

# Оптимизация частотных свойств кремниевых IGBT,

## предназначенных для работы с SiC-диодами Шоттки в гибридных модулях

**Предложен метод определения оптимальных характеристик кристаллов кремниевых быстрых IGBT, предназначенных для совместной работы с SiC SBD в гибридных модулях. Найдены оптимальные дозы протонного облучения и определены оптимальные статические и динамические характеристики 1200 В IGBT для гибридных модулей, комплектующих DC/DC-конвертеры с рабочей частотой преобразования до 50 кГц.**

Алексей Сурма<sup>1</sup>

Дмитрий Титушкин<sup>1</sup>

d.titushkin@proton-electrotex.com

Денис Малый<sup>1</sup>

Владимир Веревкин<sup>1</sup>

Кирилл Волобуев<sup>1</sup>

### Введение

Одно из перспективных направлений развития мощных источников вторичного электропитания в полупроводниковой силовой электронике основано на применении гибридных полупроводниковых ключей, активными элементами которых являются кремниевые IGBT и SiC-диоды Шоттки. Использование диодов Шоттки позволяет радикально уменьшить составляющую мощности потерь в диоде, зависящую от частоты, а также снизить энергию потерь IGBT при включении, расширить область безопасной работы в режимах, характерных для силовой электроники. Применение же кремниевого IGBT позволяет оптимизировать стоимость устройства.

Упомянутые предпосылки к снижению составляющей мощности потерь, зависящей от частоты, делают актуальным улучшение частотных характеристик IGBT, так как именно этот элемент лимитирует частотную характеристику всего гибридного ключа.

Далее рассмотрены аспекты оптимизации кремниевого IGBT с применением технологии протонного облучения для улучшения частотных характеристик.

### Экспериментальные образцы

В качестве экспериментальных образцов использовались чипы Trench Field Stop IGBT, рассчитанные на блокирующие напряжения до 1200 В и номинальный ток до 200 А с толщиной 125 мкм.

Увеличение быстродействия IGBT достигалось с помощью протонного облучения, технология которого подробно описана в [1]. Доза протонного облучения варьировалась, что позволяло получить кристаллы с различным сочетанием статических и динамических характеристик, при этом длина пробега протонов водорода не изменялась.

Экспериментальные IGBT предназначались для совместной работы с SiC-диодами Шоттки в составе гибридных Si/SiC-модулей.

На экспериментальных модулях проведены измерения следующих характеристик:

- напряжение насыщения коллектор-эмиттер — ( $V_{ce sat}$ ). Условия измерений: температура  $p-n$ -перехода +25 и +150 °С; значение тока коллектора  $I_c = 0,25 \times I_{nom}$  и  $I_c = I_{nom}$ ; напряжение затвор-эмиттер 15 В;
- энергия потерь при включении  $E_{on}$ , энергия потерь при выключении  $E_{off}$ . Условия измерений: температура  $p-n$ -перехода +25 и +150 °С; напряжение коллектор-эмиттер 600 В; напряжение затвор-эмиттер  $\pm 15$  В; сопротивление в цепи затвора 2,2 Ом; паразитная индуктивность контура DC испытательной установки не более 35 нГн; ток коллектора от  $0,4 \times I_{nom}$  до  $1,5 \times I_{nom}$ . Паразитная индуктивность конструкции модуля составляла около 20 нГн.

### Дозовые зависимости $V_{ce}$ , $E_{on}$ , $E_{off}$

Типичные зависимости  $V_{ce sat}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  IGBT от дозы (интегрального потока —  $\Phi$ ) протонов приведены на рис. 1, 2.

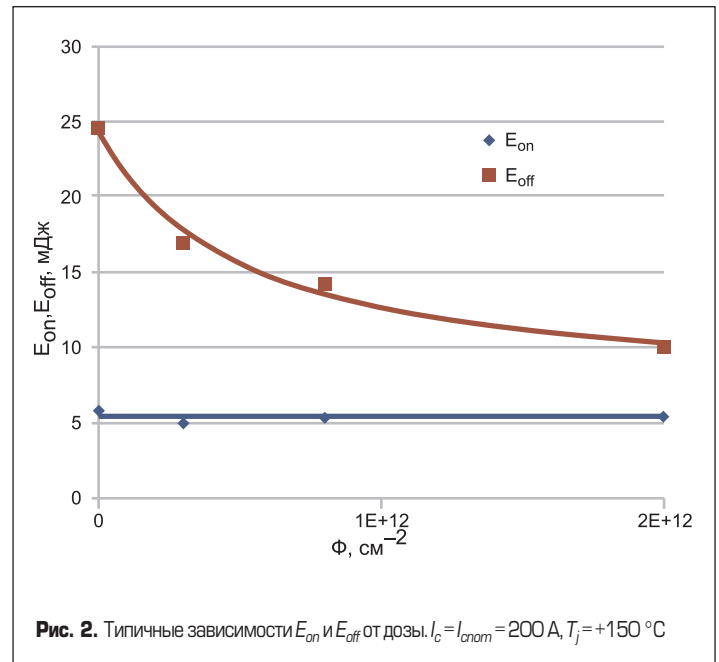
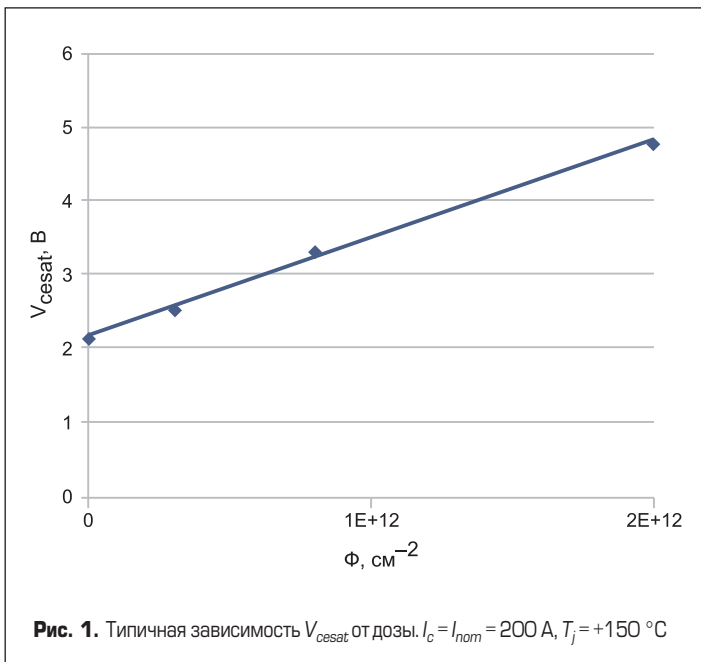
Зависимость  $V_{ce sat}$  хорошо аппроксимируется линейной функцией:

$$V_{ce sat}(\Phi) \approx V_{00} + K_{v0} \times \Phi. \quad (1)$$

Аналогично (1) можно аппроксимировать и дозовые зависимости компонентов кусочно-линейного приближения зависимости  $V_{ce sat}$  от тока, напряжение отсечки ( $V_{T0}$ ) и динамическое сопротивление  $r_T$ :

$$\begin{aligned} V_{T0}(\Phi) &\approx V_{T00} + K_{T00} \times \Phi, \\ r_T(\Phi) &\approx r_{T00} + K_{rT0} \times \Phi. \end{aligned} \quad (2)$$

<sup>1</sup>АО «Протон-Электротекс»



На рис. 2 видно, что дозовая зависимость  $E_{on}$  при использовании в модулях SiC SBD практически отсутствует, а само значение  $E_{on}$ , измеренное в «номинальном» режиме, приведенном выше ( $E_{on\_nom}$ ), довольно мало.

Анализ характера дозовой зависимости  $E_{off}$  показывает, что она может быть аппроксимирована соотношением:

$$E_{off\_nom} \approx E_{off0} + \frac{E_{off1}}{1 + \Phi/\Phi_1}, \quad (3)$$

где  $E_{off\_nom}$  — само значение  $E_{off}$  измеренное в «номинальном» режиме, приведенном выше;  $E_{off0}$  — составляющая энергии потерь, не зависящая от радиационной обработки;  $E_{off1}$  — составляющая энергии потерь, зависящая от радиационной обработки;  $\Phi_1$  — константа.

Зависимости  $E_{on}$  и  $E_{off}$  от тока и напряжения приблизительно прямо пропорциональны:

$$\begin{aligned} E_{on}(\Phi, I_c, V_{ce}) &\approx E_{on\_nom}(\Phi) \frac{I_c}{I_{c\_nom}} \times \frac{V_{ce}}{V_{ce0,5nom}}, \\ E_{off}(\Phi, I_c, V_{ce}) &\approx E_{off\_nom}(\Phi) \frac{I_c}{I_{c\_nom}} \times \frac{V_{ce}}{V_{ce0,5nom}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_{c\_nom} = 200$  А — номинальный коллекторный ток;  $V_{ce0,5nom} = 600$  В — напряжение коллектор-эмиттер при измерениях в номинальном режиме.

### Концепция оптимизации

Мощность потерь IGBT ( $P_{loss}$ ) складывается из статической и динамической составляющих. Статическая вызвана в основном протеканием тока коллектора через включенный прибор и зависит от тока и напряжения насыщения коллектор-эмиттер ( $V_{cesat}$ ), но не зависит от частоты. Динамическая вызвана рассеянием энергии в переходных процессах включения и выключения и прямо пропорциональна частоте ( $f$ ).

Технология улучшения частотных характеристик (в данном случае — протонное облучение) позволяет уменьшить динамическую составляющую мощности потерь, однако ценой увеличения статической составляющей, при этом первая монотонно снижается, а последняя монотонно возрастает с увеличением дозы облучения [1, 2].

Таким образом, при разных дозах облучения для любого конкретного режима работы ключа в устройстве мы получим семейство зависимостей мощности потерь от частоты, подобное изображенному на рис. 3. Огибающая этого семейства, показанная на рис. 3 красной

линией, является, по сути, лимитной линией, которая соответствует наименьшей мощности потерь ключа данной конструкции и технологического исполнения, работающего в некотором конкретном режиме. Каждая точка этой лимитной линии соответствует некоторой оптимальной дозе протонного облучения, которая при использовании ключа на данной частоте позволит получить минимальную мощность потерь. Эту оптимальную дозу облучения можно определить из условия локального минимума энергии потерь:

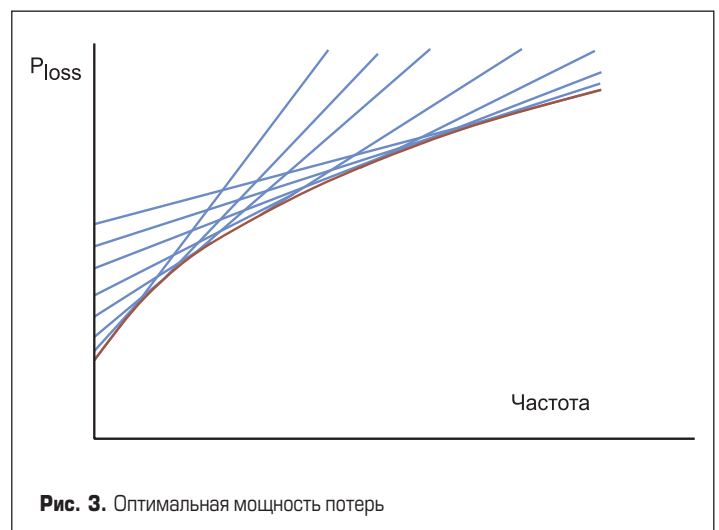
$$dP_{loss}(\Phi; f; I_c; V_{ce})/d\Phi = 0. \quad (5)$$

Зная зависимости от дозы протонного облучения таких характеристик IGBT, как  $V_{ce}(V_{TO}, r_T)$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  нетрудно построить конкретную лимитную линию и определить минимальную мощность потерь ключа при выбранной частоте коммутации, необходимую оптимальную дозу протонного облучения и соответствующие этой дозе оптимальные значения  $V_{ce}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ .

### Определение оптимальных характеристик гибридного ключа, работающего в составе источника вторичного электропитания

Определим оптимальные характеристики IGBT для гибридного ключа чопперного типа, работающего в составе понижающего DC/DC-преобразователя со следующими характеристиками:

- постоянное напряжение на входе: 560 В;
- постоянное напряжение на выходе: 300 В;
- ток на выходе: до 100 А.



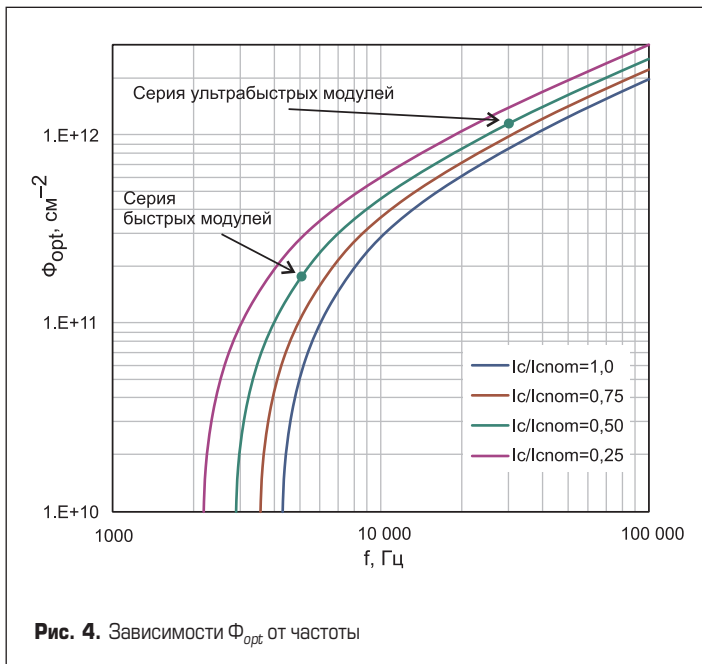


Рис. 4. Зависимости  $\Phi_{opt}$  от частоты

Используя соотношение (5) с учетом зависимостей (2)–(4), нетрудно получить формулу, связывающую значение оптимальной дозы облучения ( $\Phi_{opt}$ ) с частотой и значениями коллекторного напряжения и тока:

$$\Phi_{opt} = \Phi_1 \left[ \sqrt{\frac{f V_{ce}}{\theta V_{ce}^{0,5nom}} \frac{E_{off1}}{\Phi_1 I_c^{nom} (K_{T00} + I_c K_{rT0})}} - 1 \right], \quad (6)$$

где  $\theta = 0,54$  — коэффициент заполнения тока при работе IGBT в преобразователе.

На рис. 4 приведены зависимости  $\Phi_{opt}$  от частоты для различных  $I_c/I_{cном}$ .

На рис. 5 приведена лимитная линия минимальной мощности потерь в IGBT, рассчитанная с использованием зависимости  $\Phi_{opt}$  при  $I_c/I_{cном} = 0,5$ . Видно, что эта линия в частотном диапазоне до 50 кГц может быть достаточно хорошо аппроксимирована частотными зависимостями мощности потерь двух серий модулей — fast и ultrafast, дозы облучения IGBT для которых отмечены точками на рис. 4.

Как видно из рисунка, использование серии fast оптимально до частоты 12 кГц, серии ultrafast — на частотах выше 12 кГц. В обоих случаях предельная рабочая частота прибора ограничена максимальной мощностью теплоотвода охладителя и, следовательно, температурой основания IGBT-модуля (для примера выбрано жидкостное охлаждение).

Если считать номинальным током описанных выше гибридных модулей 100 А, то типичные основные характеристики IGBT при температуре +150 °С будут следующими:

- для серии fast:  $V_{cesat} = 1,62$  В,  $E_{on} = 2,75$  мДж,  $E_{off} = 10$  мДж;
- для серии ultrafast:  $V_{cesat} = 2,5$  В,  $E_{on} = 2,75$  мДж,  $E_{off} = 6$  мДж.

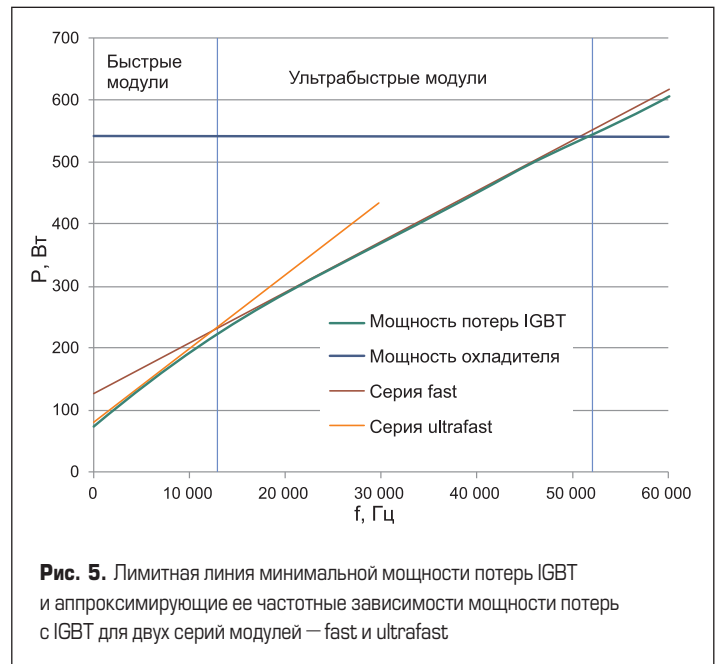


Рис. 5. Лимитная линия минимальной мощности потерь IGBT и аппроксимирующие ее частотные зависимости мощности потерь с IGBT для двух серий модулей — fast и ultrafast

### Заключение

Предложен метод определения оптимальных характеристик кристаллов кремниевых быстрых IGBT, предназначенных для совместной работы с SiC SBD в гибридных модулях. Найдены оптимальные дозы протонного облучения и определены оптимальные статические и динамические характеристики 1200 В IGBT для гибридных модулей, комплектующих DC/DC-конвертеры с рабочей частотой преобразования до 50 кГц.

Следует отметить, что применение IGBT другого дизайна и с другой технологией повышения быстродействия, а также изменение топологии и режима работы конвертера, конечно, приведет к изменению численных значений параметров и констант, использованных в данном методе. Однако можно ожидать, что сама структура предложенных формул не изменится.

### Литература

1. Fujihira T., Otsuki M., Ikawa O., Nishiura A., Fujishima N. The State-of-The-Art and Future Trend of Power Semiconductor Devices. Proc. PCIM Europe 2015. Nurnberg, 2015.
2. Nakajima A., Nishizawa S., Ohashi H., Saito W. Theoretical Loss Analysis of Power Converters with 1200 V Class Si-IGBT and SiC-MOSFET. Proc. PCIM Europe 2015. Nurnberg, 2015.
3. Surma A. M., Verevkin V. V., Volobuev K. A. Optimizing Properties of Fast IGBT and FRD with Partially Diffused Proton Beam Irradiation. Proc. EPE ECCE 2019. Genova, 2019.
4. Surma A., Volobuev K., Kulevoy T., Stolbunov V. Using Proton Irradiation with Initial Energy over 10 MeV to Improve Turn-off Time of High Power IGBT and FWD. Proc. ICEPDS 2018. Novocherkassk, 2018.