

# Радиационная технология

## прецизионного управления параметрами высоковольтных тиристоров

**В статье рассматривается технология обеспечения малого разброса статических и динамических параметров силовых высоковольтных тиристоров, адаптированных для последовательного и параллельного включения в высоковольтных линиях электропередачи и импульсных преобразователях. Приведены результаты применения нового метода контроля режимов облучения ускоренными электронами, дающего возможность прецизионно контролировать характеристики тиристоров.**

**Алексей Сурма, к. т. н.  
Владимир Кисляков**

inbox@proton-electrotex.com

В связи с ростом мощности преобразовательных устройств силовой полупроводниковой электроники все более востребованными сегодня становятся высоковольтные и сильноточные тиристоры, адаптированные для применения в последовательном и/или параллельном соединениях.

Тиристоры, комплекующие параллельные сборки, должны иметь высокую идентичность ВАХ во включенном состоянии; тиристоры для применения в последовательных сборках — высокую идентичность характеристик обратного восстановления. Общим требованием для всех этих применений является наличие тождественных и, желательно, минимизированных температурных зависимостей указанных характеристик.

Чтобы этого добиться, необходимо, во-первых, обеспечить высокую воспроизводимость распределений донорных и акцепторных примесей в слоях полупроводникового элемента тиристора. Современные технологии и оборудование имплантации и диффузии, применение в качестве исходной подложки высококачественного «силового» нейтронно-легированного кремния, как правило, позволяют решить эту задачу.

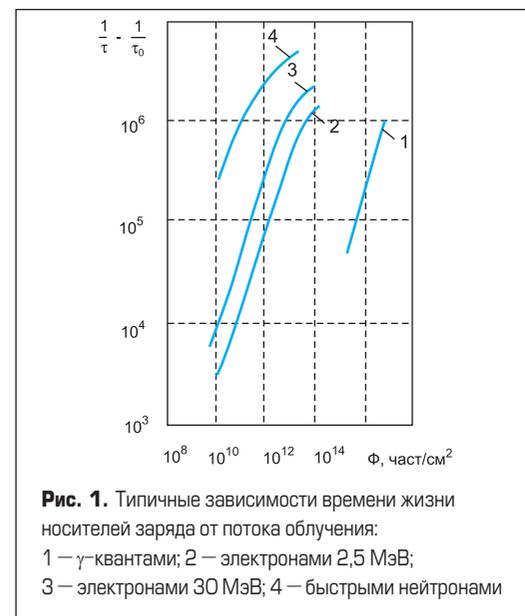
Во-вторых, необходимо обеспечить равное время жизни носителей заряда в слоях тиристора. Решение этой задачи для современных высоковольтных тиристоров на напряжения свыше 4000 В имеет следующую трудность. Необходимые для получения удовлетворительно низкого падения напряжения во включенном состоянии значения времени жизни носителей заряда ( $\tau$ ) в  $n$ -базе такого тиристора составляют 100–300 мкс, при значениях и типичном разбросе  $\tau$  в поставляемых партиях исходного монокристаллического кремния — 500–1000 мкс. Таким образом, достичь снижения  $\tau$  в  $n$ -базе готового элемента с требуемой точностью (разброс менее нескольких процентов, а иногда и долей процента) невозможно без учета исходного значения этой электрофизической характеристики для данного конкретного полупроводникового элемента.

Одной из эффективных технологий точного регулирования  $\tau$  и, следовательно, прецизионной под-

гонки параметров тиристорov, от него зависящих, является облучение ускоренными электронами. Снижение времени жизни неосновных носителей заряда в базе прибора происходит при этом за счет внедрения туда радиационных дефектов [1]. На рис. 1 приведены типичные зависимости величины  $1/\tau - 1/\tau_0$  (где  $\tau_0$  — значение до облучения) в кремнии от интегрального потока облучения для разных частиц [2]. Таким образом, на определенном участке доз облучения выполняется зависимость (1):

$$\Delta(1/\tau) = 1/\tau - 1/\tau_0 = K_{\tau} \Phi. \quad (1)$$

Практика показывает, что при электронном облучении высокоомного «силового» бестигельного или нейтроннолегированного кремния значение коэффициента  $K_{\tau}$  весьма стабильно и мало меняется в партиях поставляемого материала, что обеспечивает возможность прецизионного регулирования  $\tau$  в  $n$ -базе полупроводнико-



вого элемента. Необходимо, однако, обеспечить также точность и воспроизводимость плотности интегрального потока (дозы) облучения  $\Phi$ .

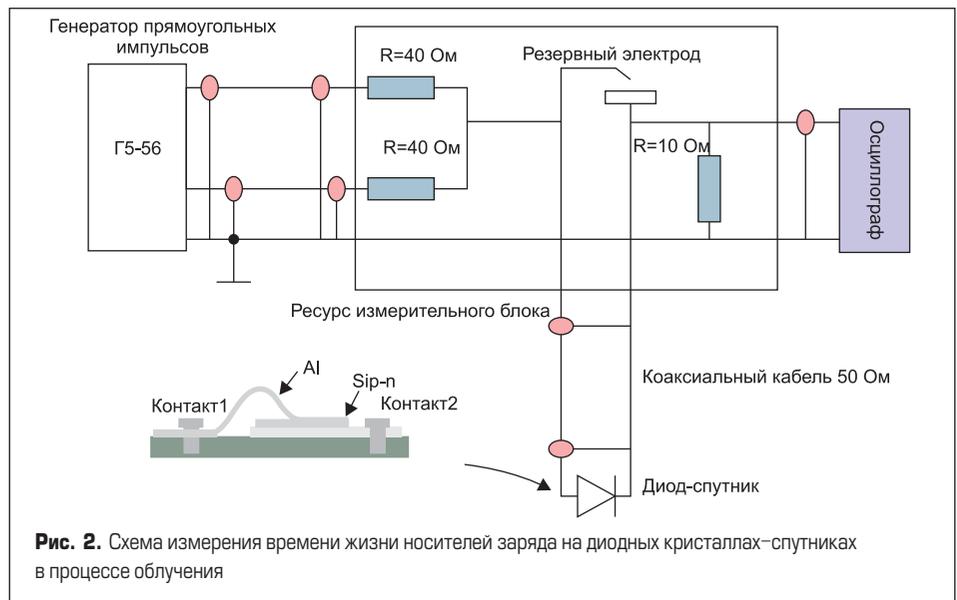
Наиболее распространенная методика контроля дозы облучения с помощью цилиндра Фарадея дает относительную погрешность 15–20% при измерении необходимых для облучения высоковольтных тиристорных доз в диапазоне  $1E11-1E12 \text{ см}^{-2}$ . Это не вполне удовлетворяет требованиям прецизионности в производстве этих полупроводниковых приборов и делает актуальным поиск альтернативных методов.

Одним из перспективных здесь представляется метод прямого измерения  $\tau$  на сопровождающих облучаемые объекты кремниевых кристаллах-спутниках. Из (1) видно, что если обеспечить прецизионность измерения времени жизни и знать коэффициент радиационной деградации  $K_r$ , то по  $\Delta(1/\tau)$  можно находить  $\Phi$ . Значения  $K_r$  и  $\tau_0$  для облучаемых тиристорных элементов и диодов спутников могут различаться, однако, зная в каждом случае величины  $\tau_0$ , а также при условии высокой стабильности констант  $K_r$ , можно всегда однозначно получить значение  $\tau$  в базе диода-спутника, при котором в  $n$ -базе тиристорного элемента будет получено свое требуемое значение времени жизни. Суть метода контроля дозы, таким образом, заключается в измерении деградации времени жизни в тестовой структуре во время процесса облучения, а прецизионность метода будет определяться:

- прецизионностью измерения  $\tau$  или связанных с ним характеристик тиристорного элемента до облучения;
- прецизионностью измерения  $\tau$  или в базе диода-спутника во время облучения;
- стабильностью  $K_r$ .

Рассмотрим аппаратно-методическую реализацию этих условий в рамках технологии прецизионного регулирования характеристик высоковольтных тиристорных элементов электронным облучением.

Измерение  $\tau$  в базе диодных кристаллов-спутников реализуется методом Лэкса [3]. Несмотря на то, что по отношению к реальной



физической величине  $\tau$  метод Лэкса может быть неточен, он имеет высокую воспроизводимость при неизменных параметрах структуры и измерения. В нашем случае по данным физикотопологического моделирования [4] при параметрах импульсов  $I_1 = 200 \text{ мА}$ ,  $I_2 = 200 \text{ мА}$  и  $t_{\text{imp}^+} = t_{\text{imp}^-} = 200 \text{ мкс}$  выполняется:

$$\tau = 2t_s \quad (2)$$

где  $t_s$  — время задержки обратного напряжения.

Диоды-спутники изготавливаются на основе высокоомного нейтронно-легированного кремния, близкого по своим характеристикам к кремнию, на котором изготавливаются тиристорные элементы, что обеспечивает стабильность значений  $K_r$ . Элементы диодов-спутников — кристаллы  $4 \times 4 \text{ мм}$ , вырезанные из пластин, прошедших по маршруту диффузионной технологии силового диода. Во время облучения диод-спутник закрепляется в центре мишени в контактной оправке, от которой в центр управления ускорителем протянут коаксиальный кабель (рис. 2).

Приведем типичные результаты прецизионного регулирования параметров тиристорных элементов облучением ускоренными электронами с энергией 6 МэВ при использовании вышеописанной методики контроля.

Для партий тиристорных элементов Т353-800-35 на средний ток 800 А и напряжение 3500 В, которые используются в последовательно-параллельных сборках в составе высоковольтных импульсных преобразователей, заказчик требует обеспечения разброса напряжения во включенном состоянии  $U_{TM}$  не более  $\pm 0,1 \text{ В}$  для равномерного распределения нагрузки при параллельном соединении тиристорных элементов. Также одновременно должно быть обеспечено ограничение импульсного тока обратного восстановления  $I_{rM}$  до величины не более 130 А. Тиристоры предварительно группируются по значениям исходного  $U_{TM}$  с «шагом» между группами 0,05 В, затем облучаются с использованием описанного выше метода. При этом удается снизить технологический разброс до  $1,8 \text{ В} \leq U_{TM} \leq 1,9 \text{ В}$ , что в два раза превышает необходимый (рис. 3), а также удовлетворить требованиям по  $I_{rM}$  (рис. 4), при этом общий

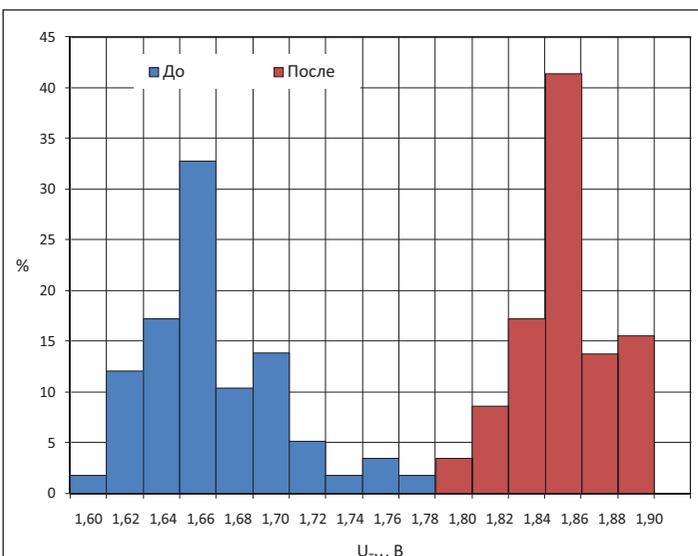


Рис. 3. Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM} = 2500 \text{ А}$ ) в партии тиристорных элементов Т353-800-35 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами

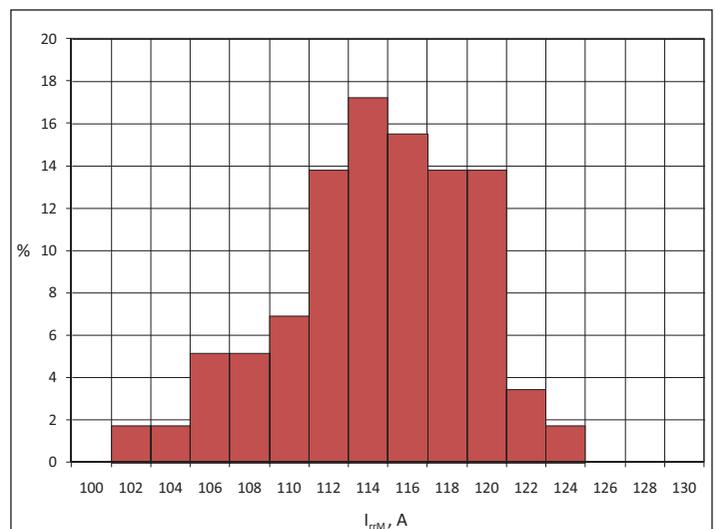
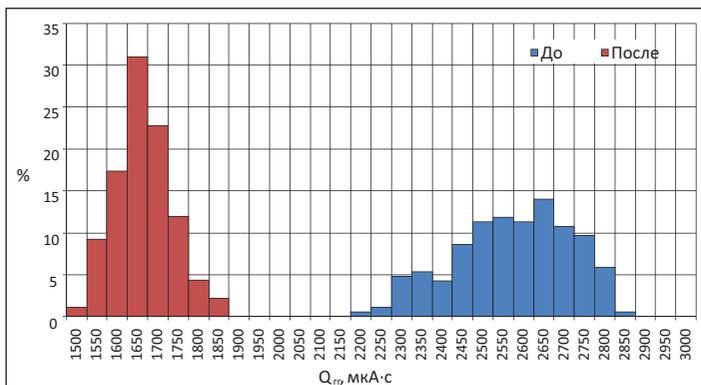
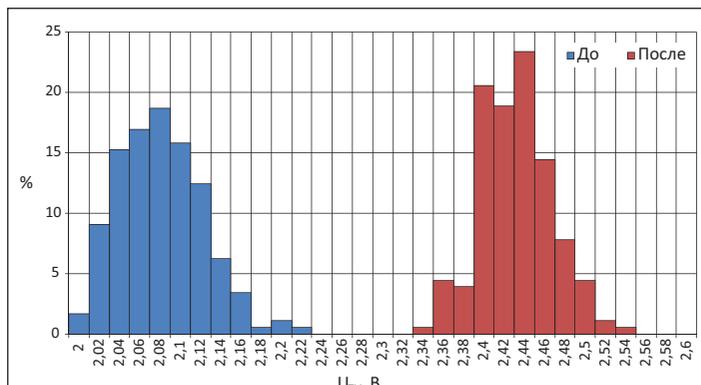


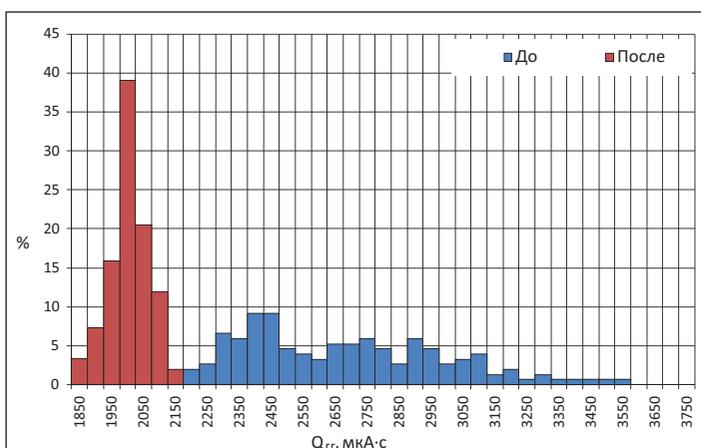
Рис. 4. Типичное статистическое распределение импульсного тока обратного восстановления  $I_{rM}$  ( $T_j = +125 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_{TM} = 800 \text{ А}$ ,  $di/dt = -5 \text{ А/мкс}$ ) в партии тиристорных элементов Т353-800-35 после прецизионной обработки ускоренными электронами



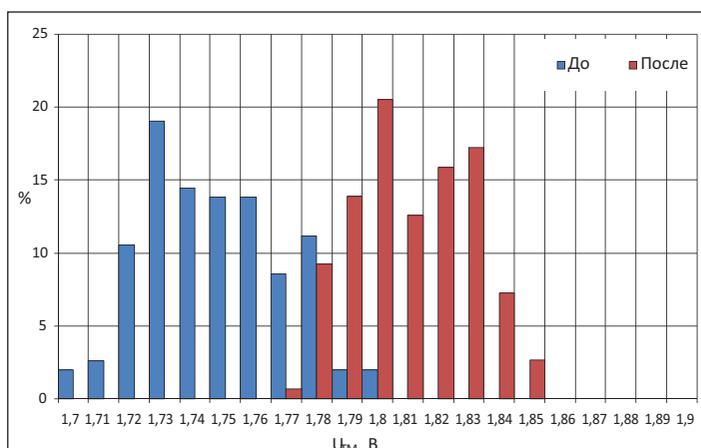
**Рис. 5.** Типичное статистическое распределение заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  ( $T_j = +125^\circ\text{C}$ ,  $I_{TM} = 320\text{ A}$ ,  $di/dt = -5\text{ A/мкс}$ ) в партии тиристорных элементов Т643-320-65 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами



**Рис. 6.** Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM} = 2500\text{ A}$ ) в партии тиристорных элементов Т643-320-65 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами



**Рис. 7.** Типичное статистическое распределение заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  ( $T_j = +125^\circ\text{C}$ ,  $I_{TM} = 1250\text{ A}$ ,  $di/dt = -5\text{ A/мкс}$ ) в партии тиристорных элементов Т273-1250-44 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами



**Рис. 8.** Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM} = 4000\text{ A}$ ) в партии тиристорных элементов Т273-1250-44 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами

процент выхода приборов с указанным сочетанием параметров превышает 95%.

Для тиристоров Т643-320-65 на средний ток 320 А и напряжение 6500 В, адаптированных для последовательного соединения, прецизионная технология регулировки заряда обратного восстановления позволяет снизить разброс  $Q_{rr}$  в партии до значений  $\pm 70-80\text{ мкКл}$  (рис. 5). Разброс значений  $U_{TM}$  при этом также минимизирован (рис. 6).

На рис. 7 показано изменение разброса заряда обратного восстановления в партиях высоковольтных тиристоров Т273-1250-44 на ток 1250 А и напряжение 4400 В после проведения операций прецизионного облучения. На рис. 8 приведены соответствующие статистические рас-

пределения падения напряжения во включенном состоянии. Видно, что разброс заряда обратного восстановления в массовых партиях тиристоров снижается до величины менее 5%. Разброс величин падения напряжения во включенном состоянии после проведения операций прецизионного облучения составляет менее  $\pm 0,05\text{ В}$ , что облегчает согласование работы тиристорov в параллельном соединении, если это требуется.

Таким образом, радиационно-технологические методы прецизионного регулирования характеристик высоковольтных тиристорov, адаптированных для параллельно-последовательного соединения, позволяют в массовых партиях снизить разброс  $U_{TM}$  до величин не более  $\pm 0,05\text{ В}$  при разбросе  $Q_{rr}$  не более 5%.

**Литература**

1. Carlson R.O., Sun Y.S., Assalit H.B. Lifetime control in silicon power devices by electron or gamma irradiation // Electron Devices, IEEE Transactions on. 1977. № 24.
2. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М: Сов. Радио. 1980.
3. Lax V. Transient Response of a PN Junction // J. Appl. Phys. 1954. № 25.
4. Филатов Н. И., Лонгинов В. В. Система смешанного приборно-схематехнического моделирования БИС ИСТОК // 35 Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau. DDR. 1990.