

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ТИРИСТОРА

Е.М. Гейфман, А.В. Гришанин

ОАО «Электровыпрямитель», 430000, Россия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126,
тел./факс: +7(8342)47-44-88, ovbp@mail.ru

Авторами разработана изотермическая квазитрехмерная математическая модель высоковольтного быстродействующего тиристора в радиально-симметричном приближении, учитывающая реальные геометрические и электрофизические параметры полупроводниковой структуры, условия работы в составе электрической схемы, эффекты высокого уровня инжекции и сильного легирования. Проведено математическое моделирование влияния электронного облучения на динамические параметры быстродействующего тиристора.

Введение

Основной тенденцией развития силовых полупроводниковых приборов (СПП), в том числе и тиристоров, является увеличение коммутационной мощности при высоком быстродействии. Однако, при проектировании тиристоров существует ряд ограничений, которые делают невозможным сочетание в одном классе приборов максимальных значений его основных характеристик – повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии (U_{DRM}), импульсного напряжения в открытом состоянии (U_{TM}), времени выключения (t_q) и т.д.

Анализ существующих математических моделей быстродействующих тиристоров [1] показал, что в них не учитывается реальный профиль распределения концентрации легирующей примеси, используется одномерное приближение, а также не учитывается ряд важных физических эффектов (эффекты высокого уровня инжекции и высокого уровня легирования, учет влияния рекомбинационных центров (РЦ), образованных в результате электронного облучения), которые в реальных режимах работы составляют существо процесса. Это в свою очередь снижает практическую ценность данных моделей для расчета и проектирования тиристоров.

Быстродействие или частотный предел тиристоров, как правило, обуславливаются переходным процессом и временем выключения.

Значение параметра t_q в свою очередь, определяется временем жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в широкой p-базе τ_p . Практически все методы уменьшения времени жизни ННЗ в монокристаллическом кремнии основаны на создании дополнительных каналов рекомбинации носителей заряда через ловушки, вводимые в объем кристалла либо путем диффузии, либо радиационными методами при облучении полупроводника пучком частиц высоких энергий [2].

На ОАО «Электровыпрямитель» регулирование времени жизни производится путем облучения электронами с энергией близкой к порогу дефектообразования [3].

Математическая модель тиристора

Для моделирования влияния электронного облучения на параметры переходного процесса выключения высоковольтного тиристора была разработана изотермическая квазитрехмерная ма-

тематическая модель в радиально-симметричном приближении, описывающая реальную полупроводниковую структуру в виде множества повторяющихся элементарных структур цилиндрической формы, представленная на рисунке 1.

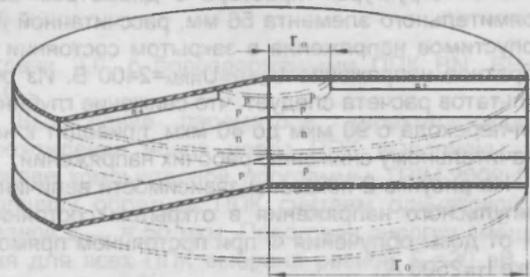


Рис. 1. Конструкция элементарной ячейки моделируемой структуры

Для описания стационарных и переходных процессов необходимо самосогласованное решение феноменологической системы дифференциальных уравнений полупроводника (уравнений непрерывности, плотностей токов, Пуассона) и уравнений электрического баланса внешней цепи.

Модель учитывала:

- 1) Изменение ширины запрещенной зоны собственного кремния с изменением температуры и под воздействием эффектов высокого легирования;
- 2) Рассеяние носителей заряда на фонах и на заряженных ионах примеси, а также электронно-дырочное рассеяние;
- 3) Рекомбинацию Шокли-Холл-Рида с временами жизни неосновных носителей заряда, зависящими от концентрации легирующей примеси и температуры, а так же Оже-рекомбинацию;
- 4) При моделировании влияния электронного облучения, совместно с феноменологической системой дифференциальных уравнений решаются дифференциальные уравнения для вероятности размещения электрона на энергетическом уровне РЦ. Рассчитывается общая рекомбинация с участием всех РЦ.

При облучении потоком электронов с энергией 7 -- 9 МэВ в тиристоре формируется однородный по толщине полупроводниковой структуры профиль распределения РЦ.

Принимались в рассмотрение следующие РЦ:

А-центры: $(E_C-0,164)$ эВ, $\sigma_p \sim 3,0 \times 10^{-15}$ см², $\sigma_n \sim 1,2 \times 10^{-14}$ см², $g_n = 4$, $g_p = 0,25$.

Дивакансии: $(E_C-0,43)$ эВ, $\sigma_p \sim 7,0 \times 10^{-15}$ см², $\sigma_n \sim 4 \times 10^{-15}$ см², $g_p = 1,14$, $g_n = 0,88$.

Средние значения скоростей введения А-центров и дивакансий при облучении моноэнергетическим потоком электронов составляет $N_A/\Phi = 50 \times 10^3$ см⁻¹ и $N_{DV}/\Phi = 1,1 \times 10^3$ см⁻¹, соответственно.

Результаты моделирования

С применением разработанной математической модели высоковольтного тиристора проведено исследование возможности улучшения динамических характеристик, в частности исследована зависимость времени выключения от глубины залегания р-п-переходов.

Расчеты проводились с использованием программы DESSIS пакета TCAD 10.0 фирмы Synopsys [4] для математической модели полупроводниковой структуры тиристора с диаметром выпрямительного элемента 56 мм, рассчитанной на допустимое напряжение в закрытом состоянии и обратное напряжение $U_{DRM} = U_{RRM} = 2400$ В. Из результатов расчета следует, что снижение глубины р-п-перехода с 90 мкм до 40 мкм, приводит к незначительному снижению рабочих напряжений.

На рисунке 2 показаны зависимости величины импульсного напряжения в открытом состоянии U_T от дозы облучения Φ при постоянном прямом токе $I_T = 2500$ А.

Из рисунка видно, что тиристор с глубиной р-п-перехода, равной 40 мкм имеет более слабую зависимость импульсного напряжения в открытом состоянии U_T от дозы облучения Φ .

Было проведено моделирование переходного процесса выключения. Использовались следующие параметры процесса коммутации (определяемые внешней схемой):

импульс прямого тока $I_T = 800$ А, скорость спада прямого тока $di/dt = -25$ А/мкс; обратное напряжение $U_R = 100$ В; скорости нарастания импульса прямого напряжения $du/dt = 50$ В/мкс; прямое напряжение, прикладываемое к тиристорам $U_D = 1600$ В.

Из полученных результатов следует, что снижение глубины р-п-перехода с 90 мкм до 40 мкм

позволяет более чем на 25 %, снизить время выключения тиристора, при одинаковых значениях U_T равных $U_{TM} = 2,2$ В.

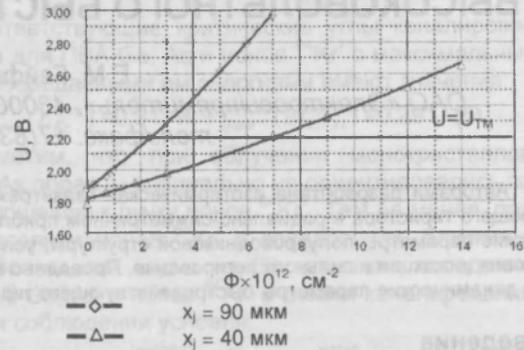


Рис.2. Зависимость величины U_{TM} от дозы облучения Φ

Заключение

Представленные результаты моделирования влияния электронного облучения на динамические параметры высоковольтного тиристора позволяют создавать мощные тиристоры с улучшенными динамическими параметрами. Следовательно, применение данного типа тиристоров позволит уменьшить потери энергии на высоких частотах.

Список литературы

1. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов / В.П. Григоренко, П.Г. Дерменжи, В.А. Кузьмин, Т.Т. Мнацаканов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Гейфман Е.М. Высоковольтные полупроводниковые приборы с повышенным быстродействием // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2000. – 304 с.
3. Гейфман Е.М., Чибиркин В.В. Методы контролируемого регулирования времени жизни неравновесных носителей заряда в производстве силовых полупроводниковых приборов. Учеб. пособие // Саранск: Изд-во Мордовского университета. – 2002. – 104 с.
4. DESSIS ISE-TCAD 10.0: User's Manual / ISE-AG Inc. – 2004. – 630 p.

MODELING OF INFLUENCE ELECTRON IRRADIATION ON DYNAMIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR HIGH-VOLTAGE FAST THYRISTOR

Geyfman E.M., Grishanin A.V.

Joint-Stock Company "Elektrovypryamitel", Russia, Saransk, Proletarskaya Str., 126,
phone/fax: +7(8342)47-44-88, e-mail: maovbp@mail.ru

The isothermal quasi-three-dimensional mathematical model of high-voltage fast thyristor in cylindrical approximation have been developed. The real geometrical and electro-physical parameters of semiconductor structure, operating regime in external electric circuit, effects of high injection levels, heavy doping, have been taken into account. The modeling of influence of electron irradiation on dynamic parameters of high-voltage fast thyristor is carried out.