

ГОРЯЧКИН Ю. В., ХАЙБУЛИН Р. Р.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРА

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования заряда обратного восстановления тиристора в сравнении с данными измерений реального тиристора.

Ключевые слова: тиристор, заряд обратного восстановления, модель, элементарная ячейка.

GORYACHKIN YU. V., HAYBULIN R. R.

MODELING REVERSE RECOVERY CHARGE THYRISTOR

Abstract. The article presents the simulation results of reverse recovery charge thyristor in comparison with the measurements of the actual thyristor.

Keywords: thyristor, reverse recovery charge, model, elementary cell.

Введение. Заряд обратного восстановления определяет время выключения тиристорov. Для тиристорov, особенно быстродействующих, важно знать время выключения, а соответственно, и заряд обратного восстановления. Однако при производстве и испытаниях тиристорov далеко не всегда есть возможность определить заряд обратного восстановления и время выключения в реальных условиях и режимах работы тиристорov. В этом случае оценить эти параметры можно с помощью моделирования.

Разработка модели тиристора. Быстродействующие импульсные тиристоры большого диаметра обычно изготавливаются 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, а на рисунке 1 (б) – поперечное сечение такого тиристора.

Двухмерная цилиндрическая элементарная ячейка, предложенная в [1], не содержит управляющего электрода и, соответственно, не учитывает особенности конструкции и периметр управляющего электрода, а также топологию шунтировки катодного эмиттера. Учесть эти особенности позволит только трехмерная модель.

Структура элементарных ячеек создавалась с помощью программы MESH, входящей в состав Synopsys TCAD [2]. На рисунке 2 (а) показана структура элементарной ячейки вспомогательного тиристора, на рисунке 2 (б) показан фрагмент структуры элементарной

ячейки с сеткой. На рисунке 3 (а) показана структура элементарной ячейки основного тиристора, на рисунке 3 (б) показан фрагмент структуры элементарной ячейки с сеткой.

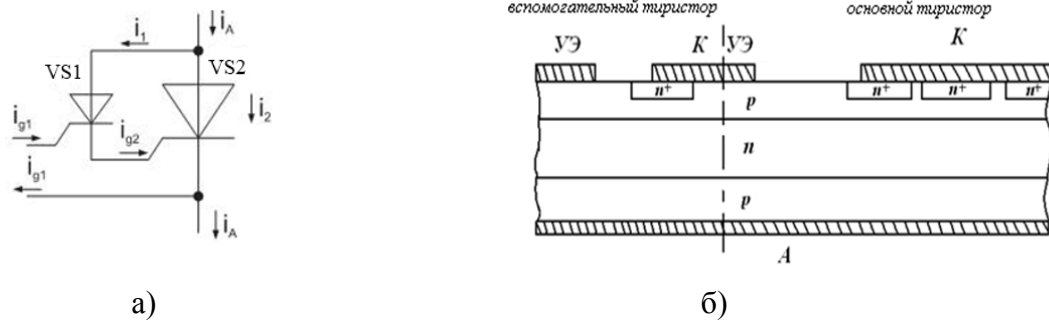


Рис 1. Эквивалентная схема тиристора с регенеративным управляющим электродом и его поперечное сечение.

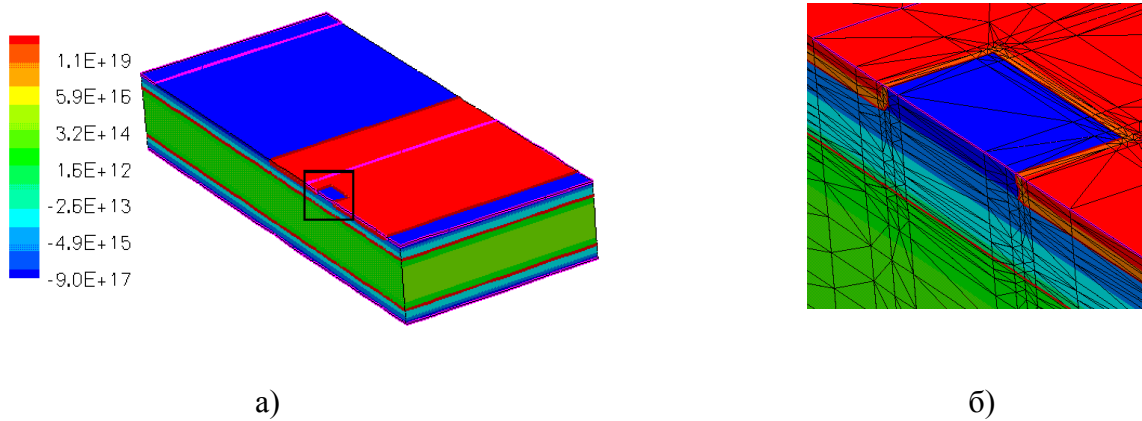


Рис. 2. Трехмерная структура элементарной ячейки вспомогательного тиристора.

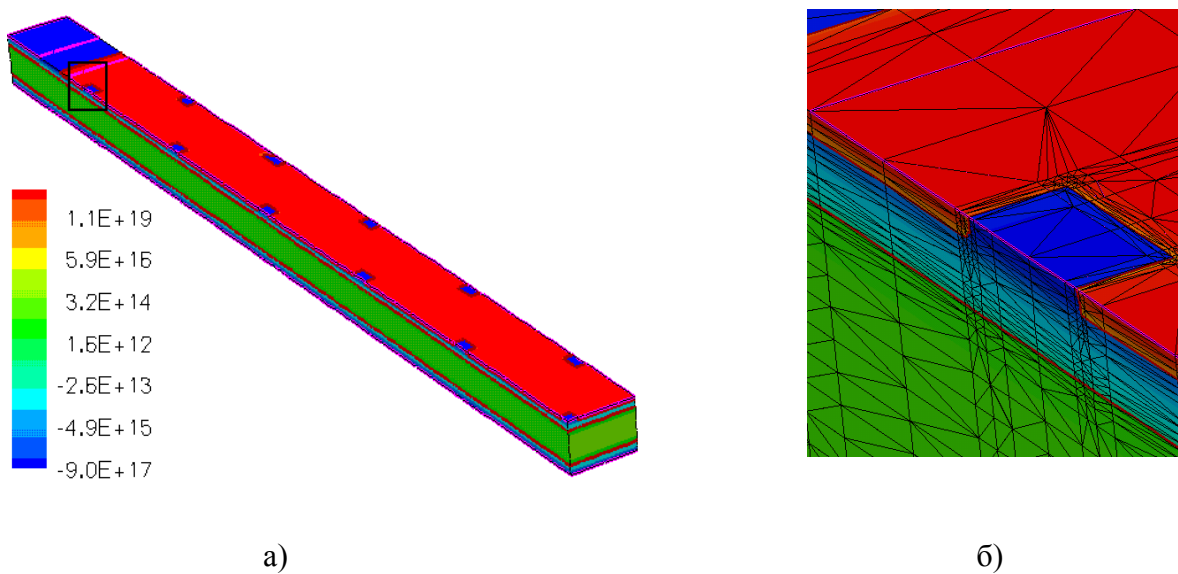


Рис. 3. Трехмерная структура элементарной ячейки основного тиристора.

Контурами фиолетового цвета показаны контакты управляющего электрода и катода (сверху) и анода (снизу). С целью уменьшения количества элементов сетки круглые шунты были заменены на квадратные с сохранением площади, элементарная ячейка вспомогательного тиристора имеет прямоугольную форму. Количество элементарных ячеек вспомогательного и основного тиристоры выбирались таким, чтобы площади катодных эмиттеров вспомогательного и основного тиристоры модели соответствовали площади катодных эмиттеров вспомогательного и основного тиристоры в реальном тиристоре. Количество элементов сетки вспомогательного тиристора около 30000, количество элементов сетки основного тиристора более 130000.

Разработанные трехмерные модели элементарных ячеек учитывают периметр управляющего электрода, а также топологию шунтировки катодного эмиттера. Единственное, что не учитывает модель элементарной ячейки основного тиристора – конструкцию управляющего электрода.

Моделирование заряда обратного восстановления тиристора. Моделирование проводилось с помощью программы SDEVICE, входящей в состав Synopsys TCAD [3]. При моделировании использовалась дрейфово-диффузионная модель, в которой решается феноменологическая система дифференциальных уравнений полупроводника и учитываются 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.

Времена жизни электронов и дырок 4 мкс.

Измерение и моделирование проводилось в следующих условиях:

- амплитуда тока в открытом состоянии: 500 А,
- длительность тока в открытом состоянии: 1500 мкс,
- скорость спада тока di/dt : -20 А/мкс,
- амплитуда обратного напряжения: -80 В.
- температура: 125 °С.

На рисунке 4 показан график обратного тока, полученный в результате моделирования в сравнении с графиком обратного тока реального тиристора, полученным в результате измерений. Из графика видно, что для модели максимальный ток обратного восстановления $I_{rr} = 103$ А., время обратного восстановления $t_{rr} = 9,2$ мкс, заряд обратного восстановления $Q_{rr}=474$ мкКл. Для реального тиристора $I_{rr} = 96$ А, $t_{rr} = 9$ мкс, $Q_{rr} = 432$ мкКл.

Таким образом, заряд обратного восстановления Q_{rr} модели превышает заряд обратного восстановления реального тиристора на 9%.

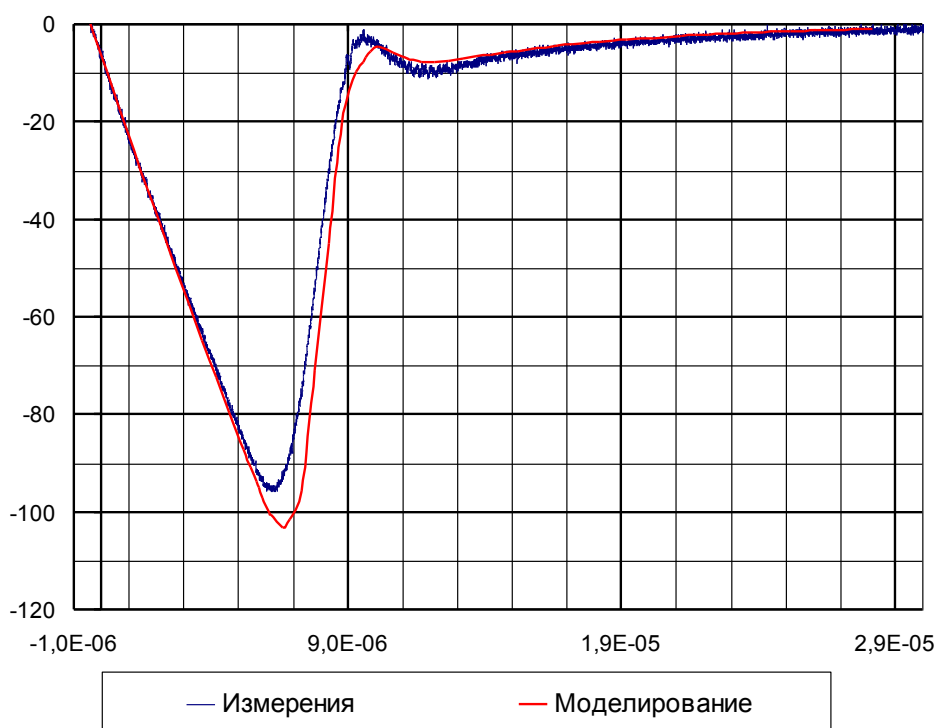


Рис. 4. Графики обратного тока модели и реального тиристора.

Причины такого различия могут быть следующими.

Во-первых, температурная зависимость времени жизни носителей заряда реального тиристора может отличаться от температурной зависимости времени жизни носителей заряда в Synopsys TCAD. Температурная зависимость времени жизни носителей заряда в Synopsys TCAD моделируется степенным законом:

$$\tau(T) = \tau_0 \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha$$

где $\alpha = 1.5$ для электронов и дырок. Для реального тиристора показатель степени α может отличаться. Для этого нужно снять температурную зависимость времени жизни реального тиристора и определить показатель степени α .

Во-вторых, реальный тиристор может не полностью включиться за время протекания прямого тока.

Результаты моделирования показали, что только к моменту времени 900 мкс относительно подачи управляющего импульса ток равномерно распространился по всему катодному эмиттеру. Таким образом, время полного включения модели тиристора составляет порядка 900 мкс. Однако в модели все элементарные ячейки основного тиристора включаются одновременно по всему периметру управляющего электрода. В реальном же тиристоре, особенно большого диаметра, содержащим вспомогательный тиристор и основной тиристор с разветвленным управляющим электродом, первоначальное включение основного тиристора происходит далеко не по всему периметру управляющего электрода, а лишь в небольшой области вблизи катода вспомогательного тиристора.

Заключение. В ходе выполнения данной работы получены следующие результаты:

1. Разработаны трехмерные модели элементарных ячеек основного и вспомогательного тиристориков для быстродействующего импульсного тиристора, учитывающие периметр управляющего электрода, а также топологию шунтировки катодного эмиттера. Единственное, что не учитывает модель элементарной ячейки основного тиристора – конструкцию управляющего электрода.

2. Результаты моделирования показали, что заряд обратного восстановления модели превышает заряд обратного восстановления реального тиристора на 9%. Причины такого различия могут быть следующими. Во-первых, температурная зависимость времени жизни носителей заряда реального тиристора может отличаться от температурной зависимости времени жизни носителей заряда в Synopsys TCAD. Во-вторых, реальный тиристор может не полностью включиться за время протекания прямого тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерменжи П. Г. Расчет силовых полупроводниковых приборов / П. Г. Дерменжи, В. А. Кузьмин, Н. Н. Крюкова и др. – М.: Энергия. 1980. – 184 с.
2. Mesh Generation Tools User Guide. – Synopsys, 2011. – 176 p. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: meshgen_ug.pdf.
3. Sentaurus Device User Guide. – Synopsys, 2011. – 1292 p. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: sdevice_ug.pdf.