

УДК 621.382

## Исследование характеристик обратного восстановления мощных быстродействующих тиристоров, облученных электронами и протонами

*В. Н. Губарев, А. М. Сурма*

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

*А. В. Ковров*

ОО «Эстел Электроника», Таллинн, Эстония

*А. Ю. Семенов*

ЗАО "Протон-Электротекс", г. Орел, Россия

*Проведено экспериментальное исследование влияния облучения ускоренными электронами и протонами на комплекс динамических характеристик силовых быстродействующих тиристоров. Показано, что протонное облучение по сравнению с электронным улучшает характеристики обратного восстановления тиристора — уменьшает заряд обратного восстановления и снижает амплитуду импульсного выброса обратного напряжения. Такие приборы могут надежно работать в инверторе тока преобразователя частоты при жестких условиях коммутации ( $di/dt = 100\text{—}300$  А/мкс на частоте 2—8 кГц).*

Характерная особенность конструкции кремниевой структуры современного быстродействующего силового тиристора — наличие высокоэффективной шунтировки катодного эмиттера. Для указанных приборов типична "густая" распределенная шунтировка области катодного  $n^+$  эмиттера с шагом элементов 300—400 мкм в совокупности с краевой шунтировкой границы катодного эмиттера и  $p$ -области управления [1]. Такой подход к конструированию кремниевой структуры тиристора позволяет получать относительно малое время выключения тиристора  $t_q$  при относительно большом времени жизни носителей заряда ( $\tau$ ) в высокоомном  $n$ -базовом слое ( $t_q/\tau = 2\text{—}3$ ). Следовательно, при разумно малом падении напряжения во включенном состоянии ( $U_{TM}$ ) такой тиристор может иметь высокое напряжение в закрытом состоянии ( $U_{DRM}$ ).

Описанная концепция конструкции позволяет сегодня получать для тиристоров 14-го — 15-го классов значения  $t_q \leq 10$  мкс, 24-го класса —  $t_q \leq 25$  мкс, 32-го класса —  $t_q \leq 63$  мкс.

Недостатком тиристоров описанной выше конструкции является повышенное значение времени ( $t_{rr}$ ) и заряда ( $Q_{rr}$ ) обратного восстановления.

Таким образом, эти приборы оптимальны только для применения в режимах, не предусматривающих приложение обратного напряжения. Для тиристоров, функционирующих в режимах с приложением обратного напряжения, например в составе инвертора тока, равно актуальным, становится уменьшение как  $t_q$ , так и  $Q_{rr}$ .

Важная характеристика для таких приборов — так называемый коэффициент формы тока обратного восстановления —  $K_{rr}$  [2]. Его значение определяется как

$$K_{rr} = -\frac{(di/dt)_s}{\max[(di/dt)_f]}$$

где  $(di/dt)_s$  — скорость изменения анодного тока на фазе нарастания импульсного тока обратного восстановления;

$(di/dt)_f$  — скорость изменения тока на фазе спада импульсного тока обратного восстановления.

Значение  $K_{rr}$  определяет амплитуду импульса напряжения при обратном восстановлении прибора и, как показывают эксперименты [2, 3], слабо зависит от режима обратного восстановления прибора, но определяется параметрами его конструкции.

Для оптимизации комплекса указанных параметров тиристора в [4] было предложено введение в кремниевую структуру неравномерного по толщине  $n$ -базового слоя распределения  $\tau$ . При этом вблизи среднего (коллекторного)  $pn$ -перехода тиристорной структуры значение  $\tau$  выше, чем вблизи анодного  $pn$ -перехода. Неравномерное аксиальное (по толщине структуры) распределение  $\tau$  создавалось с помощью технологии легирования золотом.

В настоящей работе исследованы возможности оптимизации комплекса параметров  $U_{TM}$ ,  $t_q$ ,  $Q_{gr}$ ,  $K_{gr}$  более прогрессивных радиационных технологий: электронного и протонного облучения.

## Сравнение различных технологий регулирования быстродействия

### Легирование золотом

Технология основана на диффузии в кремниевую структуру атомов золота, являющихся рекомбинационными центрами (РЦ). Создание неравномерных пространственных распределений концентрации атомов золота в структуре производится за счет использования геттерирующих свойств эмиттерных слоев, легированных фосфором и бором. В работах [5, 6] показано, что геттерирование золота диффузионным  $n^+$ -слоем, легированным фосфором, позволяет создать в  $n$ -базовом слое структуры силового тиристора неравномерное аксиальное распределение  $\tau$  с повышенным значением  $\tau$  вблизи коллекторного  $pn$ -перехода и пониженным — вблизи анодного.

Недостатками технологии легирования золотом являются недостаточная воспроизводимость результатов технологического процесса, увеличенный процент брака по сочетанию  $U_{TM}$  и динамических параметров при производстве, а также склонность атомов золота к образованию кластеров при термообработках, что приводит к увеличенному проценту брака по блокирующему напряжению. Кроме того, генерационно-рекомбинационные свойства атомов золота таковы, что приводят к появлению повышенных токов утечки в обратном смещенных  $pn$ -переходах прибора, что ограничивает максимальную рабочую температуру структуры до 110–125 °С [7].

Вследствие указанных недостатков технология легирования золотом при производстве силовых полупроводниковых сегодня в значительной степени вытеснена радиационными технологиями управления быстродействия.

### Электронное облучение

Электронное облучение — наиболее распространенная на сегодняшний день разновидность радиационной технологии управления быстродействием. Рекомбинационными центрами, ответственными за снижение  $\tau$ , являются радиационные дефекты — комплексы, которые могут содержать собственные дефекты решетки кремния (дефекты Френкеля), а также атомы легирующих

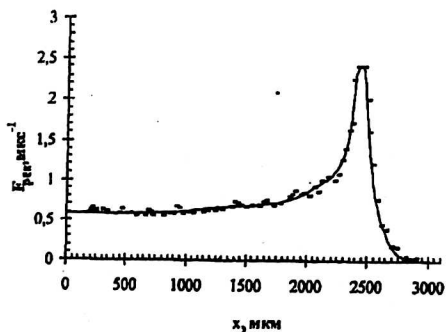
и других примесей. Облучение кремниевой структуры электронами с энергией свыше 1 МэВ дает хорошо воспроизводимые результаты, так как концентрации получаемых при такой обработке РЦ зависят в основном только от дозы облучения и исходного (перед облучением) примесно-дефектного состава в структуре, который имеет достаточно стабильный характер. Однако вследствие слабого изменения скорости образования радиационных дефектов при пролете высокоэнергетичных электронов через кремниевую структуру использование этой технологии не позволяет получить неравномерные аксиальные распределения  $\tau$  в *n*-базовом слое [1].

### Протонное облучение

Спектр точечных радиационных рекомбинационных дефектов, возникающий в результате воздействия ускоренных протонов, близок по своему качественному составу к получаемому при электронном облучении (за исключением нескольких дополнительных дефектов, связанных с имплантированным водородом) [8]. Однако скорость образования радиационных дефектов носит немонотонный характер и имеет характерный максимум вблизи окончания пробега протонов. Соответственно и аксиальное распределение  $\tau$  после протонного облучения может носить неравномерный характер. Рис. 1 иллюстрирует типичные изменения  $\tau$ , вносимые при протонном облучении кремниевой структуры [9].

Таким образом, если подобрать режим облучения так, чтобы пробег протонов оканчивался вблизи анодного *pn*-перехода тиристорной структуры, то можно получить неравномерное аксиальное распределение  $\tau$  в *n*-базовом слое, при этом значения  $\tau$  вблизи анодного *pn*-перехода будут меньше, чем вблизи коллекторного.

Рис. 1. Типичная зависимость величины  $F_{рек} = 1/\tau - 1/\tau_0$  ( $\tau_0 - \tau$  перед облучением) от глубины пробега протонов в кремнии. Энергия протонов — 20,8 МэВ



Возможности различных технологий регулирования быстрodeйствия в части создания требуемого неравномерного аксиального распределения  $\tau$  в структуре типичного быстрodeйствующего тиристора показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что технологии легирования золотом и протонного облучения позволяют получить отношение  $\tau$  вблизи коллекторного и вблизи анодного *pn*-переходов  $\tau_{кол}/\tau_{анод} = 2-3$ , тогда как для технологии электронного облучения эта величина равна 1.

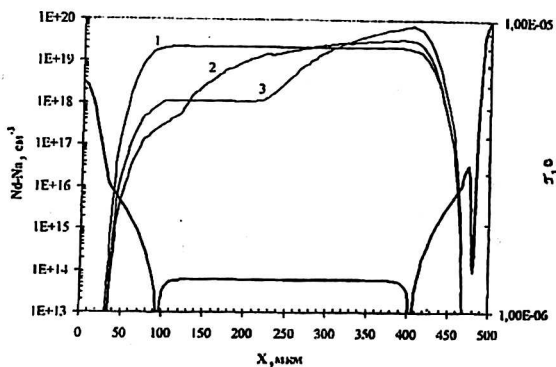


Рис. 2. Аксиальные распределения времени жизни носителей заряда в структуре тиристора при различных технологиях регулирования быстродействия: 1 — электронное облучение; 2 — протонное облучение; 3 — диффузия золота

### Экспериментальные образцы

В качестве экспериментальных образцов использовались структуры серийных быстродействующих тиристоров ТБ143-400-20 производства ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орел).

Структуры сформированы на исходных пластинах КОФ80 (кремний нейтронно-легированный, удельное сопротивление 80 Ом·см) толщиной 500 мкм, диаметр структуры 40 мм. Анодный и коллекторный *pn*-переходы сформированы двухсторонней комбинированной диффузией алюминия и бора. Глубина этих *pn*-переходов — 90 мкм от анодной либо катодной поверхности пластины, соответственно. Катодный эмиттерный *n*<sup>+</sup>-слой сформирован двухсторонней диффузией фосфора на глубину 20 мкм.

Распределение легирующих примесей в структуре приблизительно соответствует приведенному на рис. 2. Топология структуры приведена на рис. 3. Катодная шунтировка распределенная имеет треугольную симметрию расположения шунтирующих элементов, диаметр отдельного элемента — 130 мкм, шаг — 400 мкм.

Партия экспериментальных тиристорных элементов была разделена на две части; регулирование быстродействия на одной из них производилось с помощью технологии электронного облучения, на другой — протонного.

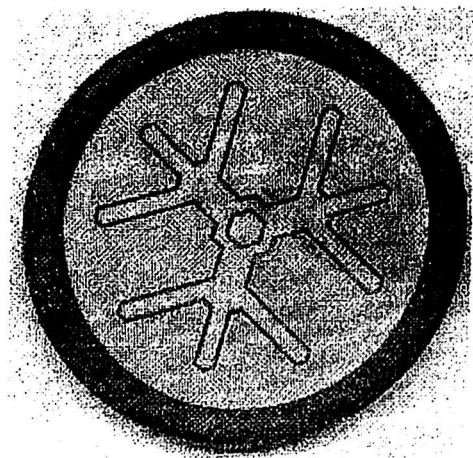


Рис. 3. Топология структуры быстродействующего тиристора ТБ143-400

Электронное облучение осуществлялось по стандартной технологии ускоренными моноэнергетическими электронами с энергией 6 МэВ; протонное облучение — пучком моноэнергетичных ускоренных протонов с энергией 20,8 МэВ. Облучение проводилось со стороны катодной поверхности тиристорной структуры. Глубина пробега протонов регулировалась с помощью кремниевых экранов, размещаемых перед катодной поверхностью облучаемых структур. Толщина экранов выбрана таким образом, чтобы пробег протонов оканчивался в тиристорной структуре, вблизи анодного *pn*-перехода. Дозы электронного и протонного облучения выбирались таким образом, чтобы получить одинаковые времена выключения (около 30 мкс).

### Исследование параметров и характеристик тиристоров с разной технологией регулирования быстродействия

На тиристорных элементах были измерены прямые и обратные блокирующие напряжения, падение напряжения во включенном состоянии, а также время выключения и характеристики обратного восстановления.

Основные параметры приборов после электронного и протонного облучения приведены в таблице.

№ элемента	$U_{Dbr}/U_{Rbr}$ , В <sup>(1)</sup>	$U_{DSM}/U_{RSM}$ , В <sup>(2)</sup>	$U_{TM}$ , В $I_{TM}=1250$ А	$t_q$ , мкс <sup>3</sup>	$di/dt = 50$ А/мкс <sup>(4)</sup>		$di/dt = 200$ А/мкс <sup>(4)</sup>	
					$t_{rr}$ , мкс	$Q_{rr}$ , МККл	$t_{rr}$ , мкс	$Q_{rr}$ , МККл
<b>Элементы, облученные протонами</b>								
162/542	2600/2700	2300/2700	2,30	35,5	4,4	321	3,05	506
160/542	2600/2700	2300/2700	2,68	31,4	3,6	223	2,6	411
158/542	2600/2700	2500/2800	2,26	34	4,25	306	2,85	487
30/569	2600/2600	2400/2700	2,32	26,7	3,9	261	2,85	479
164/542	2600/2700	2300/2700	2,19	35,9	4,4	326	3,15	558
Среднее значение	2600/2700	2360/2720	2,35	32,7	4,11	287,4	2,9	488,2
<b>Элементы, облученные электронами</b>								
90/542	2600/2700	2500/2800	2,50	35,6	4,9	407	3,5	637
111/542	2600/2700	2300/2800	2,22	31,2	5,3	472	3,75	735
98/542	2700/2700	2300/2700	2,16	33,2	5,25	466	3,7	703
115/542	2700/2800	2400/2800	2,30	30,5	5,3	466	3,65	686
100/542	2600/2700	2300/2700	2,20	29,9	5,35	482	3,6	670
94/542	2700/2700	2200/2700	2,16	31,7	5,5	501	3,8	730
77/542	2600/2800	2400/2800	2,43	34,7	5	430	3,65	694
Среднее значение	2630/2730	2340/2760	2,28	32,4	5,23	460,6	3,66	693,6

<sup>1</sup>  $T_j = 25$  °С;  $I_{Dbr} = I_{Rbr} = 15$  мА.

<sup>2</sup>  $T_j = 125$  °С;  $I_D = I_{DRM}$ ;  $I_R = I_{RRM}$ .

<sup>3</sup>  $T_j = 125$  °С;  $I_{TM} = 400$  А;  $di/dt = -10$  А/мкс;  $U_R = 100$  В;  $du/dt = 50$  В/мкс;  $U_D = 1330$  В.

<sup>4</sup>  $T_j = 125$  °С;  $I_{TM} = 400$  А;  $U_R = 100$  В.

Типичные эпюры тока и напряжения в течение процесса обратного восстановления тиристора в LC-контуре приведены на рис. 4. Типичное значение  $K_{rr}$  для структур, облученных электронами, составляет 3,2—3,5, для структур, облученных протонами, — 2,5—2,8.

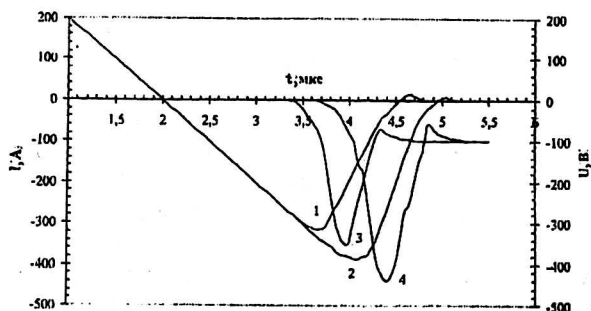


Рис. 4. Типичные зависимости тока (1, 2) и напряжения (3, 4) в течение процесса обратного восстановления тиристора.

Зависимости 1, 3 — для тиристорov, облученных протонами; 2, 4 — для тиристорov, облученных электронами.

Режим измерений:  $T_j = 125^\circ\text{C}$ ;

$I_{TM} = 400\text{ A}$ ;

$(di/dt)_{cp} = 200\text{ A/мкс}$ ;

$U_R = 100\text{ B}$

## Обсуждение результатов

Сравнение параметров экспериментальных образцов тиристорov показывает, что применение протонного облучения позволяет получить приблизительно в 1,5 раза меньшие значения  $Q_{rr}$  при близких значениях  $U_{TM}$  и  $t_q$ . При этом за счет уменьшения коэффициента формы тока обратного восстановления на 25—30 % может быть снижена амплитуда выброса обратного напряжения.

Полученный результат подтверждает возможность оптимизации сочетания параметров  $U_{TM}$ ,  $t_q$  и  $Q_{rr}$  с помощью локального уменьшения времени жизни носителей заряда в слое структуры, вблизи анодного  $pn$ -перехода и показывает, что технология протонного облучения позволяет эффективно управлять отношением  $\tau$  вблизи коллекторного и анодного  $pn$ -переходов. Чтобы численно охарактеризовать отношение  $\tau_{кол}/\tau_{анод}$ , полученное при протонном облучении, мы воспользовались следующим подходом.

Для оценки  $\tau_{анод}$  на экспериментальных структурах были измерены значения времени жизни носителей заряда в  $n$ -базе. Измерения проводились разностным методом при значении амплитуды импульса прямого тока 2,5 А. Результаты указанных измерений являются оценкой  $\tau$  для части  $n$ -базового слоя, примыкающего к анодному  $pn$ -переходу и имеющего толщину порядка амбиполярной диффузионной длины.

В качестве мерила для  $\tau_{кол}$  брались значения  $t_q$ , которые можно считать прямо пропорциональными  $\tau$  для части  $n$ -базового слоя, примыкающего к коллекторному  $pn$ -переходу (при условии идентичности топологии и слоев кремниевой структуры экспериментальных образцов).

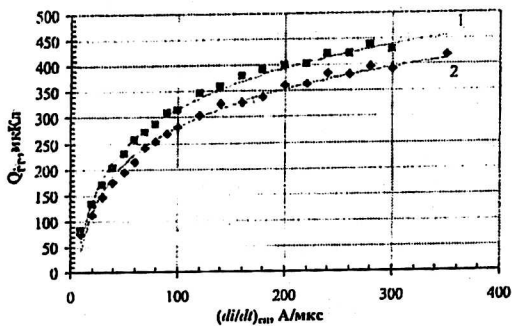
Среднее значение отношения  $t_q/\tau_{анод}$  для тиристорov после электронного облучения имело величину  $t_q/\tau_{анод} = 2,56$ , тогда как для тиристорov после протонного облучения среднее  $t_q/\tau_{анод} = 5,26$ .

Таким образом, если принять, что для электронного облучения  $\tau_{кол}/\tau_{анод} \approx 1$ , то протонное облучение позволяет получить  $\tau_{кол}/\tau_{анод} \approx 2$ .

Характерно, что значение отношения  $t_q/\tau_{анод}$  для тиристорov ТБ143-400 после протонного облучения близко к подобному параметру для тиристорov ТБИ243-400 (ESTEL), изготовленных с применением легирования золотом (среднее значение  $t_q/\tau_{анод} \approx 4,9$ ). Указанные приборы оказались также весьма близкими по характеристикам обратного восстановления (рис. 5).

Рис. 5. Зависимости заряда обратного восстановления от скорости спада прямого тока для тиристора, легированного золотом (1) и облученного протонами (2).

Режим измерения:  $T_j = 125^\circ\text{C}$ ;  $I_{TM} = 400\text{ A}$ ;  $U_R = 100\text{ B}$



Актуальность оптимизации характеристик обратного восстановления быстродействующих тиристорov подтверждается результатами их применения в составе инвертора тока тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ). Так, при замене тиристорov ТБИ243-400 производства ESTEL, отслуживших свой срок, на серийные ТБ143-400 (с электронным облучением), во время испытаний преобразователя, примерно через 2 ч работы четыре тиристора вышли из строя. Анализ областей пробоя тиристорных элементов показал, что отказ связан, по-видимому, с увеличенным импульсным выбросом напряжения при обратном восстановлении. После установки на данный преобразователь тиристорov ТБ143-400, изготовленных с применением протонного облучения, отказов не наблюдалось, ТПЧ прошел испытания и стабильно работает у потребителя.

При работе в составе данного ТПЧ тиристоры коммутируют трапецеидальные импульсы тока амплитудой до 200 А со скоростью нарастания на переднем и заднем фронтах до 300 А/мкс. Амплитуда импульсов прямого и обратного напряжений (без учета коммутационных всплесков) составляла 800 В.

### Выводы

1. Технология протонного облучения позволяет получить более мягкую характеристику процесса обратного восстановления и оптимизировать сочетание параметров  $U_{TM}$ ,  $t_q$ ,  $Q_{rr}$  быстродействующего тиристора по сравнению с технологией электронного облучения.

2. По характеристикам процесса обратного восстановления тиристоры, изготовленные с применением технологии протонного облучения, могут быть близки к тиристорам с диффузией золота.

3. Быстродействующие тиристоры с улучшенными характеристиками обратного восстановления, изготовленные с применением технологии протонного облучения, могут быть рекомендованы для применения в инверторах тока и других преобразовательных устройствах, требующих приложения обратного напряжения к управляемому вентилю. В частности, при работе в составе инвертора тока тиристорного преобразователя частоты они надежно функционируют при коммутации трапецеидальных импульсов тока с крутизной спада 100–300 А/мкс и частотой повторения 2–8 кГц.

### Литература

1. Асина С. С., Сурма А. М. Радиационно-технологические методы повышения быстродействия мощных тиристорov // В сб.: Новые силовые полупроводниковые приборы / ВЭИ. — М., 1991. С. 174–187.
2. Асина С. С., Кузнецов В. М., Сурма А. М., Уверская Т. А. Методы снижения импульсных перегрузок по напряжению в процессе восстановления мощных кремниевых диодov // Электротехника. 1985. № 1. С. 42–44.

3. Асина С. С., Кузнецов В. М., Сурма А. М. Применение радиационной технологии в производстве силовых быстровосстанавливающихся диодов//Там же. 1986. № 5. С. 40—43.
4. Bosterling W., Ehinger H., Sommer K. Ein- und Ausschaltverhalten optimiert//Elektrotechnik. 1981. V. 63, № 21, 6. S. 16—23.
5. Silber D., Redeker H. Neue Technologien für Silizium-Leistungbauelemente: Strukturen mit lokal verminderten Ladungsträger-Lebensdauer. — Bundesministerium für Forschung und Technologie, Arbeitsbericht IB3-7291-NT 446, Mai, 1976.
6. Lecrosnier D. et al. Influence of phosphorus-induced point defects on a gold-gettering mechanism in silicon//J. Appl. Phys. 1980. № 51 (2). P. 1036—1038.
7. Baliga B. J., Sun E. Comparison of gold, platinum and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers//IEEE Transactions on electron devices. 1977. V. ED-24. № 6. P. 685—688.
8. Huppi M. W. Proton irradiation of silicon: complete electrical characterization of the induced recombination centers//J. Appl. Phys. 1990. V. 68. № 6. P. 2702—2707.
9. Prikhodko A., Surma A. Proton irradiated 6 kV GTO with full pressure contacts: Conf. Proc. of EPE'97, Trondheim, 1997. P. 1.507—1.512.

## Research of the reverse recovery characteristics of power fast thyristor, irradiated electron and proton

*V. N. Gubarev, A. M. Surma*

The Lenin's All-Russia Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*A. M. Kovrov*

ESTEL Elektroonika OU, Tallinn, Estonia

*A. Y. Semenov*

Proton-electrotex, Orel, Russia

*The experimental research of the electron and proton irradiation influence on a complex of dynamic characteristics of power fast thyristor is carried out. This research has shown, that the proton irradiation in comparison with electron irradiation allows to improve the reverse recovery characteristic: to reduce a reverse recovery charge and to lower amplitude of reverse voltage pulse. Such devices can reliably work in hard switching modes ( $di/dt = 100\text{--}300\text{ A}/\mu\text{s}$  on frequency from 2 up to 8 kHz).*