

# **Технология прецизионной регулировки статических и динамических параметров высоковольтных тиристоров**

Сурма А.М., Кисляков В.С.  
Научно-технический центр ЗАО «Протон-Электротекс»



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

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, комплектующие 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 идентичных и, желательно, минимизированных температурных зависимостей указанных характеристик.

Для получения идентичности указанных выше характеристик тиристоров 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 идентичность времени жизни носителей заряда в слоях тиристора. Решение этой задачи для современных высоковольтных тиристоров на напряжения свыше 4000 В имеет следующее затруднение. 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 монокристаллическом кремнии – 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 этого конкретного полупроводникового элемента.

Одной из эффективных технологий точного регулирования  $\tau$  и, следовательно прецизионной подгонки параметров тиристоров, 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  $1/\tau - 1/t_0$  (где  $t_0$  – значение до облучения) в кремнии от интегрального потока облучения для разных частиц [2]. Таким образом, на определенном участке доз облучения выполняется зависимость (1):

$$\Delta \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = K_{\tau} \Phi \quad (1),$$

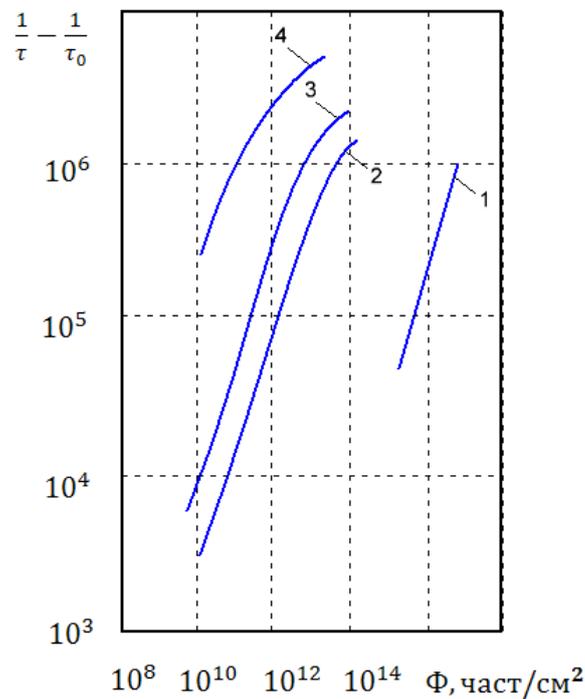


Рисунок 1. Типичные зависимости времени жизни носителей заряда от потока облучения: 1 –  $\gamma$ -квантами, 2 – электронами 2,5 МэВ, 3 – электронами 30 МэВ, 4 – быстрыми нейтронами.

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 полупроводникового элемента. Необходимо, однако, также обеспечить 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 тиристоров доз в диапазоне



$1E11-1E12$  см<sup>-2</sup>. 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  $K_\tau$ , то по  $\Delta \frac{1}{\tau}$  можно находить  $\Phi$ . Значения  $K_\tau$  и  $t_0$  для облучаемых тиристорных элементов и диодов спутников могут различаться, однако зная в каждом случае величины  $t_0$ , а также при условии высокой стабильности констант  $K_\tau$ , 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:

1. Прецизионностью измерения  $\tau$  или связанных с ним характеристик тиристорного элемента до облучения;
2. Прецизионностью измерения  $\tau$  или в базе диода-спутника во время облучения;
3. Стабильностью  $K_\tau$ .

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

Измерение в базе диодных кристаллов-спутников реализуется методом Лэкса [3]. Несмотря на то, что по отношению к реальной физической величине метод Лэкса может быть не точен, он имеет высокую воспроизводимость при неизменных параметрах структуры и измерения. В нашем случае по данным физико-топологического моделирования [4] при параметрах импульсов  $I_1 = 200$  мА,  $I_2 = 100$  мА и  $t_{imp}^+ = t_{imp}^- = 200$  мкс, и выполняется:

$$\tau = 2\tau_{п}, \quad (3), \text{ или } (2)?$$

Диоды-спутники изготавливаются на основе высокоомного нейтронно-легированного кремния, близкого по своим характеристикам к кремнию, на котором изготавливаются тиристорные элементы, что обеспечивает стабильность значений  $K_\tau$ . Элементы диодов-спутников – кристаллы 4×4 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 протянут коаксиальный кабель в центр управления ускорителем (рис. 2).

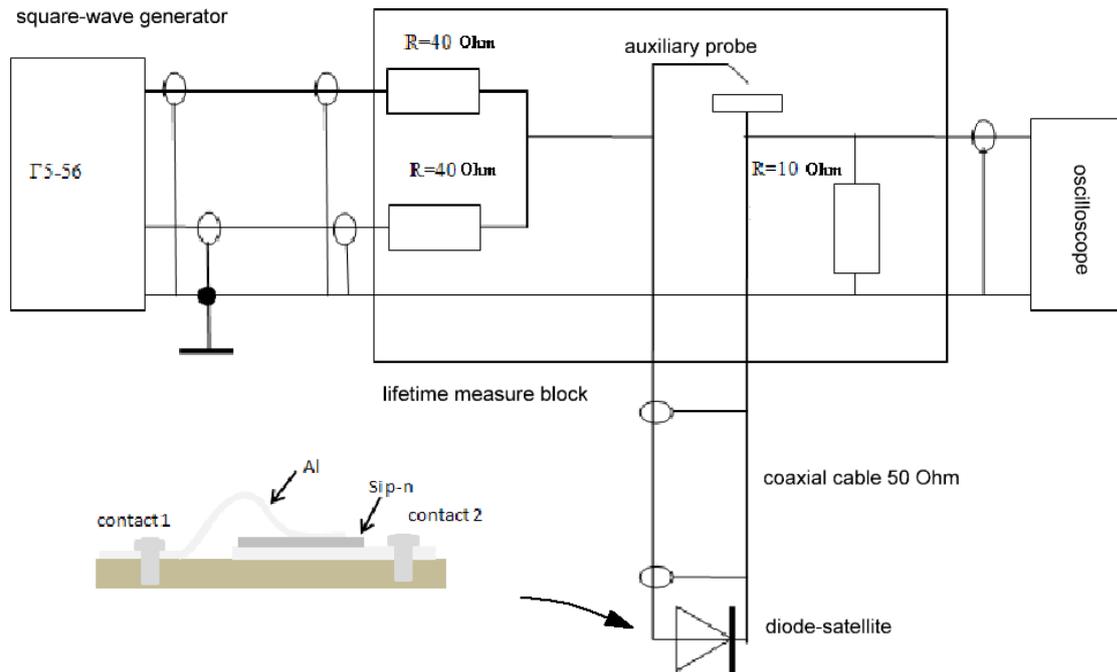


Рисунок 2. Схема измерения времени жизни носителей заряда на диодных кристаллах-спутниках в процессе облучения.

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

Для партий тиристоров Т353-800-35 на средний ток 800 А, напряжение 3500В, которые используются в последовательно-параллельных сборках в составе высоковольтных импульсных преобразователей, заказчик требует обеспечения разброса напряжения во включенном состоянии  $U_{TM}$  не более  $\pm 0,1В$  для равномерного распределения нагрузки при параллельном соединении тиристоров, также, одновременно, должно быть обеспечено ограничение импульсного тока обратного восстановления  $I_{rrM}$  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 удастся снизить технологический разброс до  $1.8 В \leq U_{tm} \leq 1.9 В$ , что в два раза превышает необходимый (рис. 3), а также удовлетворить требованиям по  $I_{rrM}$  (рис. 4), при этом общий процент выхода приборов с указанным сочетанием параметров превышает 95%.

Для тиристоров Т643-320-65 на средний ток 320 А, напряжение 6500 В, адаптированных для последовательного соединения, прецизионная технология регулировки заряда обратного восстановления позволяет снизить разброс  $Q_{rr}$  в партии до значений  $\pm 70-80$  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, напряжение 4400 В, после проведения операций прецизионного облучения. На рис. 8 показаны соответствующие статистические распределения падения напряжения во включенном состоянии. Из рисунков 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  $\pm 0,05$  В, что облегчает согласование работы тиристоров в параллельном соединении, если это требуется.

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

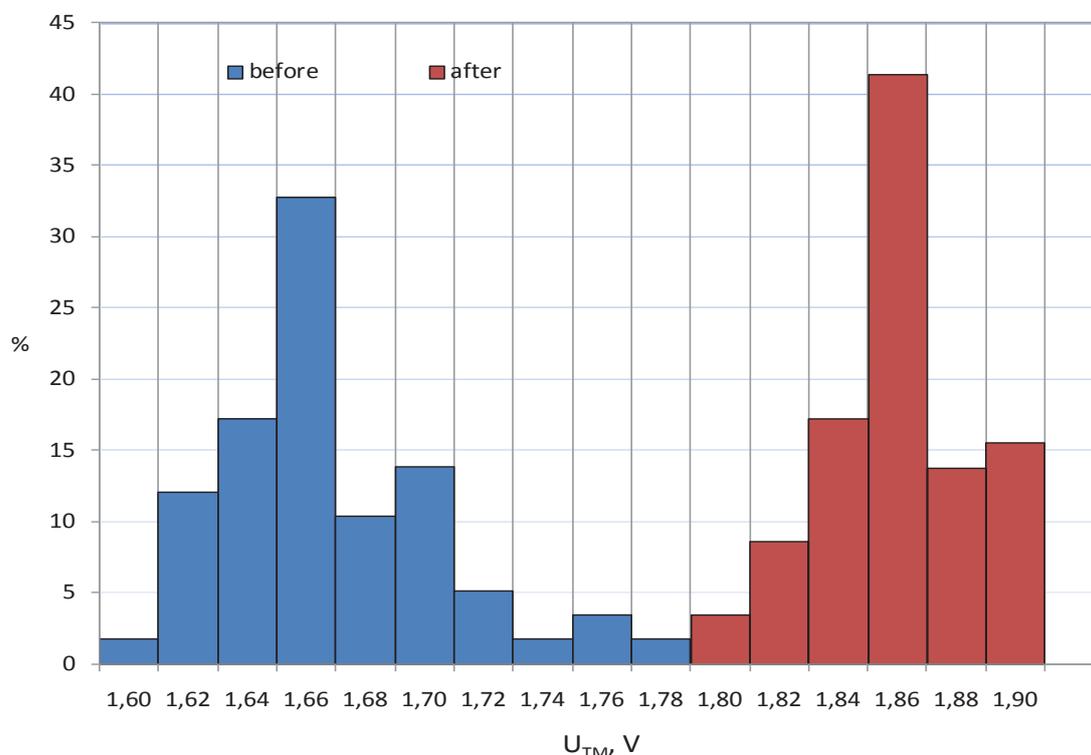


Рисунок 3. Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM}=2500A$ ) в партии тиристорных элементов Т353-800-35 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами.

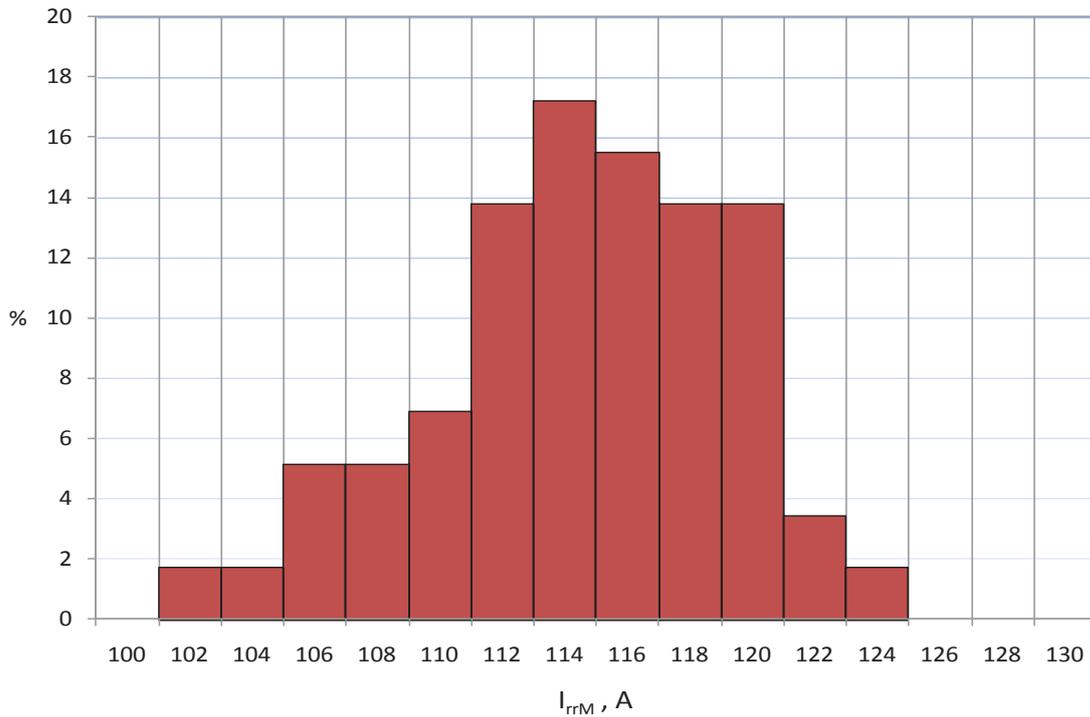


Рисунок 4. Типичное статистическое распределение импульсного тока обратного восстановления  $I_{rrM}$  ( $T_j=125C$ ,  $I_{TM}=800A$ ,  $di/dt=-5A/\mu c$ ) в партии тиристорных элементов T353-800-35 после прецизионной обработки ускоренными электронами.

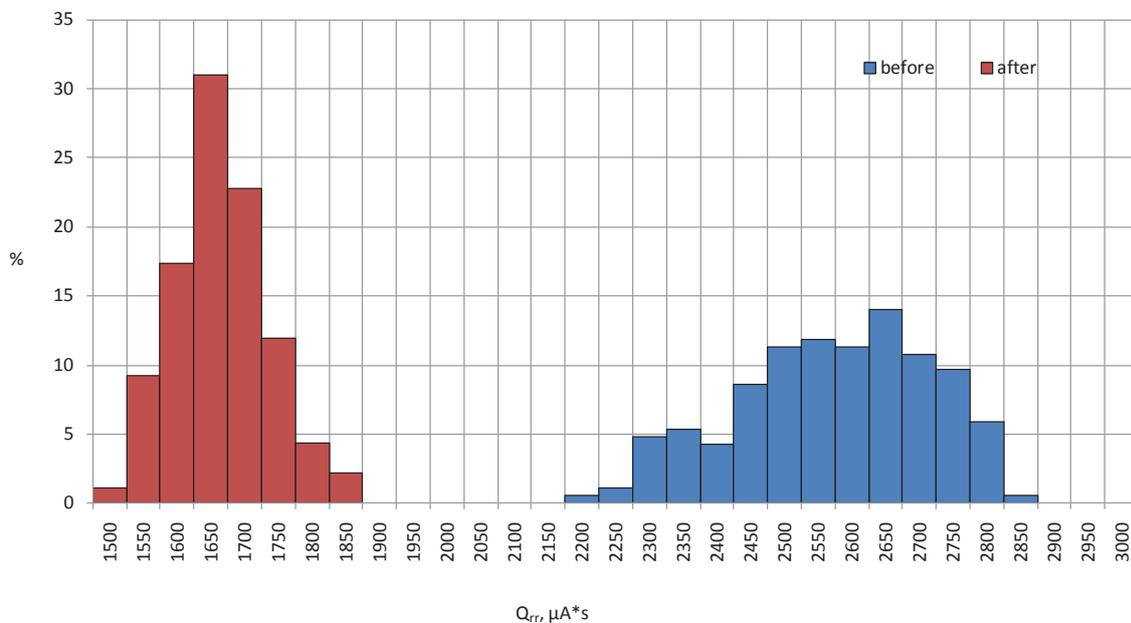


Рисунок 5. Типичное статистическое распределение заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  ( $T_j=125C$ ,  $I_{TM}=320A$ ,  $di/dt=-5A/\mu c$ ) в партии тиристорных элементов T643-320-65 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами.

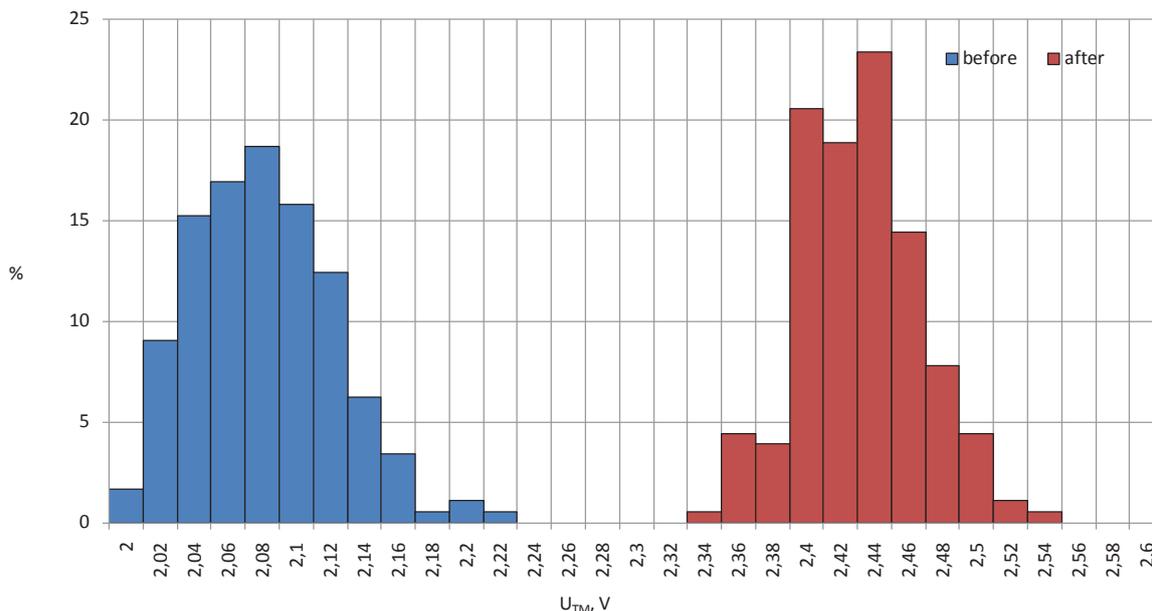


Рисунок 6. Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM}=2500A$ ) в партии тиристорных элементов T643-320-65 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами.

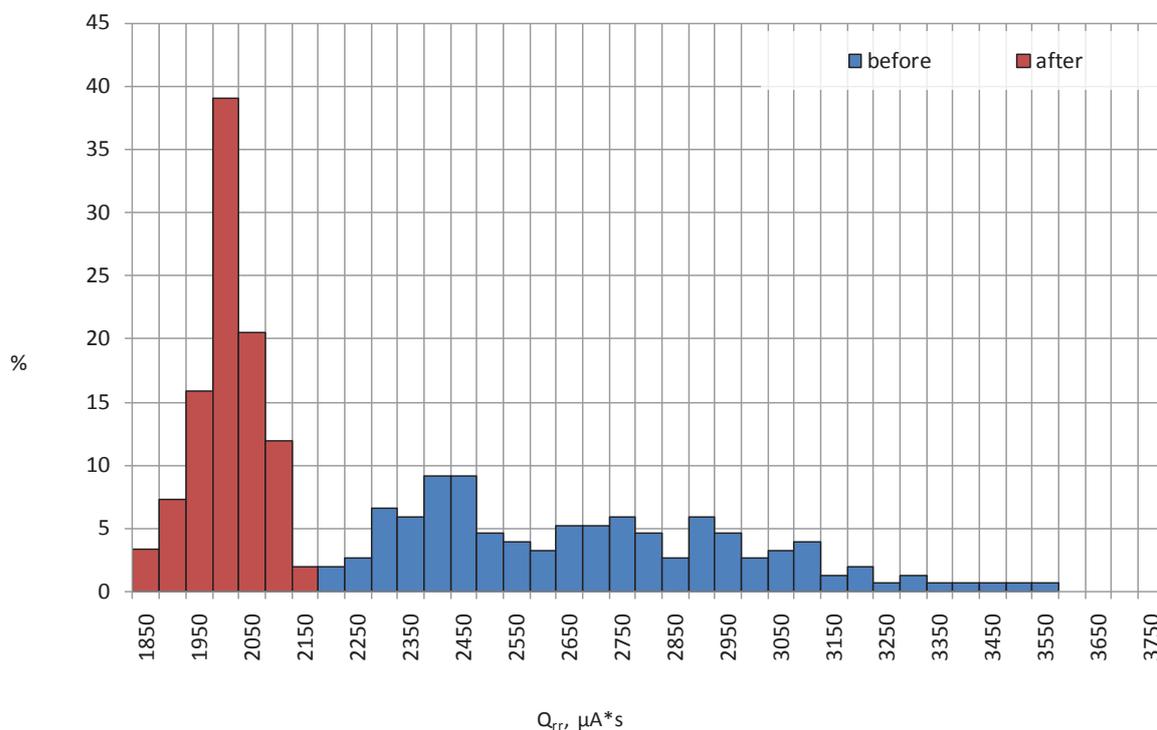


Рисунок 7. Типичное статистическое распределение заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  ( $T_j=125C$ ,  $I_{TM}=1250A$ ,  $di/dt=-5A/\mu s$ ) в партии тиристорных элементов T273-1250-44 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами.

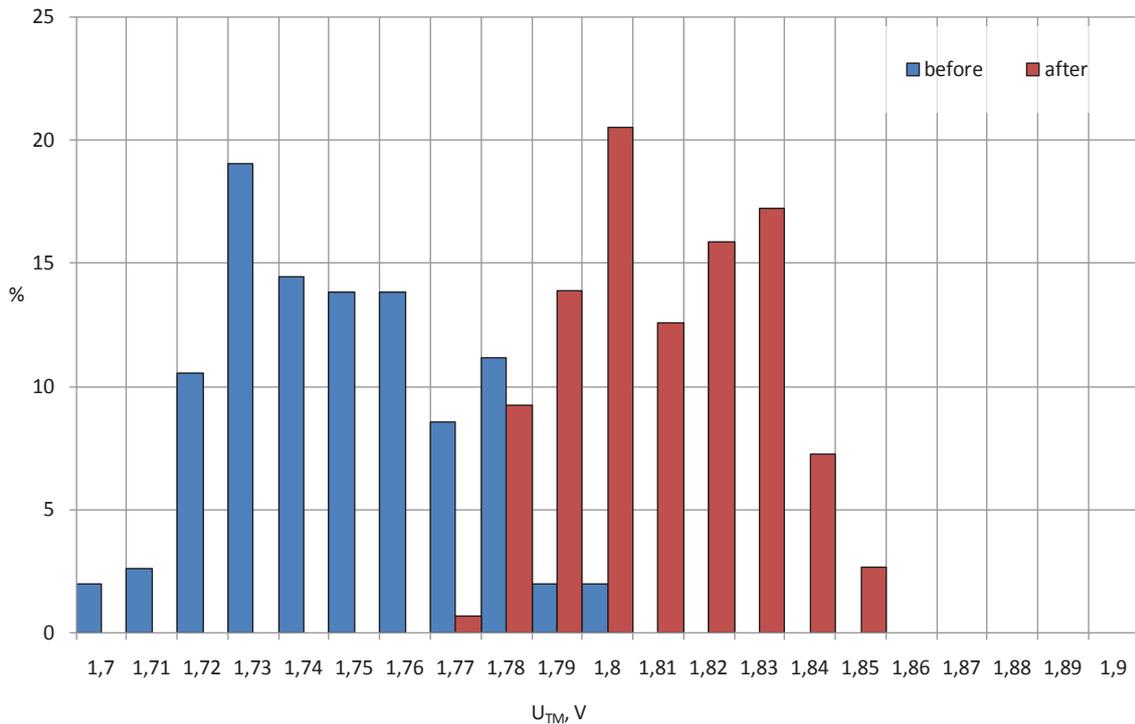


Рисунок 8. Типичное статистическое распределение  $U_{TM}$  ( $I_{TM}=4000A$ ) в партии тиристорных элементов T273-1250-44 до и после прецизионной обработки ускоренными электронами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.O. Carlson, Y.S. Sun, H.B. Assalit. Lifetime control in silicon power devices by electron or gamma irradiation/ // Electron Devices, IEEE Transactions on.— 1977. — no. 24. — Pp. 1103 – 1108.
2. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники/ Сов. Радио, 1980. — 224 с.
3. Lax B. Transient Response of a PN Junction / B. Lax, S.F. Neustadter // J. Appl. Phys. — 1954. — no. 25. — P. 1148–1154.
4. Филатов Н. И., Лонгинов В.В., Система смешанного приборно-схемотехнического моделирования БИС ИСТОК, 35 Intern. Wiss. Koll. TH Limenau, DDR, 1990.