

Моделирование PIN-диода Skyworks 4609 в среде Sentaurus TCAD

Р.Р. Кинзябулатов, В.В. Перепеловский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе приводятся результаты моделирования PIN-диода Skyworks 4609 в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Численное моделирование позволило определить параметры PIN-диода по ограниченному набору данных, приведенных в спецификации. В работе исследована зависимость ВАХ моделируемого PIN-диода от температуры. Произведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными характеристиками PIN-диода.

Ключевые слова: PIN-диод, Skyworks 4609, Synopsys Sentaurus TCAD

1. Введение

Кремниевые PIN-диоды являются важными компонентами в силовой электронике. Основной проблемой таких диодов являются большие потери мощности, которые напрямую зависят от электрических характеристик PIN-диода [1]. Для определения оптимальных характеристик PIN-диодов целесообразно использовать приборно-технологические системы автоматизированного проектирования (САПР). Примером САПР для численного моделирования полупроводниковых структур является Synopsys Sentaurus TCAD [2]. Так, в работе [3] проводится численное моделирование и параметрическое исследование прямой ветви ВАХ PIN-диода, а в работах [4-7] исследуется влияние температуры на характеристики PIN-диодов в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Основная задача данной работы состояла в определении параметров топологии и концентраций, не указанных в технологическом описании диода Skyworks 4609, путем сопоставления результатов моделирования с приведенными в спецификации данными.

2. Построение модели

Исходными данными для моделирования PIN-диода являлась толщина *i*-слоя равная 20 нм, а также его геометрические размеры:

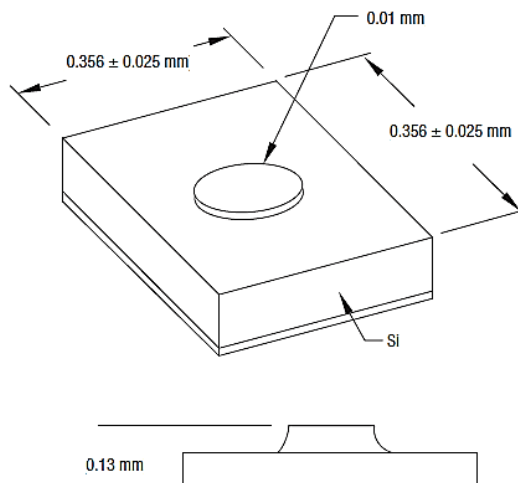


Рисунок 1. Геометрические размеры PIN-диода.

Параметры PIN-диода, приведенные в спецификации (таблица 1):

Таблица 1. Параметры pin-диода

Минимальное напряжение пробоя, В	Емкость C_j на частоте 2.6 ГГц, пФ	Время восстановления, нс
250	0.26	5

Для моделирования устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD доступно несколько моделей расчёта: квази-одномерная, квази-двухмерная, трехмерная и цилиндрическая. Наиболее точной моделью является трехмерная, второй по точности моделью является цилиндрическая модель. Она использует двухмерную сетку, которая математически достраивается до трехмерной при помощи осевой симметрии. Основным ее преимуществом перед трехмерной моделью является скорость расчета, сопоставимая со скоростью расчета квази-двухмерной структуры. Так как i-слой и верхний контакт исследуемого PIN-диода имеют осевую симметрию, в работе используется цилиндрическая модель расчета. Топология модели представлена на рисунке 2.

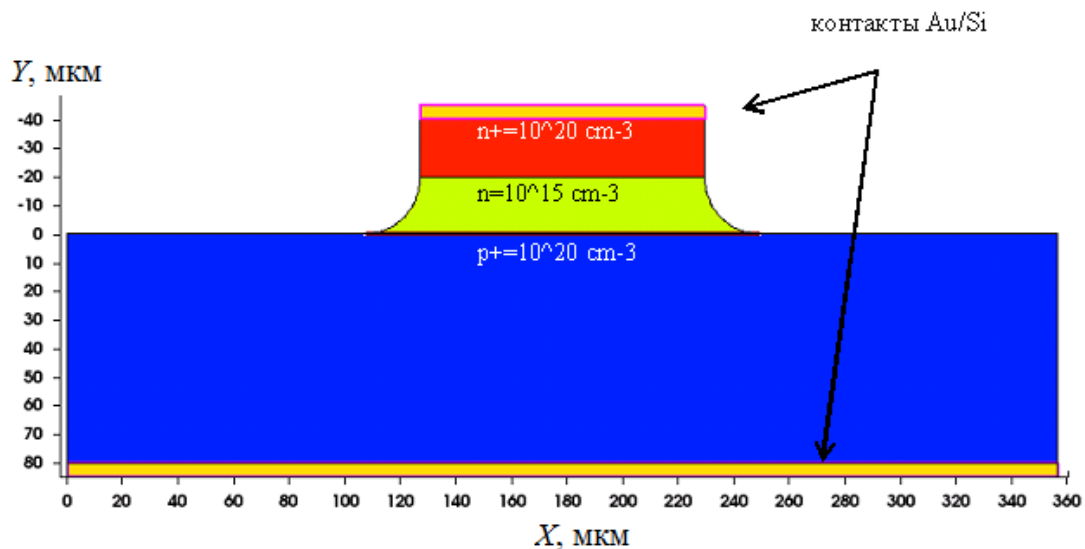


Рисунок 2. Реализация топологии PIN-диода Skyworks 4609 в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Ось вращения цилиндрической модели располагается вертикально посередине структуры в координате 178 мкм.

Для построенной модели выполнена калибровка. Ее этапами являлись – проверка характерного для PIN-диодов «X»-профиля концентраций при 0В на контактах PIN-диода; проверка симметричности рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRH) при различных типах легирования i-слоя; проверка постоянства полного тока в каждом горизонтальном сечении i-слоя. В представленной модели распределение концентраций электронов и дырок при 0В соответствует характерному «X»-профилю PIN-диодов. Хорошо проявляется симметричность SRH-рекомбинации. При p-типе легирования i-слоя основная рекомбинация происходит в верхней области i-слоя, а при n-типе – в нижней.

На рисунке 3 показано относительное отклонение от среднего значения полного тока вдоль i-слоя:

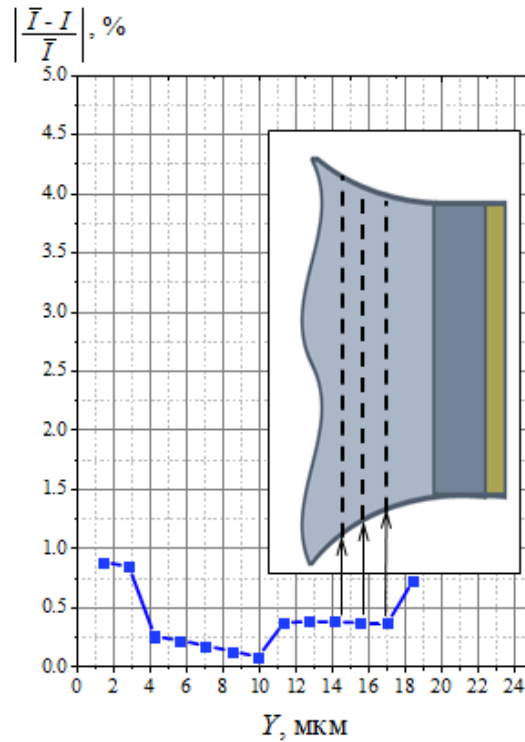


Рисунок 3. Относительное отклонение от среднего значения полного тока вдоль i-слоя.

Выполненная калибровка показала работоспособность построенной модели.

3. Результаты моделирования

На рисунке 4 представлены результаты моделирования пробоя PIN-диода. Напряжение пробоя, полученное в результате моделирования равно 252В, что практически совпадает с экспериментальным значением напряжения пробоя 250В (таблица 1).

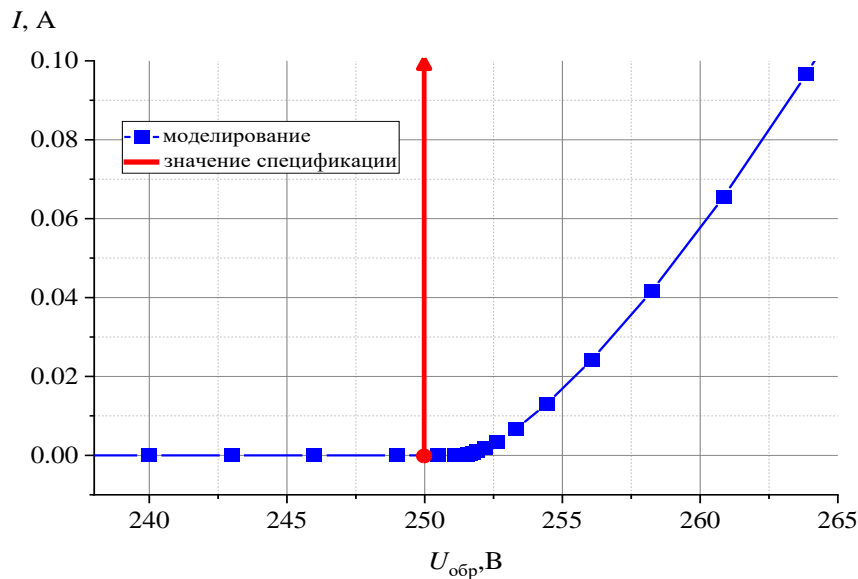


Рисунок 4. Обратная ветвь ВАХ PIN-диода.

На рисунках 5-7 приводятся результаты исследования характеристик PIN-диода в зависимости от толщины i -слоя. Причинами различных толщин i -слоя могут являться технологические отклонения при изготовлении PIN-диода.

На рисунке 5 показана зависимость емкости C_j PIN-диода от частоты для различных толщин i -слоя.

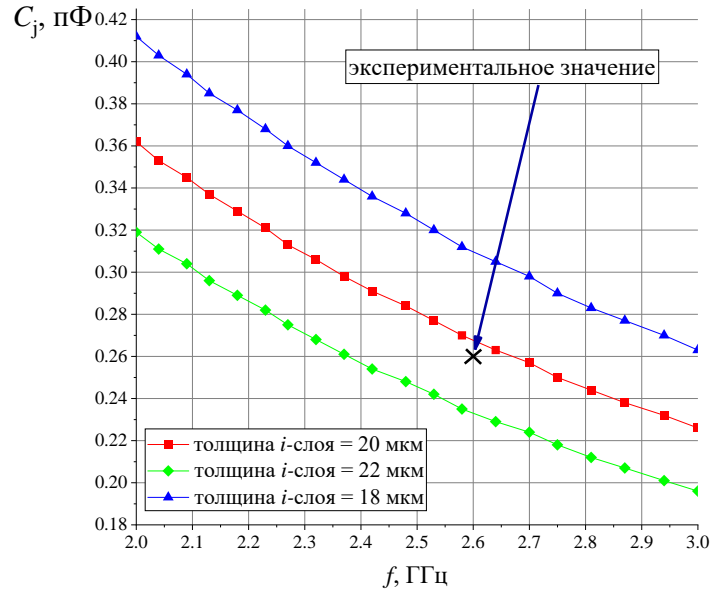


Рисунок 5. Емкость PIN-диода в зависимости от частоты.

Емкость, измеренная экспериментально при 2.6 ГГц соответствует значению 0.26 пФ (таблица 1). На рисунке 5 емкость диода при 2.6 ГГц равна 0.267 пФ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показаны характеристики переключения PIN-диода с учетом технологических отклонений при изготовлении i -слоя.

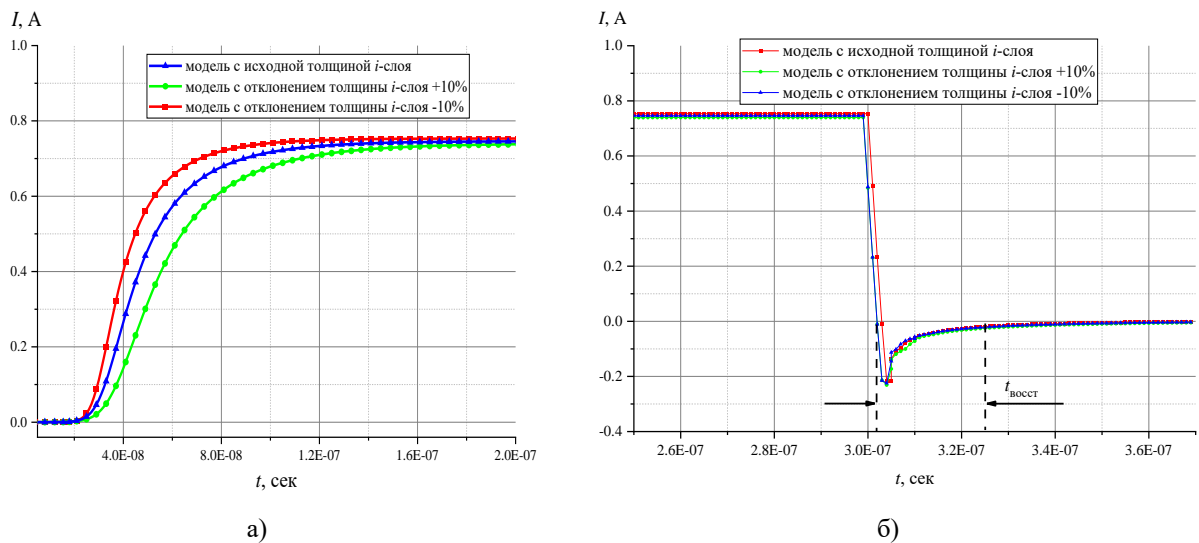


Рисунок 6. Характеристики переключения pin-диода при различных толщинах i -слоя: а) время открытия pin-диода; б) время восстановления pin-диода.

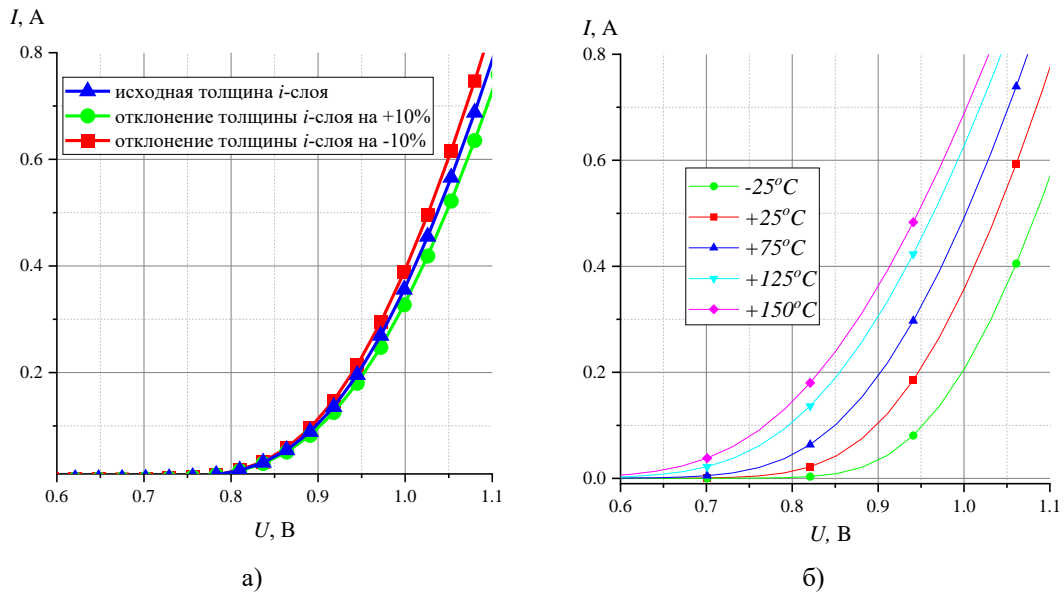


Рисунок 7. а) ВАХ pin-диода при различных толщинах i-слоя; б) ВАХ pin-диода при различных температурах.

4. Заключение

В рамках обратного проектирования PIN-диода Skyworks 4609 определены: размер i-слоя, концентрация доноров в i-слое, концентрация доноров и акцепторов в приконтактных областях. Выполнено моделирование процесса открытия PIN-диода и рассчитана зависимость емкости PIN-диода от частоты. Выполнено параметрическое исследование PIN-диода. Полученные результаты моделирования совпадают со значениями, приведенными в спецификации PIN-диода Skyworks 4609 с точностью более 95%. Обратное проектирование в среде Synopsys TCAD позволило дополнить спецификацию, необходимую для создания диода с характеристиками аналогичными или более высокими в сравнении с PIN-диодом Skyworks 4609.

Список литературы

1. Yamashita, Y. Numerical modeling of reverse recovery characteristic in silicon pin diodes / Y. Yamashita, [at al.] // Solid-State Electronics. – 2018. – Vol. 145. – P. 8 – 18.
2. Sentaurus, T. S. Device User Guide, ver // G-2012.06, Synopsys / T.S Sentaurus – 2012.
3. Jubadi, W. M. Simulations of variable I-layer thickness effects on silicon PIN diode IV characteristics / W. M. Jubadi // 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA). – 2010. – P. 428-432.
4. Jiang, Y. 10kV SiC MPS diodes for high temperature applications / Y. Jiang, [at al.] // 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). – 2016. – P. 43-46.
5. Ghandi, R. High-voltage 4H-SiC PiN diodes with etched junction termination extension / R. Ghandi, [at al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2009. – Vol. 30. – №. 11. – P. 1170-1172.
6. Salemi, A. Fabrication and Design of 10 kV PiN Diodes Using On-Axis 4H-SiC / A. Salemi // Materials Science Forum. – 2014. – Vol. 778. – P. 836-840.
7. Příbytný, P. TCAD simulation methodology for full 3-D electro-physical and advanced thermal analysis of power modules / P. Příbytný, [at al.] // 2017 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – 2017. – P. 249-252