

УДК 621.382.2/3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВКЛЮЧЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ТИРИСТОРЕ ТИ183-2000 В SYNOPSIS TCAD

Горячкин Юрий Викторович

ФГБОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», Российская Федерация, г. Саранск, 430005, Россия, Мордовия, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39  
Тел. (834-2) 290668. E-mail: [yurygor@newmail.ru](mailto:yurygor@newmail.ru)

**Аннотация.** Разработаны модели трехмерных элементарных ячеек основного и вспомогательного тиристоров в Synopsys TCAD для тиристора ТИ183-2000 для моделирования процесса распространения включенного состояния. Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных измерений.

**Ключевые слова:** тиристор, модель, элементарная ячейка, процесс распространение включенного состояния.

Импульсный тиристор ТИ183-2000 изготавливается с так называемым внутренним усилением включающего импульса управления. Это реализуется путем каскадного соединения вспомогательного маломощного тиристора VS1 с основным мощным тиристором VS2, имеющим обширно разветвленный внутренний управляющий электрод, который обеспечивает достаточно большую площадь начального включения и быстрое ее увеличение в процессе протекания анодного тока. На рисунке 1, а представлена эквивалентная схема такого тиристора. Иное название такого полупроводникового прибора — тиристор с регенеративным управляющим электродом. На рисунке 1, б представлено поперечное сечение тиристора.

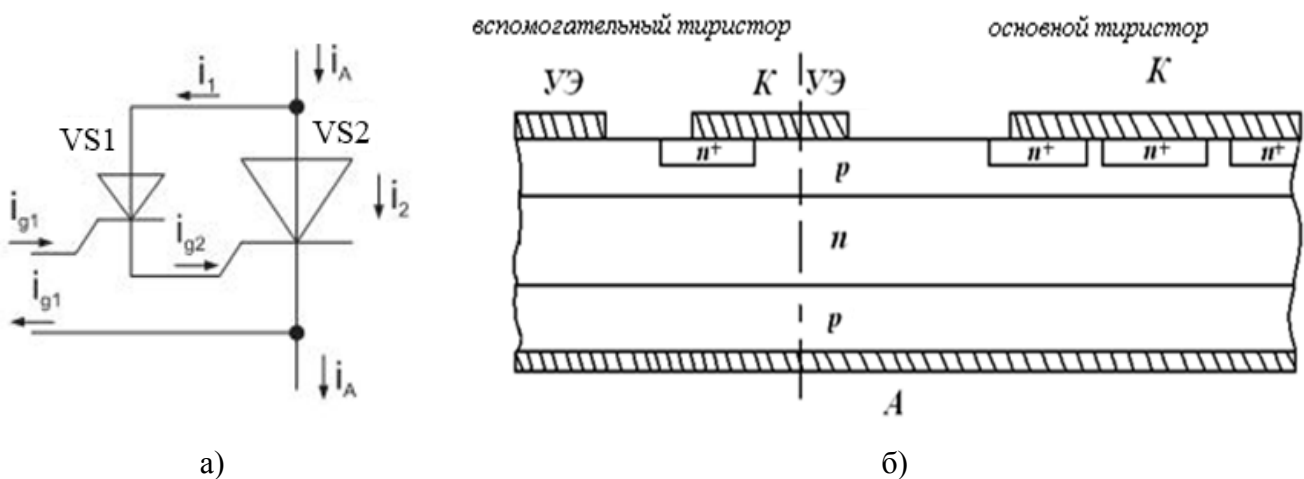
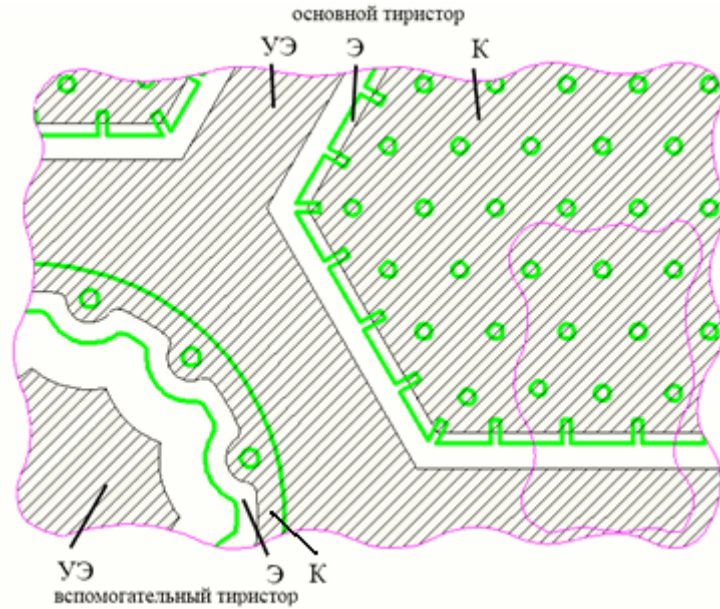


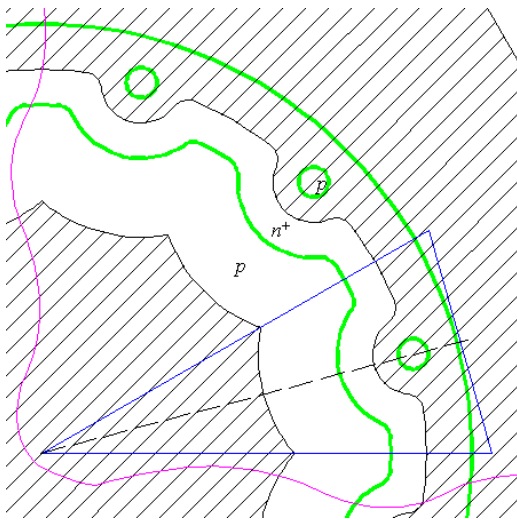
Рисунок 1 — Эквивалентная схема тиристора с регенеративным управляющим электродом и его поперечное сечение

В [1] была разработана двумерная элементарная ячейка основного тиристора цилиндрической формы. Данная ячейка позволяет успешно моделировать ВАХ и переходный процесс выключения тиристора. Однако она непригодна для моделирования переходного процесса включения и тем более процесса распространения включенного состояния в тиристоре, т.к. не содержит управляющего электрода и, соответственно, не учитывает особенности конструкции и периметр управляющего электрода, а также конструкцию и топологию шунтировки катодного эмиттера. Учесть эти особенности позволит только трехмерная модель.

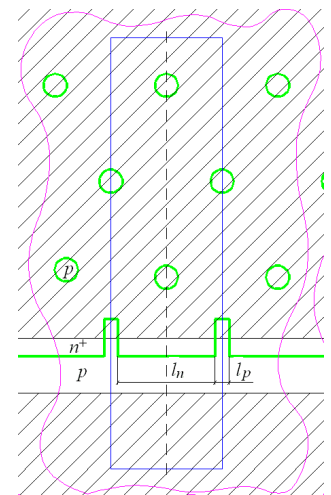
На рисунке 2, а представлен фрагмент топологии тиристора ТИ183-2000. Во вспомогательном тиристоре использованы шунты круглой формы в количестве 12 штук, в основном тиристоре использованы шунты круглой формы в количестве 3000 штук. Конечно, создать модель такого тиристора нереально, а тем более его промоделировать. Однако, как будет показано ниже, в составе основного и вспомогательного тиристоров можно выделить элементарную ячейку, которая будет отражать указанные выше особенности.



а)



б)



в)

Рисунок 2 — Фрагмент топологии тиристора ТИ183-2000 и топология элементарных ячеек вспомогательного и основного тиристора

На рисунке 2, б показан фрагмент топологии вспомогательного тиристора. Поскольку в нем 12 шунтов, в качестве элементарной ячейки этого тиристора можно выделить 1/12 сектора, как показано на рисунке. Данная элементарная ячейка симметрична относительно середины (штриховая линия), поэтому для моделирования можно использовать только её половину.

На рисунке 2, в показан фрагмент топологии основного тиристора. В нем использованы шунты круглой формы, регулярно расположенные по вершинам равносторонних треугольников. Также в тиристоре использованы так называемые «усы». Размер  $l_n$  равен 1,05 мм, размер  $l_p$  равен 0,15 мм. Поскольку шунты расположены равномерно и их количество 3000 шт, и количество «усов» около 1000 шт, была выбрана элементарная ячейка, включающая 1 «ус» и 3 шунта, ее изображение приведено на рисунке 2, в. Данная элементарная ячейка симметрична относительно середины (штриховая линия), поэтому для моделирования можно использовать только её половину.

Структура элементарных ячеек создавалась с помощью программы MESH САПР Synopsys TCAD [2]. На рисунке 3, а показана структура элементарной ячейки вспомогательного тиристора, на рисунке 3, б показан фрагмент структуры элементарной ячейки с сеткой. На рисунке 4, а показана структура элементарной ячейки основного тиристора, на рисунке 4, б показан фрагмент структуры элементарной ячейки с сеткой. С целью уменьшения количества элементов сетки круглые шунты были заменены на квадратные с сохранением площади, а также упрощена конструкция катодного эмиттера и металлизации в элементарной ячейке вспомогательного тиристора. Количество элементарных ячеек вспомогательного тиристора составляет 24, – основного 2000.

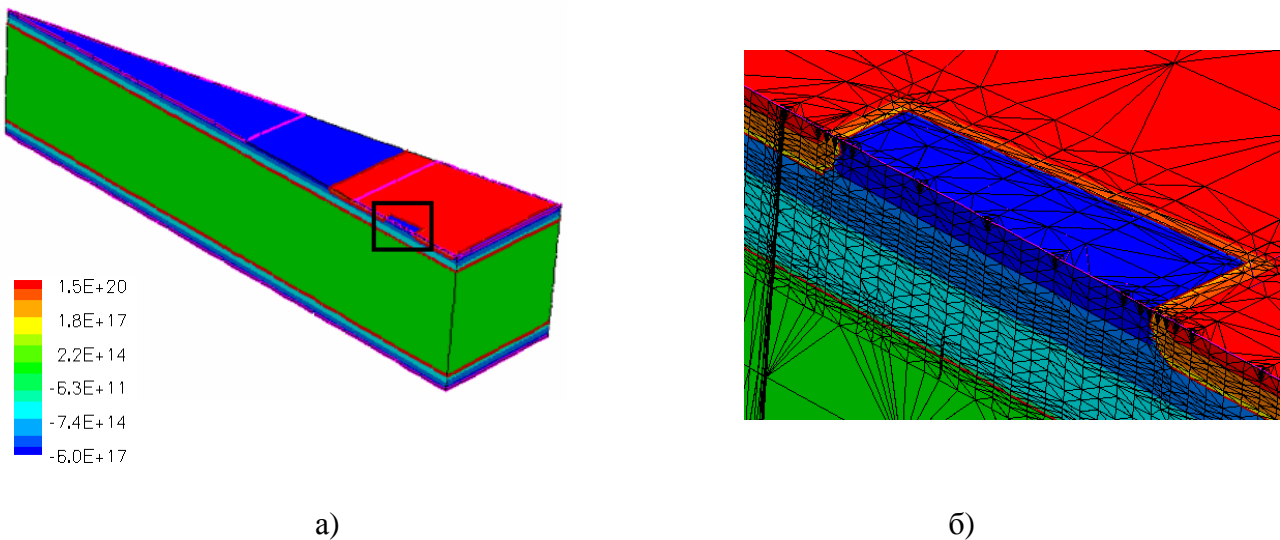


Рисунок 3 — Трехмерная структура элементарной ячейки вспомогательного тиристора

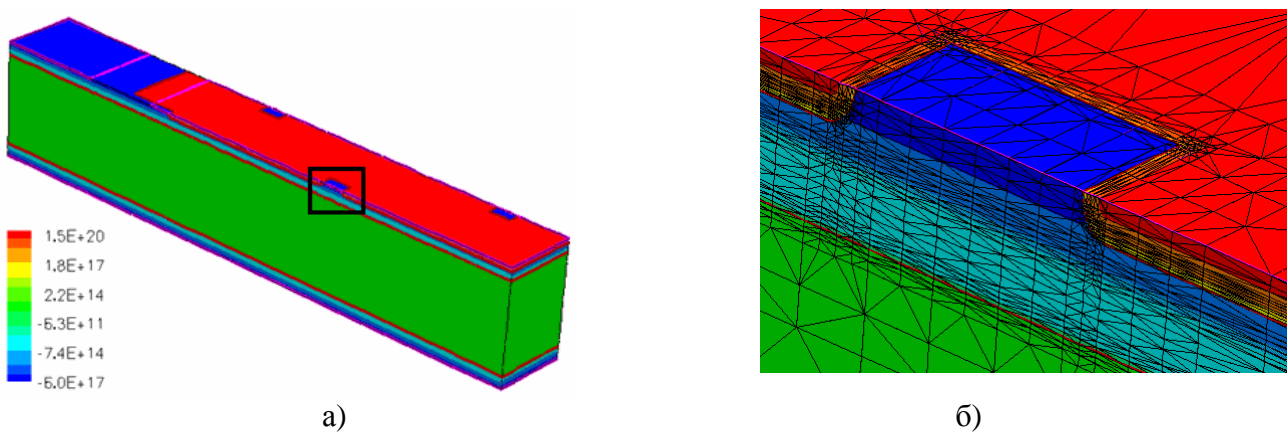


Рисунок 4 — Трехмерная структура элементарной ячейки основного тиристора

В тиристоре время распространения включенного состояния значительно больше времени включения, и рассмотрение его представляет значительный интерес, поскольку оно влияет на динамические свойства прибора. В зависимости от размеров прибора время распространения включенного состояния может достигать нескольких миллисекунд.

Это время оценивают из ВАХ тиристора. На рисунке 5 показана петля ВАХ, которая является результатом приложения однополупериодного синусоидального тока к тиристору. С увеличением тока напряжение возрастает, достигая своего максимального значения. Однако если ток превышает некоторое значение  $I_{CL}$ , то тиристор становится полностью проводящим. При токе меньше  $I_{CL}$  напряжение падает со снижением тока более плавно, а это значит, что проводящее состояние распространилось в приборе полностью. Уровень тока  $I_{CL}$  называется током смыкания [3].

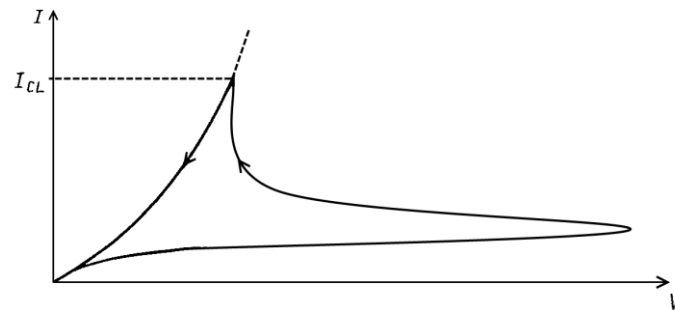


Рисунок 5 — Вид ВАХ для оценки скорости распространения включенного состояния

На ОАО «Электровыпрямитель» ВАХ снимаются на импульсе тока частотой 50 Гц. Максимальная амплитуда импульса тока 6 кА. При такой частоте скорость нарастания тока достаточно мала для того, чтобы основной тиристор включился по всему периметру управляющего электрода. Поэтому дополнительно была собрана схема, формирующая так называемый форсирующий импульс тока амплитудой 300 А и скоростью нарастания 70 А/мкс. Результирующий импульс тока показан на рисунке 6.

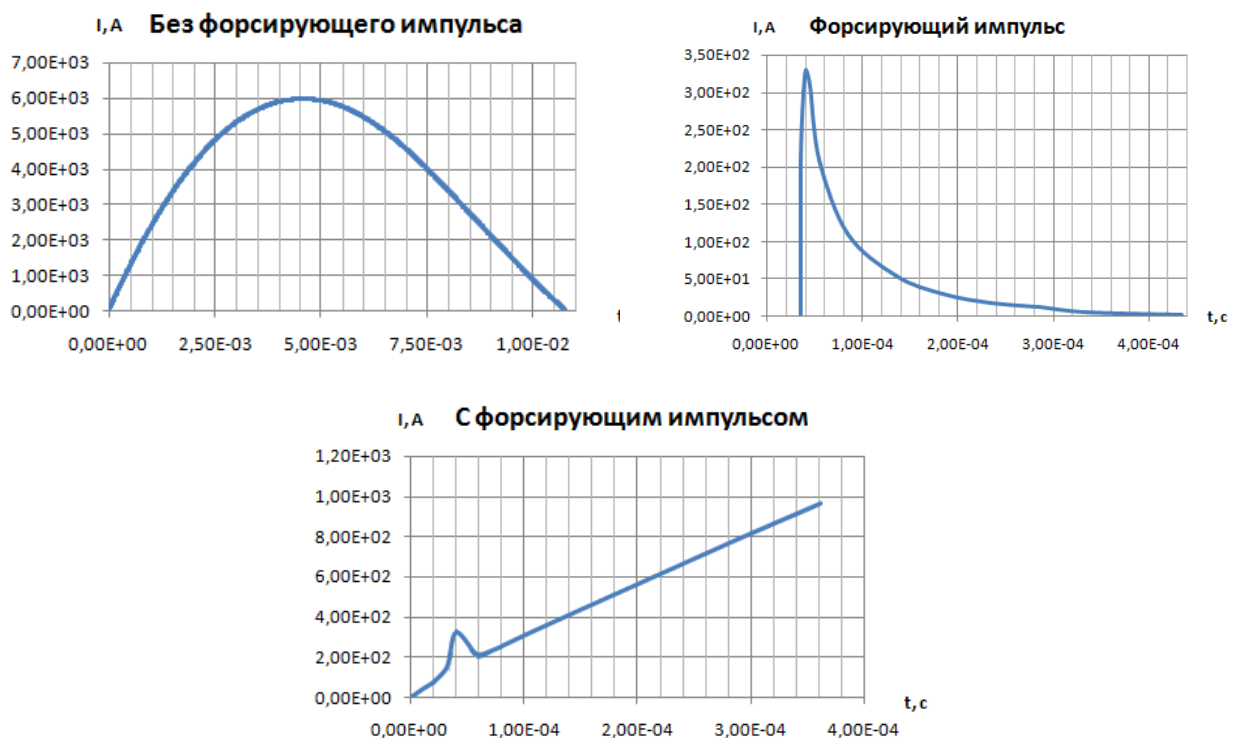


Рисунок 6 — Формы импульсов анодного тока тиристора

Моделирование проводилось с помощью программы SDEVICE САПР Synopsys TCAD [4]. При моделировании использовалась дрейфово-диффузионная модель, в которой решается феноменологическая система дифференциальных уравнений полупроводника и учитывались следующие эффекты:

- 1) Сужение ширины запрещенной зоны кремния с ростом температуры и концентрации легирующей примеси;
- 2) Рассеяние носителей заряда на фононах и на заряженных ионах примеси, электронно-дырочное рассеяние, а также насыщение дрейфовой скорости носителей заряда в высоких полях;
- 3) Рекомбинация Шокли-Холл-Рида с временами жизни неравновесных носителей заряда, зависящими от концентрации легирующей примеси и температуры, а также Оже-рекомбинация с зависящими от температуры коэффициентами Оже-рекомбинации.

На рисунке 7 показаны ВАХ тиристора без форсирующего импульса тока, с форсирующим импульсом тока и ВАХ, полученная в результате моделирования.

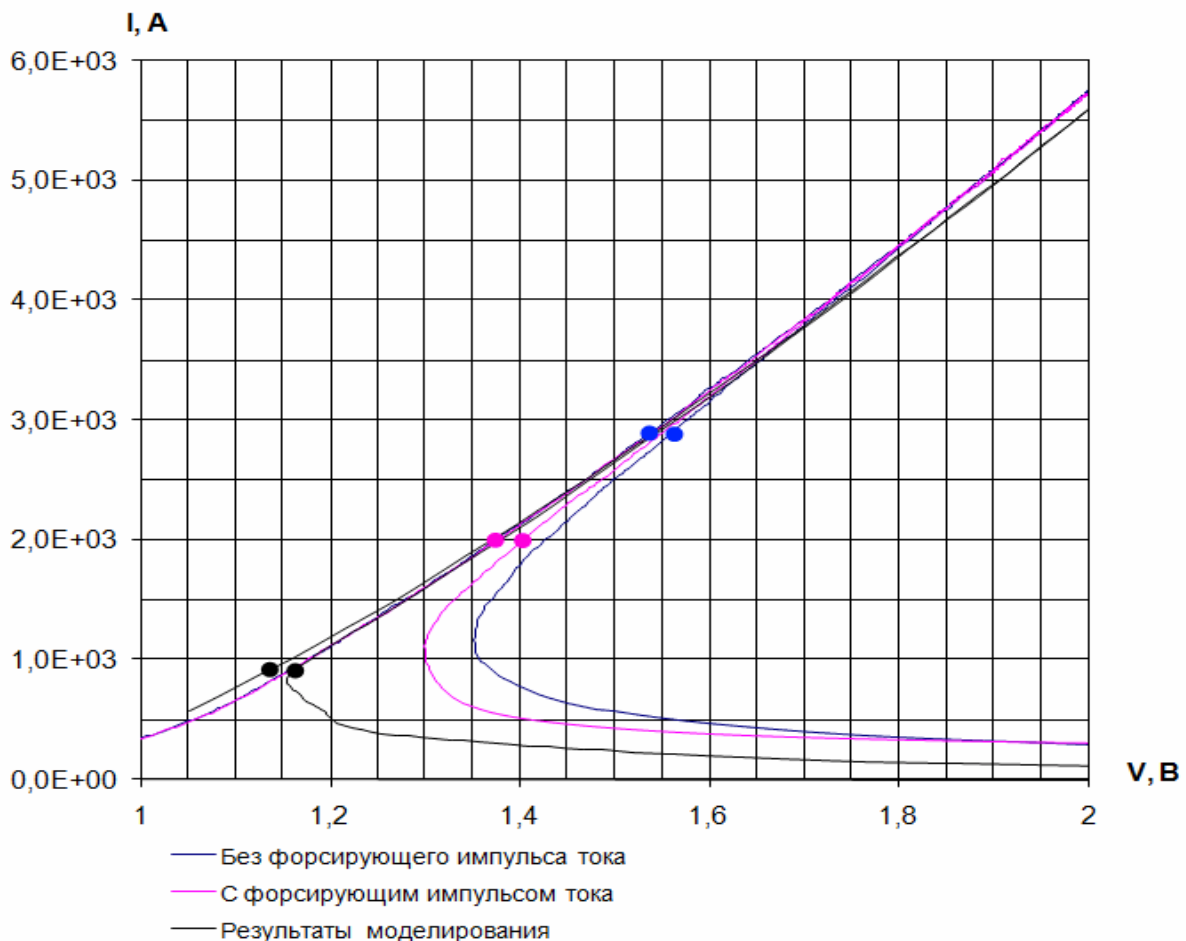


Рисунок 7 — ВАХ тиристора

Как видно, на обратной полуволне синусоиды ВАХ практически совпадают. Однако на прямой полуволне синусоиды ВАХ, полученная без форсирующего импульса тока, с форсирующим импульсом тока и ВАХ, полученная в результате моделирования, сильно различаются. Отсюда можно сделать вывод, что даже форсирующего импульса тока с амплитудой 300 А явно недостаточно для того, чтобы основной тиристор включился по всему периметру управляющего электрода.

Время полного включения оценивалось по разности напряжений в 25 мВ между ВАХ на прямой и обратной полуволне синусоиды. Без форсирующего импульса тока время полного включения составляет 1.2 мс, ток полного включения 2.8 кА. С форсирующим импульсом тока время полного включения составляет 840 мкс, ток полного включения 2 кА. По результатам моделирования время полного включения составляет 340 мкс, ток полного включения 900 А.

На рисунке 8 показаны графики распределения плотности тока в структуре элементарной ячейки основного тиристора в сечении вдоль середины структуры. Видно, что, начиная с момента времени порядка 300 мкс плотность тока практически равномерна по структуре элементарной ячейки.

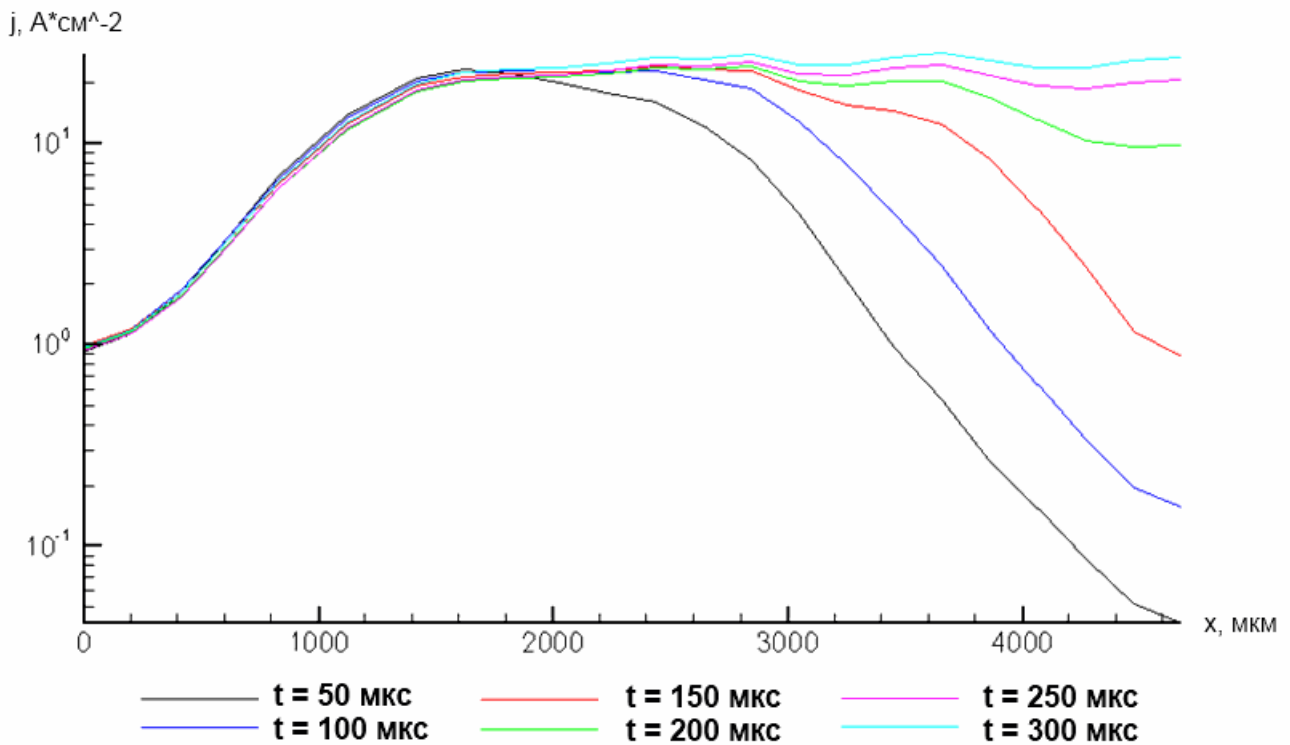


Рисунок 8 — Графики распределения плотности тока в структуре элементарной ячейки основного тиристора

### Литература

1. Горячкин Ю.В. Моделирование мощного импульсного тиристора ТИ183-2000 в САПР TCAD / Ю.В. Горячкин, Е.С. Калюжная // Электроника и информационные технологии. 2011. Вып. 2 (11). – [http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/thyristor\\_current-voltage\\_characteristics.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/thyristor_current-voltage_characteristics.pdf) – 0421100067/0029.
2. Mesh Generation Tools User Guide. – Synopsys, 2011. – 176 p. [Электронный ресурс] – meshgen\_ug.pdf.
3. Тейлор П. Расчет и проектирование тиристорov: пер. с англ. / П. Тейлор. – М.: Энергatomиздат, 1990. – 208 с.
4. Sentaurus Device User Guide. – Synopsys, 2011. – 1292 p. [Электронный ресурс] – sdevice\_ug.pdf.

## INVESTIGATION OF PROCESS INCLUSION OF THE SPREAD ON STATE IN THYRISTOR TI183-2000 IN THE SYNOPSIS TCAD

Goryachkin V. Yury

Phone (834-2) 290668. E-mail: [yurygor@newmail.ru](mailto:yurygor@newmail.ru)

N. P. Ogarev's Mordovian State University, Russian Federation, Saransk city, 68, Bolshevistskaya str., 430005, Saransk, Mordovia, Russia

**Annotation.** The models of three-dimensional elementary cells of the main and auxiliary thyristors in the Synopsys TCAD for thyristor TI183-2000 are developed for modeling the process inclusion of the spread ON state. A comparison of simulation results and experimental measurements.

**Keywords:** thyristor, model, an elementary cell, process inclusion of the spread ON state.