

Последние достижения технологий высоковольтных IGBT

В настоящей статье рассматривается влияние космического излучения на частоту отказов мощных полупроводниковых устройств в условиях приложенного к ним высокого напряжения. Демонстрируется усовершенствованная конструкция модулей высоковольтных IGBT номинальным напряжением 6,5 кВ, позволяющая повысить долговременную стабильность при постоянном напряжении без ущерба электрическим характеристикам, а также улучшить результаты ускоренной экспериментальной проверки с облучением пучком нейтронов. Описывается также структура высоковольтных IGBT нового поколения с указанием V_{CEsat} и V_F .

Роман Фукалов
(Roman Fukalov)

Roman.Fukalov@mer.mee.com

Ойген Штумпф
(Eugen Stumpf)

Хитоши Уэмура
(Hitoshi Uemura)

Шиничи Иура
(Shinichi Iura)

Кацуми Накамура
(Katsumi Nakamura)

Введение

Феномен отказа высоковольтных силовых полупроводниковых устройств под действием космических лучей в условиях приложенного к ним высокого напряжения был впервые описан в 1994 г. [1–3] и с тех пор тщательно исследован. Максимальное запирающее напряжение IGBT-модулей достигло уровня 6,5 кВ, и в этой связи назрела необходимость в решении проблемы отказа под действием космических лучей (также известной как «проблема долговременной стабильности при постоянном напряжении», или LTDS).

Принято считать, что нейтроны оказывают наибольшее влияние на частоту отказов силовых устройств под действием космических лучей. Нейтроны высокой энергии (≥ 10 МэВ) вырабатываются при столкновении космических лучей с атмосферой и устремляются к земле. Более того, когда нейтроны высокой энергии сталкиваются с ядрами атомов кремния в полупроводниковой подложке, в результате ядерной реакции возникают определенные типы ионов, как показано в таблице 1 [4–5].

Образовавшийся таким образом ион ведет себя как «генератор носителей заряда» в кремнии, вырабатывая в своей окрестности большое количество электронов и дырок, и приводит к отказам высоковольтных силовых компонентов под высоким постоянным напряжением [5].

Кристалл E-LPT для модулей высоковольтных IGBT

Ключевой конструктивный подход, позволяющий надежно бороться с отказами высоковольтных силовых компонентов под действием космических лучей, — это уменьшение максимальной напряженности электрического поля в состояниях при запирающем напряжении [3]. Эффективные меры противодействия таким отказам заключаются в следующих важнейших современных нормах проектирования:

- использование *n*-кремния с повышенным удельным сопротивлением;
- повышение толщины *n*-области дрейфа.

Указанный выше подход, однако, затрудняет повышение электрических характеристик, особенно в части потерь мощности. Цель проектирования новых высоковольтных полупроводниковых кристаллов для современных модулей высоковольтных IGBT — добиться устойчивости к отказам под действием космических лучей, не жертвуя электрическими характеристиками.

Ново разработанный IGBT, который получил название «усовершенствованного IGBT на эффекте смыкания» (Enhanced Light Punch Through IGBT, E-LPT), имеет следующие конструктивные особенности:

Таблица 1. Пример ядерных реакций с участием нейтронов и кремния

$N+^{28}Si \rightarrow$	$\alpha+^{28}Mg$
	$p+^{28}Al$
	$3\alpha+2p+3n+^{12}C$

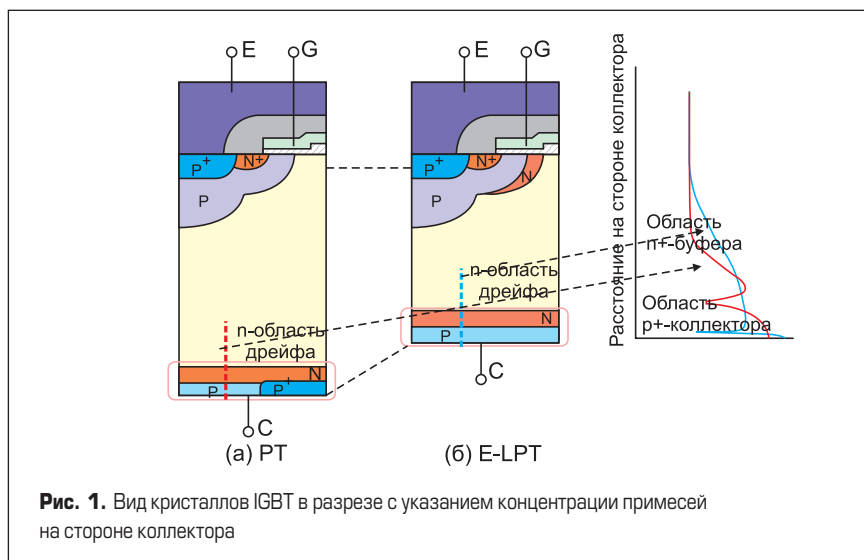


Рис. 1. Вид кристаллов IGBT в разрезе с указанием концентрации примесей на стороне коллектора

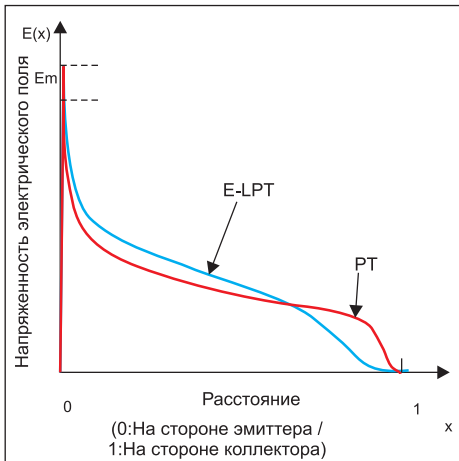


Рис. 2. Сравнение напряженности электрического поля для двух различных кристаллов IGBT с запирающим напряжением 6,5 кВ

- слаболегированный толстый *n*-буфер в сочетании с *p*-коллектором мелкой структуры;
- толстый слой *n*-области дрейфа с увеличенным временем жизни носителей заряда;
- ячейка затвора МОП-структуры с дополнительным *n*-слоем.

Рис. 1 позволяет провести сравнение IGBT типа E-LPT и обыкновенного IGBT на эффекте смыкания (PT) в разрезе с указанием концентрации примесей на стороне коллектора [6].

На рис. 2 показаны упрощенные графики напряженности электрического поля для обоих IGBT при постоянном запирающем напряжении 6,5 кВ. В транзисторе E-LPT оптимизирована форма кривой напряженности электрического поля — в частности, реализован спад ее на стороне коллектора.

Структура LPT с оптимизированным временем жизни носителей заряда, подобная той, которая применяется в IGBT типа E-LPT, применена также во вновь разработанном диодном кристалле, используемом в качестве обратного диода.

Экспериментальная проверка устойчивости к воздействию космических лучей

Условия эксперимента

Эксперимент по нейтронному облучению производился в Исследовательском центре ядерной физики (Research Centre for Nuclear Physics, RCNP) университета Осаки (Япония), где спектр нейтронного пучка близко соответствует реальному атмосферному спектру, а также в другом авторитетном учреждении — Центре оружейных нейтронных исследований (Weapons Neutron Research, WNR) Лос-Аламосской национальной лаборатории в Нью-Мехико (США) (рис. 3) [5].

В опытах RCNP используется «белый» нейтронный пучок энергией до 400 МэВ с четко определенными характеристиками, вырабатываемый кольцевым циклотроном. Плотность пучка нейтронов измерялась специальным детектором протонов отдачи. Измеренный ко-

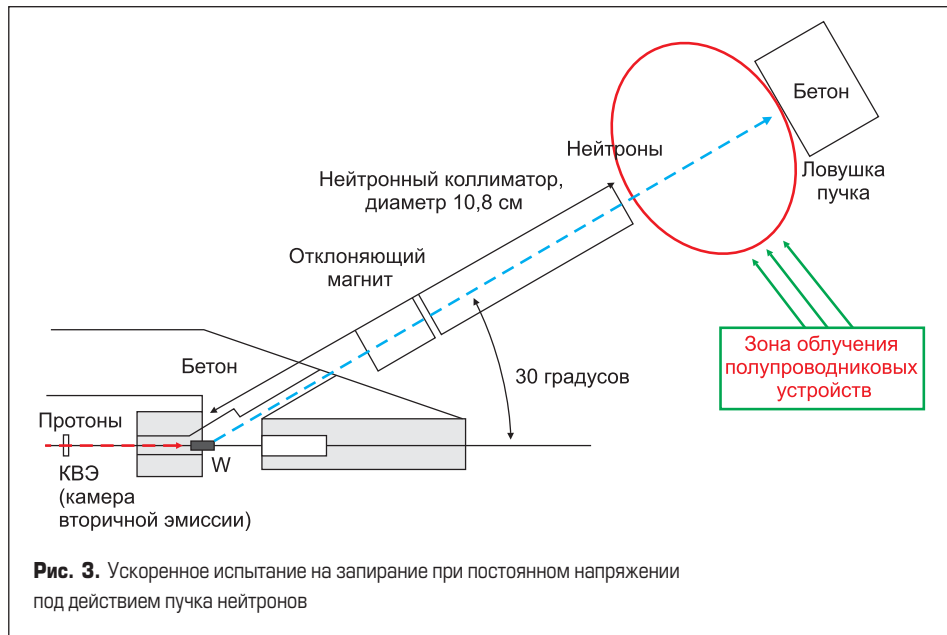


Рис. 3. Ускоренное испытание на запаривание при постоянном напряжении под действием пучка нейтронов

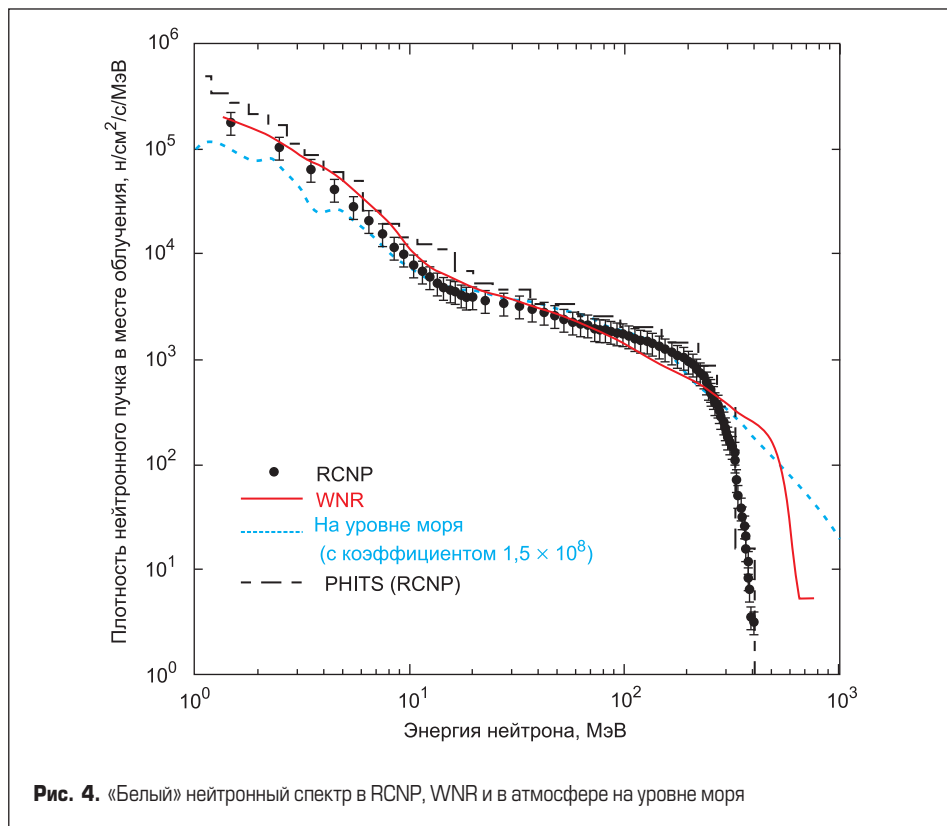


Рис. 4. «Белый» нейтронный спектр в RCNP, WNR и в атмосфере на уровне моря

эффициент плотности ускоренного нейтронного пучка примерно в $4,0-7,0 \times 10^7$ раз превышает соответствующее значение на уровне моря в Токио (Япония) (рис. 4).

В качестве объектов испытания (ОИ) выступали как кристаллы IGBT с запирающим

напряжением 6,5 кВ, так и диодные кристаллы. На транзистор E-LPT подавалось постоянное напряжение различных уровней — 4800–5200 В. В таблице 2 приведены условия эксперимента, а на рис. 5 — экспериментальная схема для испытания кристаллов IGBT.

Таблица 2. Сводка условий ускоренного эксперимента с облучением нейтронами

Объекты испытаний	IGBT с запирающим напряжением 6,5 кВ / диоды
Энергия нейтронов, МэВ	1–400
Плотность нейтронного пучка, н/см²/с	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$
Коэффициент ускорения	$4,0 - 7,0 \times 10^7$
Постоянное напряжение, В	4800–5200

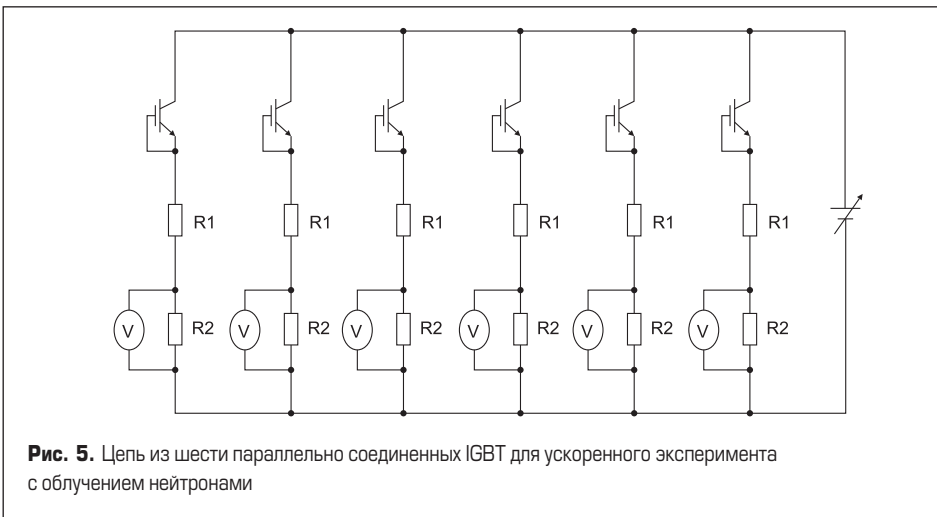


Рис. 5. Цепь из шести параллельно соединенных IGBT для ускоренного эксперимента с облучением нейтронами

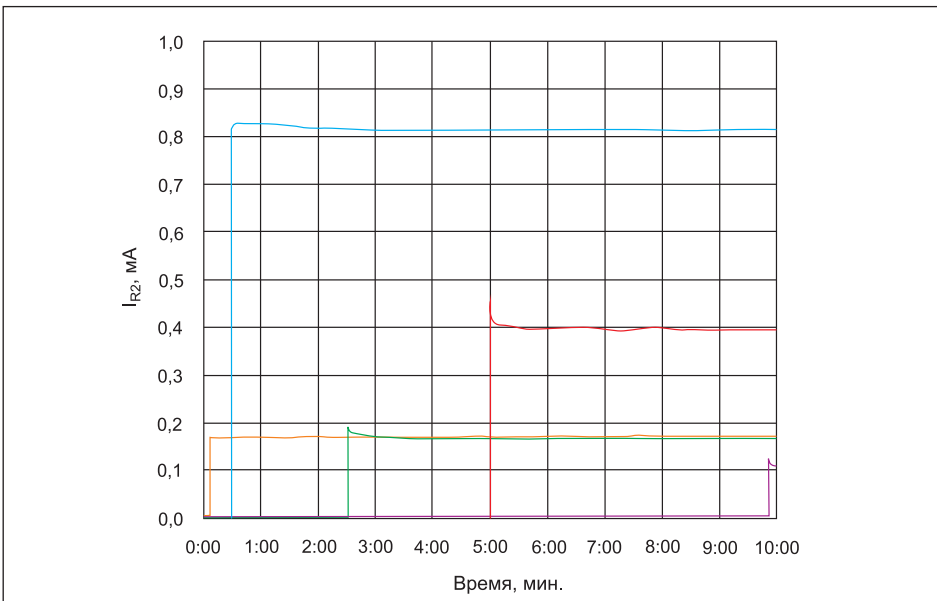


Рис. 6. Типичный результат мониторинга тока I_{R2} через IGBT типа E-LPT с запирающим напряжением 6,5 кВ при постоянном напряжении 5000 В

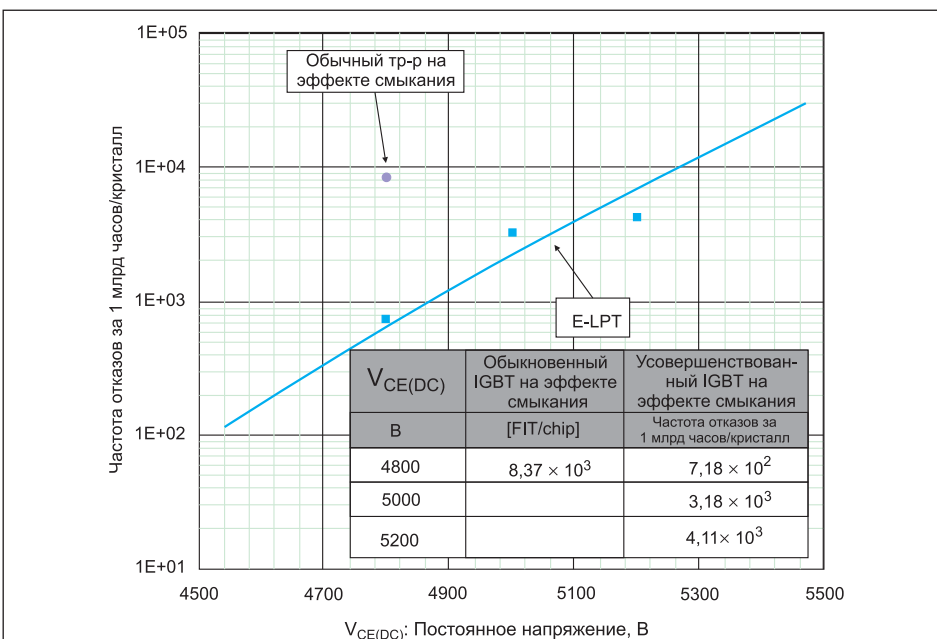


Рис. 7. Расчетная частота отказов за 1 млрд ч в расчете на один кристалл IGBT по результатам ускоренного эксперимента с облучением нейтронами

Объектами испытания были шесть параллельно соединенных кристаллов с замкнутыми накоротко затвором и эмиттером. Кроме того, с ОИ последовательно включались два резистора ($R1$ и $R2$) для защиты цепи и измерения тока утечки (I_{R2}) в ходе эксперимента. Критерием отказа служил ток I_{R2} , который измерялся косвенно через падение напряжения на резисторе $R2$ при приложенном постоянном напряжении.

Результаты эксперимента

Регистрировалось время наработки на отказ отдельных компонентов (время достижения критерия отказа, Single Event Burnout, SEB) до тех пор, пока не отказали все объекты испытаний. Типичный результат мониторинга тока I_{R2} через IGBT типа E-LPT с запирающим напряжением 6,5 кВ при постоянном напряжении 5000 В показан на рис. 6.

Обычно испытание на запирающее напряжение до отказа требует длительного времени — от нескольких месяцев до нескольких лет. Используя ускоренный режим испытания с облучением нейтронами, можно сократить сроки получения результатов.

Частоту отказов на 1 млрд ч (Failure In Time, FIT) можно рассчитать по следующей формуле согласно стандарту EIAJ EDR-4705:

$$F(t) = k \times 1/(\alpha \times t_{SEB}) \times 10^9,$$

где k — число отказов отдельных компонентов/число отсчетов; α — коэффициенты ускорения потока нейтронов; t_{SEB} — наработка на отказ отдельного компонента, ч.

Расчетная частота отказов за 1 млрд ч на один кристалл IGBT как функция постоянного напряжения показана на рис. 7. IGBT типа E-LPT демонстрирует коренное улучшение — приблизительно в 10 раз меньшую частоту отказов при напряжении 4800 В по сравнению с обыкновенными IGBT на эффекте смыкания.

Высоковольтные IGBT и диоды нового поколения

Эксперимент с нейтронным облучением позволил удостовериться, что структура типа E-LPT повышает устойчивость IGBT к отказам под действием космических лучей. Чтобы улучшить электрические характеристики при сохранении этой устойчивости, следующее поколение высоковольтных IGBT и диодов будет проектироваться с использованием новых структурных технологий.

LPT-структура на стороне коллектора будет оптимизирована с использованием технологии, предусматривающей применение более тонких пластин. Эта структура под названием LPT(II) в сочетании с новой технологией CSTVTM с увеличенным шагом ячейки будет использоваться в высоковольтных IGBT нового поколения, что приведет к резкому улучшению их характеристик [8].

На стороне эмиттера будет использоваться новая технология затвора CSTVT(III) с затвором в и-образной канавке. Будет реализо-

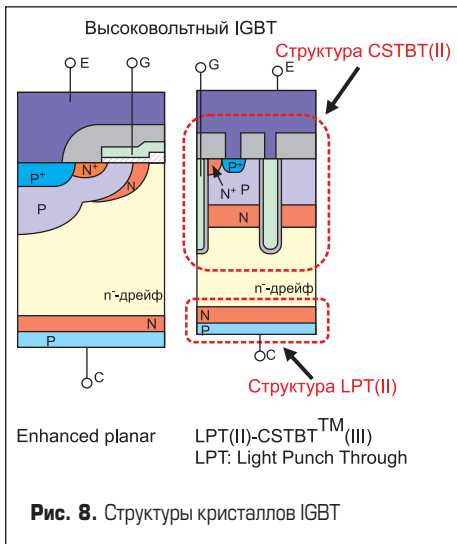


Рис. 8. Структуры кристаллов IGBT

ван *n*-слой с накоплением носителей заряда между *p*-слоем базы и *n*-слоем. Кроме того, будет улучшено распределение носителей заряда во включенном состоянии за счет введения затвора в *u*-образной канавке с дополнительными *n*⁺-*p*⁺-областями. Тем самым будет повышен КПД инжекции эмиттера, что приведет к дальнейшему снижению прямого напряжения V_{CEsat} .

Применение технологии сверхкрупномасштабной интеграции (Ultra Large Scale Integration, ULSI) обеспечит большую плотность затвора (большее количество ячеек затвора МОП-структуры на 1 см²) и будет иметь своим последствием планаризацию электрода эмиттера.

Технология LPT(II)-CSTBT(III) позволит реализовать новую технологическую кривую в масштабах всего семейства высоковольтных IGBT с номинальным напряжением от 2500 до 6500 В, как показано на рис. 8. Модельные значения V_{CEsat} получены при тех же номинальных значениях плотности тока с сохранением аналогичных значений E_{off} для сравниваемых устройств в каждом классе напряжений [8].

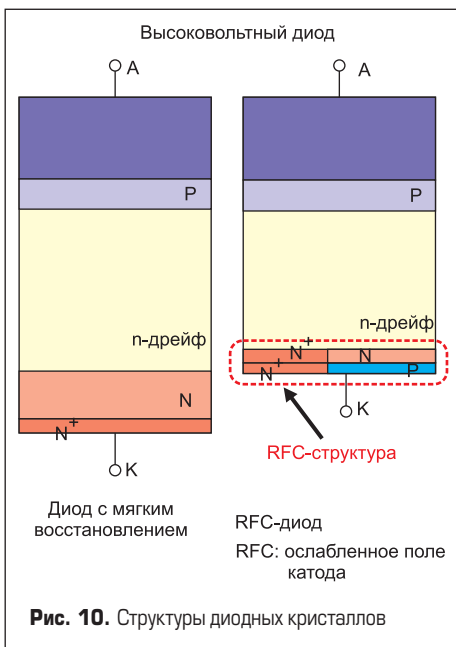


Рис. 10. Структуры диодных кристаллов

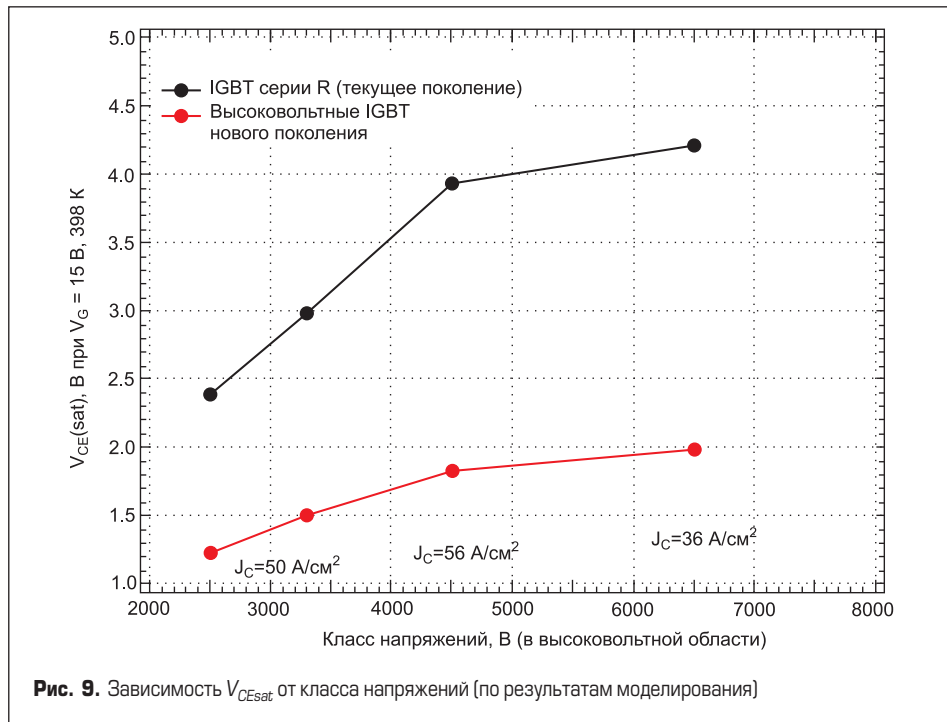


Рис. 9. Зависимость V_{CEsat} от класса напряжений (по результатам моделирования)

В основу следующего поколения высоковольтных диодов будет положена технология LPT(II) с более тонким слоем *n*-дрейфа и ослабленным полем катода (Relaxed Field of Cathode, RFC) (рис. 10). Примененная RFC-структура улучшает распределение носителей заряда при обратном восстановлении, что приводит к снижению напряжения ступенчатого восстановления в сравнении с обычным диодом мягкого восстановления на основе технологии LPT(I). В результате ожидается снижение общих потерь (по сравнению с современными диодами) при широкой области безопасной работы и безопасного ступенчатого восстановления в широком диапазоне температур (218–448 К).

На рис. 11 показаны результаты моделирования V_F для класса напряжений 2500–6500 В. Модельные значения V_F получены при тех же номинальных значениях плотности тока с сохранением аналогичных значений E_{rec} для сравниваемых устройств в каждом классе напряжений.

Выводы

Структура E-LPT обеспечивает примерно десятикратное повышение устойчивости к отказам под действием космических лучей в сравнении с обычными IGBT на эффекте смыкания, что было подтверждено экспериментом с облучением нейтронами. В эле-

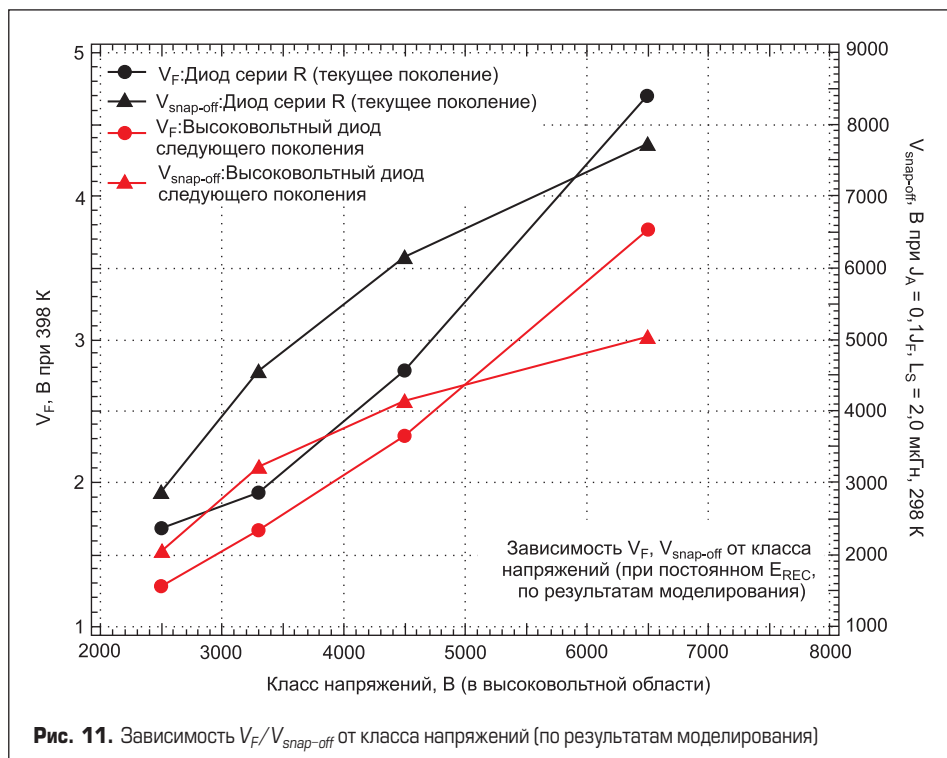


Рис. 11. Зависимость $V_F/V_{snap-off}$ от класса напряжений (по результатам моделирования)

дующем поколении высоковольтных IGBT и диодов будет сохранена эта устойчивость при одновременном улучшении электрических характеристик за счет оптимизированной LPT-структуры.

В статье кратко рассмотрены потенциальные усовершенствования в модулях высоковольтных IGBT следующего поколения по результатам моделирования. При использовании технологий CSTBT(III) и LPT(II) можно ожидать дальнейшего снижения V_{CEsat} и V_F в следующем поколении модулей высоковольтных IGBT компании Mitsubishi.

Литература

1. Kabza H. et al. Cosmic Radiation as a Cause for Power Device Failure and Possible Countermeasures // ISPSD. 1994.
2. Matsuda H. et al. Analysis of GTO Failure Mode during DC voltage blocking // ISPSD. 1994.
3. Zeller H. R. Cosmic Ray Induced Breakdown in High Voltage Semiconductor Devices, Microscopic Model and Phenomenological Lifetime Prediction. // ISPSD. 1994.
4. Findeisen C. et al. Extrapolation of cosmic ray induced failures from test to field conditions for IGBT modules. // Microelectronics Reliability. 1998.
5. Sugimoto K. et al. Errors and Failures Caused by Terrestrial Neutron Induced by Cosmic Rays // Semiconductor devices and materials forum in Kumamoto. 2010.
6. Nakamura K. et al. Impact of an LPT(II) Concept with Thin Wafer Process Technology for IGBT's Vertical Structure. // ISPSD. 2009.
7. Nishida S. et al. // Cosmic Ray Ruggedness of IGBTs for Hybrid Vehicles // ISPSD. 2010.
8. Nakamura K. et al. Wide Cell Pitch LPT(II)-CSTBT(III)Technology Rating up to 6500V for Low Loss // ISPSD. 2010.