC-SBD второго поколения. Поперечное сечение кристалла показано на рис. 6.

Диоды ROHM имеют самое низкое прямое напряжение среди всех аналогичных компонентов на мировом рынке (рис. 7). В то же время они обеспечивают низкие токи утечки благодаря прецизионному производственному процессу.

Линейка компонентов ROHM второго поколения в настоящее время включает SiC-SBD с рабочим напряжением 650 В и током 5–100 А, а также 1200 и 1700 В с током до 50 А. Кроме того, доступны диоды, квалифицированные для

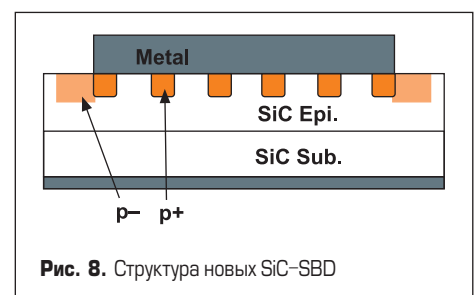
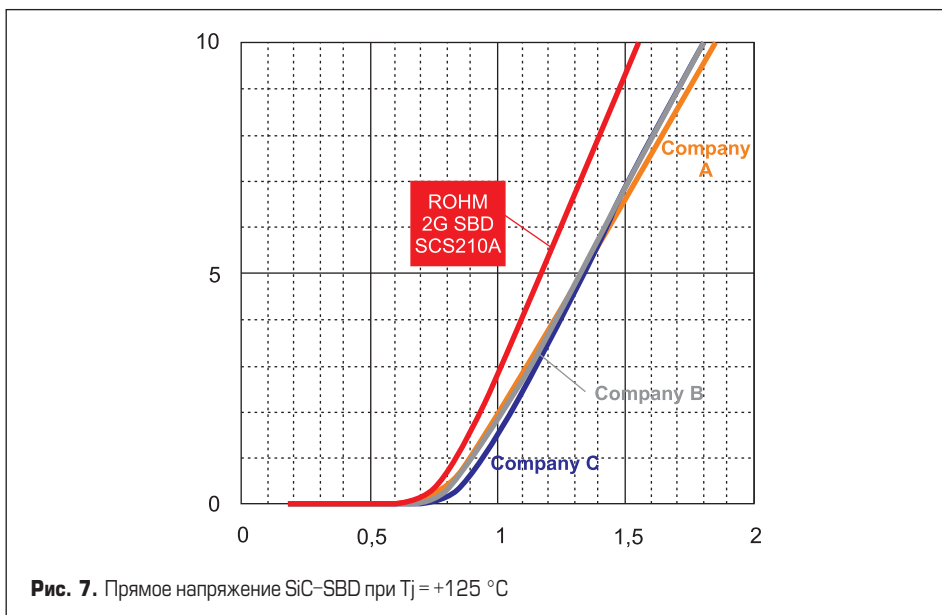
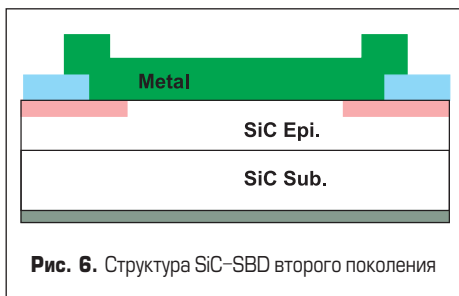
транспортных применений, которые широко используются в бортовых зарядных устройствах.

**Третье поколение SiC-диодов. Мотивация разработки**

В таких устройствах, как SMPS, SiC-SBD теперь рассматриваются как лучшая альтернатива Si-FRD (быстро восстанавливаемые диоды) в каскаде PFC (корректор коэффициента мощности). В этом устройстве при включении возникает большой пусковой ток, поскольку конденсаторы в промежуточном каскаде (емкость DC-шины) не заряжены до момента включения. Из-за низкой стойкости к токам перегрузки (IFSM) SiC-SBD второго поколения в устройствах SMPS рекомендуется использовать байпасные диоды. Для удовлетворения потребностей рынка в непрерывном уменьшении габаритов компанией ROHM разработано третье поколение SiC-SBD, которое обеспечивает высокую стойкость к току перегрузки IFSM (рис. 8). Уже доступны инженерные образцы с током до 10 А.

С развитием структуры барьера Шоттки (JBS, ROHM удалось совместить все преимущества SiC-диодов в одном приборе. По новой технологии p+ области внедряются под барьером Шоттки на оптимальном расстоянии, что позволяет увеличить надежность диода при сохранении низкого значения Vf.

Благодаря PN-топологии диода и инжекции неосновных носителей сопротивление эпитаксиального слоя уменьшается с ростом температуры. С другой стороны, оно возрастает



тает при увеличении температуры структуры SBD (рис. 9).

**Структуры SiC-MOS. Планарная структура ROHM второго поколения**

Планарная структура, которая является одной из самых известных в полупроводниковой промышленности, также подходит для производства SiC-MOSFET для высоковольтных приложений. Компания ROHM является одним из ведущих производителей, реализовавших планарную топологию в своих компонентах. Хорошо известно, что паразитный диод (т. н. «тельный диод») образуется между *p*-слоем и дрейфовым *n*-слоем MOSFET (рис. 10). В истории развития SiC-технологии одной из самых важных проблем была так называемая «биполярная деградация». Сопротивление канала прибора увеличивается, когда ток проходит через «тельный диод». Таким образом, стабильное поведение этой паразитной структуры имеет решающее значение для надежной работы SiC-MOSFET в реальном применении. Чтобы обеспечить надежность электронной системы, разработчики должны быть уверены в том, что свойства «тельного диода» не будут деградировать.

**Что влияет на деградацию «тельного диода»?**

Наибольшее влияние на стабильность характеристик «тельного диода» оказывают кристаллические дефекты и процесс производства SiC-MOSFET. Получая энергию в ходе электронно-дырочной рекомбинации при протекании прямого тока, возникающие смещения структуры кристалла меняют свой тип от линейного до винтового. Это может привести к деградации прямого сопротивления паразитного диода и самого MOSFET. Используя глубокие знания технологии изготовления подложек для опти-

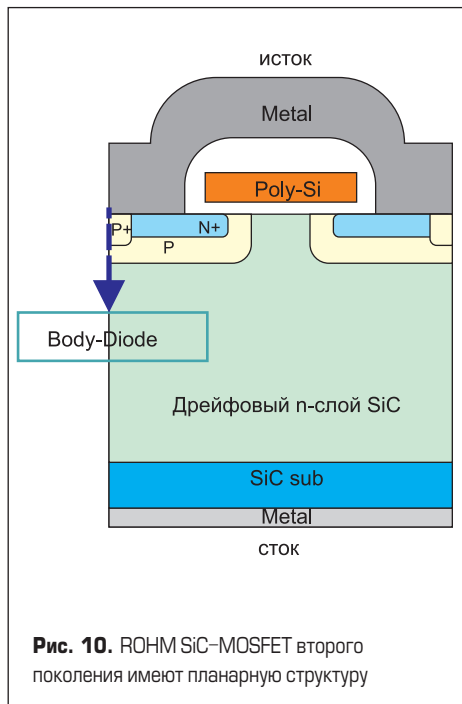


Рис. 10. ROHM SiC-MOSFET второго поколения имеют планарную структуру

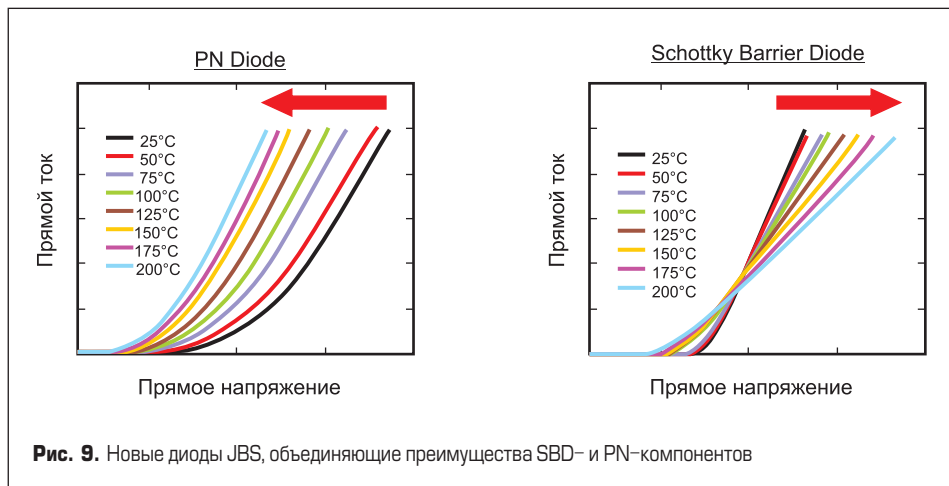


Рис. 9. Новые диоды JBS, объединяющие преимущества SBD- и PN-компонентов

мизации процесса эпитаксиального выращивания и производства полупроводниковых приборов, специалистам ROHM удастся предотвратить деградацию диода.

Рис. 11 и 12 иллюстрируют результаты сравнительных измерений характеристик MOSFET ROHM и планарных SiC-MOSFET другого производителя. В частности, четыре планар-

ных транзистора конкурирующей фирмы были сравнены с 22 планарными SiC-MOSFET ROHM. Все испытываемые приборы имели пробивное напряжение 1200 В и типовое сопротивление канала 0,08 Ом. Через «тельный диод» пропускался ток 8 А от источника тока. После 24 ч испытаний сопротивление канала конкурирующих планарных MOSFET резко

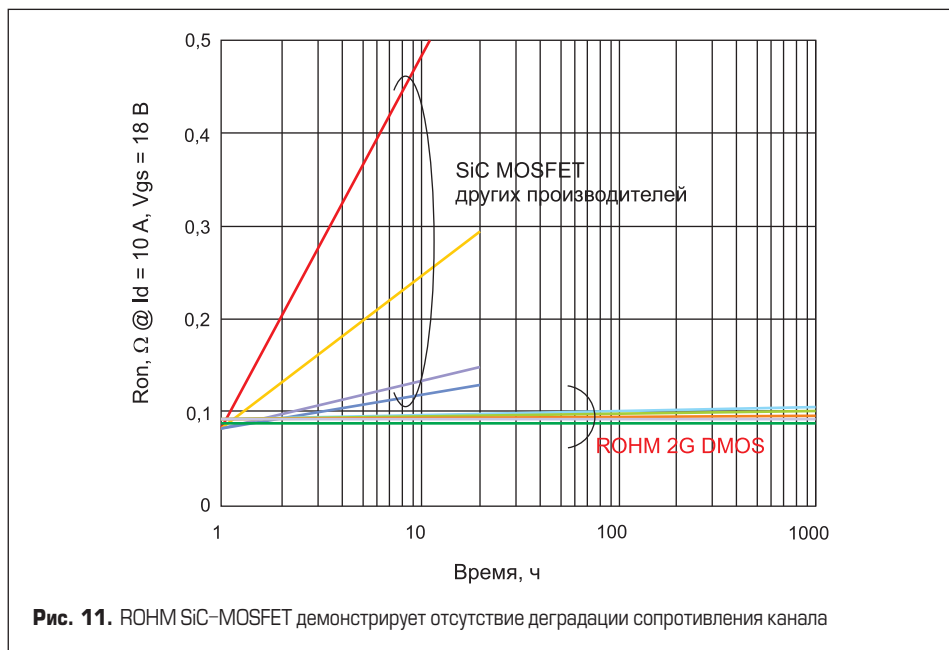


Рис. 11. ROHM SiC-MOSFET демонстрирует отсутствие деградации сопротивления канала

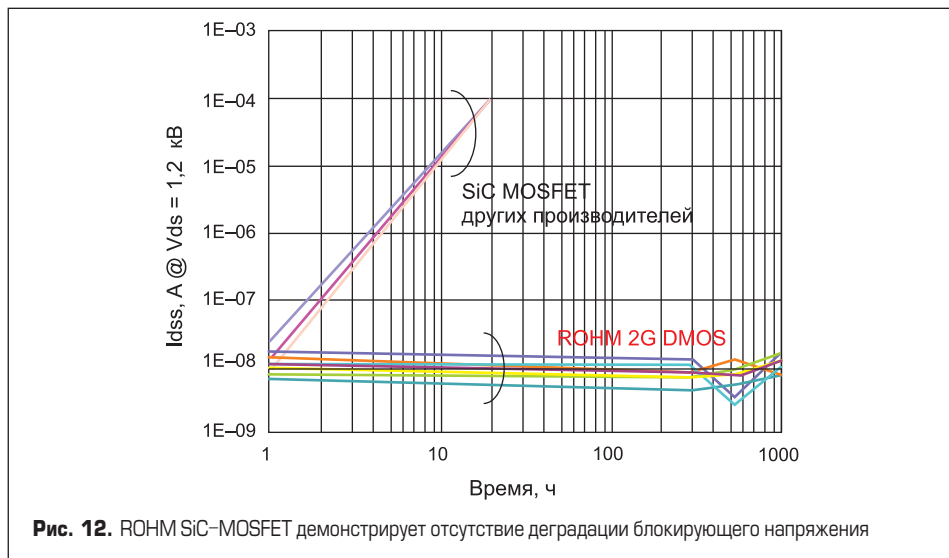


Рис. 12. ROHM SiC-MOSFET демонстрирует отсутствие деградации блокирующего напряжения

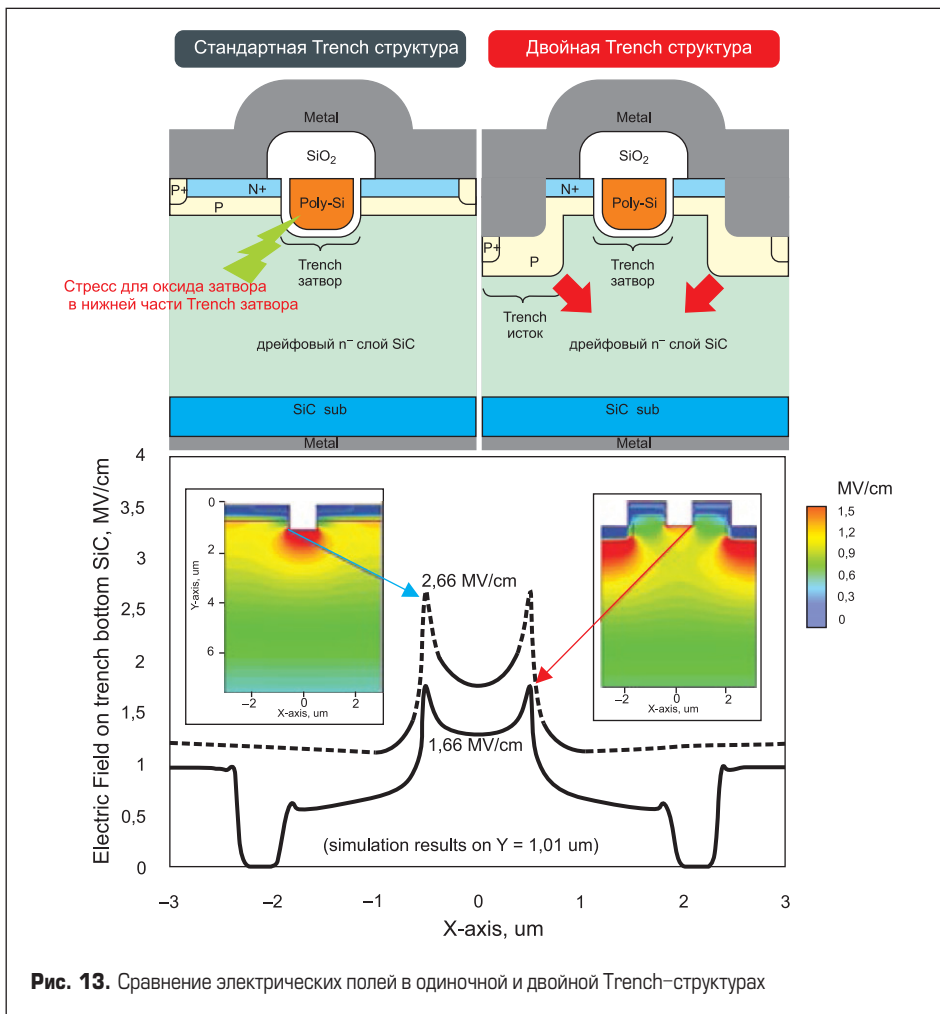


Рис. 13. Сравнение электрических полей в одиночной и двойной Trench-структурах

возросло, и блокирующая способность была потеряна. В тех же условиях у планарных MOSFET ROHM деградация не была выявлена даже спустя 1000 ч.

**Эксклюзив от ROHM: Trench структура третьего поколения**

В течение нескольких десятилетий траншейная (Trench) структура затвора считалась наиболее проверенной при производстве низко-

вольтных Si-MOSFET и Si-IGBT. Эта технология оказалась пригодной для многих приложений силовой электроники. Поскольку электрод затвора встраивается в дрейфовый слой, ширина ячейки может быть уменьшена, что обеспечивает более высокую плотность тока. Изучая традиционную технологию траншейного затвора, используемую в SiC-MOSFET, разработчики ROHM обнаружили интересные факты.

Поскольку SiC имеет большую напряженность электрического поля, чем Si-IGBT, ис-

пользование обычной Trench-структуры затвора приводит к появлению следующей проблемы. В выключенном состоянии на Trench-затворе SiC-прибора присутствует сильное электрическое поле напряженностью примерно 2,66 МВ/см. Это создает чрезмерный стресс для оксида затвора, который может существенно снизить надежность и срок службы устройства. Для решения проблемы ROHM разработала новую двойную Trench-структуру (double Trench-structure), способную подавить сильное электрическое поле. В этом случае электроды истока и затвора встроены в дрейфовый слой (электрод истока находится глубже, чем затвора). В результате оксид затвора подвергается воздействию электрического поля с напряженностью менее 1,66 МВ/см (рис. 13). Таким образом, заглубление электродов истока позволяет предотвратить концентрацию электрического поля в нижней части затвора.

Дополнительным преимуществом канальной структуры затвора является меньшее сопротивление канала ( $R_{ds-on}$ ) на 50% при том же размере кристалла, что обеспечивает значительный спад потерь проводимости (рис. 14). Входная емкость также снижается на 35%, что приводит к заметному уменьшению коммутационных и общих потерь энергии. Таким образом, использование данной структуры позволяет создавать более эффективные модули с повышенной плотностью мощности. Кроме того, возрастает надежность затворного оксидного слоя за счет уменьшения напряженности электрического поля. Компания ROHM начала массовое производство третьего поколения приборов SiC-MOS с дискретных SiC-компонентов и модулей на основе фирменной double trench-технологии. Это расширяет существующую гамму MOSFET-продуктов и способствует разработке новых высокоэффективных и надежных систем силовой электроники.

SiC — очень перспективный широкозонный материал для промышленных и автомобильных применений. Естественно, зрелость технологии и качество продукции являются важными факторами, необходимыми, чтобы убедить рынок в том, что SiC-приборы полностью отвечают требованиям по надежности и сроку службы системы. Довольно часто, однако, требуется обоснование того, как производитель полупроводников (в данном случае ROHM) может гарантировать качество процесса производства SiC. Многолетний опыт разработки и изготовления SiC- и Si-приборов, а также крупные инвестиции в производство позволяют ROHM удовлетворить и даже превзойти требования рынка по надежности.

**Возможные дефекты при производстве SiC-пластин**

Как было указано в первой части статьи и в многочисленных публикациях научно-исследовательских институтов и университетов, SiC-структурам присущи различные дефекты, в том числе:

- микротрещины;
- винтовые смещения (TSD);
- краевые смещения (TED);

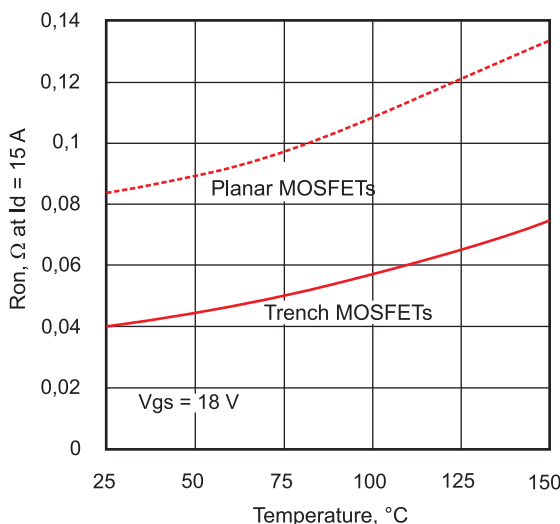


Рис. 14. Приборы Trench SiC-MOS имеют на 50% меньшее значение  $R_{ds-on}$

- смещения в плоскостях, перпендикулярных главной кристаллографической оси.

Большинство дефектов подложки приводят к повреждению слоев на стадии эпитаксиального роста. Также могут возникать и другие повреждения в фазе эпитаксиального выращивания, ионной имплантации и сухого травления. Эти точечные дефекты обычно проявляются вне зависимости от качества подложки.

Все виды макроскопических дефектов, возникающих на стадии эпитаксиального роста, ведут к значительному увеличению тока утечки и снижению пробивного напряжения, т. е. они влияют на надежность SiC-устройств.

Важно понимать физические свойства используемых материалов, чтобы выявлять дефекты, которые могут возникнуть в процессе производства. Это обеспечивает непрерывное совершенствование технологического цикла. Кроме того, ROHM проводит различные тесты в процессе изготовления, позволяющие детектировать неисправные детали и обеспечить полный контроль каждого этапа.

### Производственные тесты ROHM

Система контроля качества ROHM основана на использовании 100%-ного оптического контроля и испытаниях электрических параметров. Кроме того, проводится специальная инспекция в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Приборы SiC с видимыми дефектами, как правило, не проходят электрических тестов (КЗ цепей «затвор–исток» или «сток–исток»). Тем не ме-



Рис. 15. Обеспечение качества в процессе производства ROHM SiC

нее компания ROHM проводит оптический контроль в начале производства устройства для выявления любых дефектов подложки и эпитаксиального слоя.

Помимо видимых повреждений, существуют и невидимые, включая мелкие кристаллические дефекты подложки. Это даже еще более важно, потому что такие компоненты с невидимыми повреждениями могут безупречно работать в течение неопределенного времени и вызвать

непредсказуемый отказ системы. Чтобы предотвратить такую ситуацию, ROHM использует уникальные технологии скрининга, позволяющие выявить невидимые дефекты приборов до отгрузки клиенту (рис. 15). Технические характеристики компонентов проверяются в ходе тестов в конце процесса производства. Для обеспечения прослеживаемости все шаги документируются для каждого отдельного прибора.