

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

В.О. ТУРИН¹, М.В. КИЛЬЧИЦКАЯ ², К.А. ГЕРАСИМОВ²

¹Госуниверситет - УНПК, г. Орёл

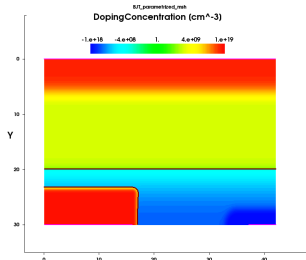
²БГТУ, г. Брянск

Введение

Моделировался мощный биполярный транзистор, выпускаемый ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск. Начальное значение времени жизни электронов $0,1 \text{ мкс}$, начальная постоянная концентрация фосфора по всему объему ячейки $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Выходные характеристики, полученные моделированием для этих параметров, совпадают с экспериментальными данными. Статический коэффициент усиления составляет 160. В двумерном сечении элементарной ячейки линий тока находятся в теле коллектора с максимум концентрации на скруглении эмиттерного перехода. В ходе моделирования варьировалось время жизни электронов в диапазоне $0,1 \text{ нс} \div 1 \text{ мкс}$. Время жизни дырок изменялось пропорционально. Уменьшение времени жизни предполагается из-за радиационного воздействия. Варьировалась постоянная концентрация фосфора по всему объему ячейки в диапазоне $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3} \div 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для учёта эффекта радиационного легирования из-за воздействия потока нейтронов. При моделировании значения тока базы выбирались из условия поддержания приблизительно одинакового значения тока коллектора для всего набора значений времени жизни электронов. С уменьшением времени жизни носителей наблюдается смещение центра плотности тока в эмиттере по закруглению боковой стенки из глубины ячейки к контактной поверхности эмиттера. При этом увеличивается горизонтальная составляющая эмиттерного тока с линиями тока, замыкающимися на базовом контакте с соответствующим уменьшением статического коэффициента усиления тока транзистора. Результаты моделирования наглядно показывают механизм деградации параметров мощного биполярного транзистора и могут быть полезны для оптимизации конструкции прибора с целью повышения его радиационной стойкости.

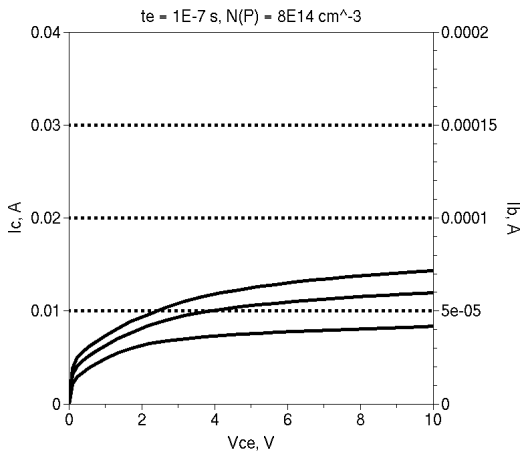
Ячейка БТ

Для проведения моделирования использовалась половина элементарной ячейки мощного биполярного транзистора, то есть все значения токов, полученные при моделировании, следует умножать на 780 (мощный транзистор состоит из 390 ячеек). Профили легирующей примеси (бора, фосфора и сурьмы) задавались в следующих приближениях: профили распределение сурьмы (n-p⁺ - переход коллектора) и бора (p-активная база и p⁺-пассивная база) - по закону Гаусса, профиль распределения фосфора (эмиттер) - по дополнительной функции ошибок. Легирование фосфором эпитаксиальной пленки моделировалось заданием постоянной концентрации фосфора по всему объему ячейки. Эмиттер промоделирован прямоугольной областью с радиусом закругления 1,5 мкм для большей наглядности приведенных ниже результатов моделирования.



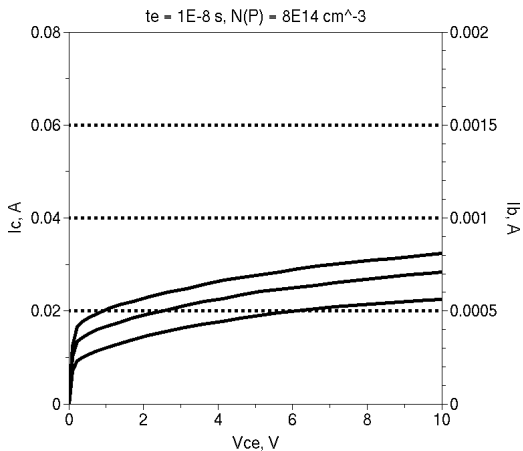
ВАХ $\tau_n = 0,1$ мкс

Рассчитанные выходные характеристики половинки ячейки транзистора для концентрации фосфора по всему объему ячейки $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и времени жизни электронов 0,1 мкс и дырок 0,03 мкс.



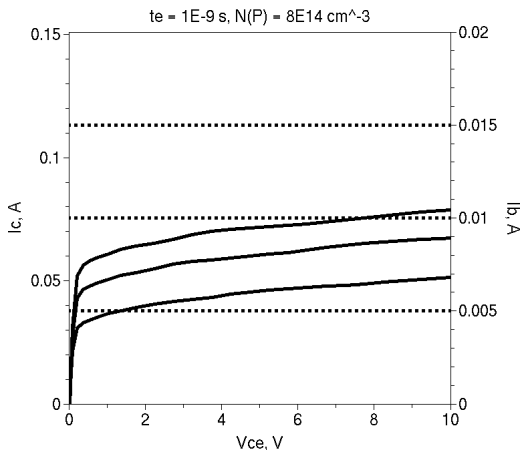
ВАХ $\tau_n = 10$ нс

Расчитанные выходные характеристики половинки ячейки транзистора для концентрации фосфора по всему объему ячейки $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и времени жизни электронов 10 нс и дырок 3 нс.



ВАХ $\tau_n = 1$ нс

Рассчитанные выходные характеристики половинки ячейки транзистора для концентрации фосфора по всему объему ячейки $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и времени жизни электронов 1 нс и дырок 0,3 нс.



Обсуждение вида ВАХ

Выходные характеристики до облучения, представленные на рис. 2, идеально совпадают с экспериментальными данными. Статический коэффициент усиления составляет 160; на характеристике виден ток Кирка (специфический наклон ВАХ при $U_{CE} = 0 \div 2$ В), просматривается эффект Эрли с характерным напряжением $-(50 \div 70)$ В. На характеристиках рис. 3 и 4 наблюдается падение статического коэффициента усиления до 50 и 10, соответственно, что соответствует известным экспериментальным данным для БТ после воздействия потока нейтронов с растущей дозой облучения.

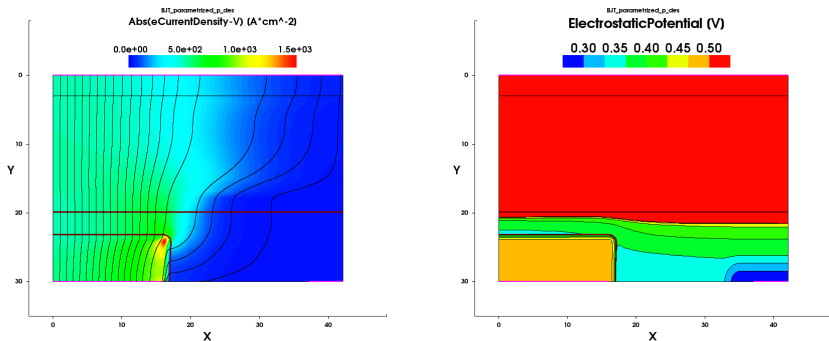
Распределение плотности тока $\tau_n = 0,1$ мкс

Рис. 5 : Распределение плотности тока с линиями тока и распределение потенциала для половинки элементарной ячейки мощного биполярного транзистора при $U_{CE} = 10$ В, $I_B = 50$ мкА.

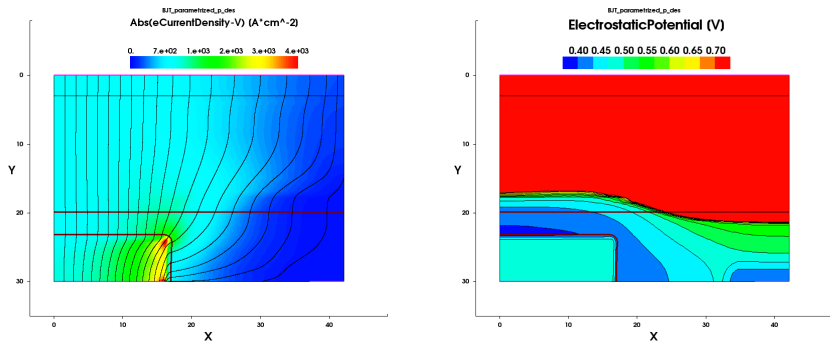
Распределение плотности тока $\tau_n = 10$ нс

Рис. 6 : Распределение плотности тока с линиями тока и распределение потенциала для половинки элементарной ячейки мощного биполярного транзистора при $U_{CE} = 10$ В, $I_B = 50$ мкА.

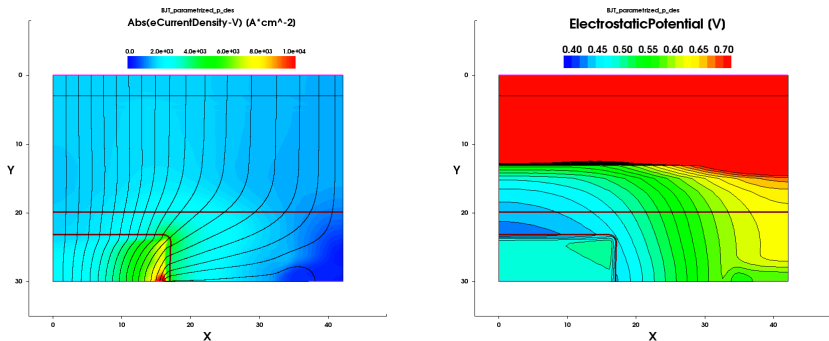
Распределение плотности тока $\tau_n = 1$ нс

Рис. 7 : Распределение плотности тока с линиями тока и распределение потенциала для половинки элементарной ячейки мощного биполярного транзистора при $U_{CE} = 10$ В, $I_B = 50$ мкА.

Обсуждение вида распределения тока и потенциала

Видно, как, по мере уменьшения времени жизни, увеличивается горизонтальная составляющая эмиттерного тока, замыкающаяся на вывод базы. Соответственно уменьшается составляющая коллекторного тока с соответствующим уменьшением коэффициента усиления тока транзистора. Проведенное моделирование дает хорошую качественную картину изменения распределения токов в структуре при уменьшении времени жизни носителей. На рис. 5 максимум плотности тока эмиттера находится на угле эмиттерного перехода в глубине структуры. По мере уменьшения времени жизни этот максимум смещается по боковой стенке эмиттерного перехода к поверхности, уходя из области, где расположена собственно транзисторная структура. Распределение потенциалов в структуре показывает процесс образования «потенциальной ямы» на дне эмиттерного перехода.

Выводы

Результаты моделирования показали, что главной причиной деградации параметров мощных биполярных транзисторов, из-за облучения нейтронами, является изменение линий протекания эмиттерного тока вследствие уменьшения времени жизни носителей таким образом, что основная часть этого тока начинает замыкаться на базовом контакте, минуя транзисторную структуру. Полученные в результате проведенного моделирования данные хорошо совпадают с экспериментальными данными и наглядно показывают механизм деградации параметров мощного биполярного транзистора.

Работа была поддержана внутренним грантом Госуниверситета-УНПК «Приборно-технологическое моделирование мощных кремниевых биполярных транзисторов с учётом эффектов деградации» и грантом РФФИ 12-02-97534 «Модели и моделирование современных и перспективных полевых транзисторов».

Авторы выражают благодарность Брюхно Н.А, Пояркову В.Н. и Кшенскому О.Н. за обсуждение результатов работы и Сотникову В.Н. за помощь в проведении расчётов.