УДК 621.382

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Курленко А.Д.[1], Громыко В.А.[1], Ловшенко И.Ю.[2], Биран С.А.[2]

[1]Учреждение образования «Национальный детский технопарк», Минск, Республика Беларусь

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by

Аннотация: проведено сравнение аналитического метода и метода Монте-Карло при моделировании ионной имплантации в монокристаллический кремний в диапазоне энергий 20–200 кэВ при угле наклона пучка 7 °. Установлено, что аналитический метод обеспечивает физически корректные зависимости глубины залегания *p-n* перехода и удельного поверхностного сопротивления от энергии. Метод Монте-Карло при 10^5 ионов воспроизводит аналитический результат с малым отклонением, при 10^3 ионов результаты содержат значительный статистический разброс и не пригодны для точных расчетов.

Ключевые слова: ионная имплантация, метод Монте-Карло, аналитические модели, САПР микроэлектроники.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация является ключевым этапом формирования легированных областей полупроводниковых приборов, а корректность ее моделирования на стадии проектирования определяет электрофизические характеристики формируемых структур [1]. В системах автоматизированного проектирования микроэлектроники реализованы два принципиально различных подхода: аналитический метод, основанный на аппроксимации профиля распределения примеси функцией Пирсона IV типа, и статистический метод Монте-Карло (МК) в приближении бинарных столкновений [2]. Каждый подход обладает определенными ограничениями по диапазону энергий, типу ионов и условиям проведения процесса, однако систематическое сопоставление результатов, получаемых указанными методами в единых условиях, ограничено представлено в литературе. Цель работы – сравнительная оценка аналитического метода и метода Монте-Карло при моделировании ионной имплантации.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось в среде технологического моделирования, реализующей как аналитический метод, так и метод МК. Исходная структура – монокристаллическая подложка Si (100): *n*-типа (легированная фосфором, удельное сопротивление 4,5 Ом·см) при имплантации бора и *p*-типа (легированная бором, удельное сопротивление 10 Ом·см) при имплантации фосфора и мышьяка с оксидной маской толщиной 1 мкм и окном для проведения имплантации. Доза имплантации фиксировалась на уровне 10^{14} см$^{-2}$, угол наклона пучка ионов составлял 7 ° для подавления эффекта каналирования. Энергия варьировалась от 20 до 200 кэВ с шагом 20 кэВ. Исследовано три типа ионов: B^+, P^+ и As^+. Число моделируемых ионов в методе МК составило 10^3, 10^4 и 10^5. Определяемые характеристики – глубина залегания *p-n* перехода и удельное поверхностное сопротивление. Сравнение методов проводилось путем сопоставления зависимостей указанных характеристик от энергии и дозы имплантации, а также угла наклона пучка ионов, полученных аналитическим методом и методом МК при последовательном увеличении числа моделируемых ионов. Результаты представлены на примере имплантации фосфора в подложку *p*-типа. На рисунке 1 представлена зависимость глубины залегания *p-n* перехода от энергии имплантации. Аналитический метод обеспечивает монотонно возрастающую линейную зависимость с ростом глубины от 0,44 мкм при 20 кэВ до 0,99 мкм при 200 кэВ. Аналогичный монотонный характер зависимости глубины залегания от энергии наблюдается для мышьяка, однако с существенно меньшим наклоном, что обусловлено преобладанием ядерного торможения для тяжелых ионов. Для бора аналитический метод демонстрирует немонотонное поведение с локальным провалом в области 100–150 кэВ, обусловленное ограниченностью табличных данных.

При 10^3 моделируемых ионов наблюдается значительный разброс точек относительно линии тренда, зависимость приобретает ступенчатый характер. При 10^4 ионов основная масса точек концентрируется вблизи общего тренда, однако единичные провалы сохраняются. При 10^5 ионов зависимость становится практически монотонной с единичными отклонениями, а в большинстве случаев расхождение с результатами для аналитического метода не превышает 10 % относительно последних (здесь и далее). Аналогичные результаты наблюдаются для удельного поверхностного сопротивления: аналитический метод обеспечивает гладкий квадратичный спад сопротивления от 640 Ом/кв при 20 кэВ до 370 Ом/кв при 200 кэВ; метод МК при

10^5 ионов практически воспроизводит данную зависимость с отклонением не более 5 %, тогда как при 10^3 ионов разброс составляет порядка ±100 Ом/кв, что делает результат непригодным для точных расчетов.

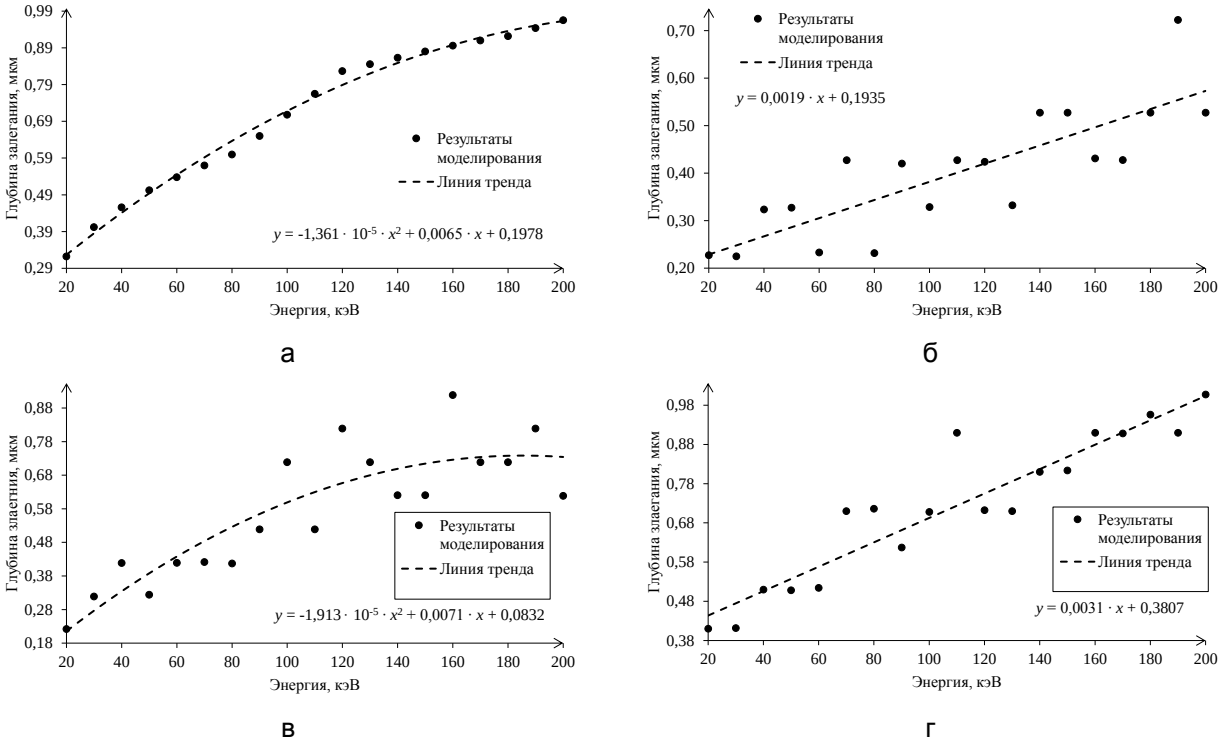


Рисунок 1. Зависимость глубины залегания фосфора от энергии, полученная аналитическим методом (а), методом Монте-Карло при 1000 ионов (б), при 10 000 ионов (в) и при 100 000 ионов (г)

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного анализа установлено, что аналитический метод обеспечивает монотонные физически корректные зависимости глубины залегания и удельного поверхностного сопротивления от энергии в диапазоне 20–200 кэВ при угле наклона 7 ° и является предпочтительным при стандартных условиях имплантации вследствие меньших вычислительных затрат. Метод Монте-Карло при 10^5 ионов в таких же условиях воспроизводит аналитический результат с отклонением не более 10 %. Минимально необходимое число моделируемых ионов для получения количественно достоверных результатов также составляет 10^5; при 10^3 ионов разброс значений делает результат непригодным для точных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Effects of Ion Channeling and Co-Implants on Ion Ranges and Damage in Si: Studies With PL, SRP, SIMS and MC Models / M. I. Current [et al.] // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2024. – Vol. 12. – P. 399–406.

[2] Accurate and efficient 3D analytic ion implantation model based on Legendre polynomials / A. Terterian [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2024. – Vol. 169. – P. 107933.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ANALYTICAL AND STATISTICAL ION IMPLANTATION MODELS IMPLEMENTED IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

A. Kurlenko[1], V. Hramyka[1], I. Lovshenko[2], S. Biran[2]

[1]National Children's Technopark, Minsk, Republic of Belarus, lovshenko@bsuir.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a comparative study of analytical and Monte Carlo methods for modeling ion implantation into single-crystal silicon was conducted in the energy range of 20–200 keV at a beam tilt angle of 7 °. It is established that the analytical method provides physically correct dependencies of the p-n junction depth and sheet resistance on energy. The Monte Carlo method using 10^5 ions reproduces the analytical results with minor deviations, whereas at 10^3 ions, the results exhibit significant statistical scatter and are unsuitable for precise calculations.

Keywords: ion implantation, Monte Carlo method, analytical models, microelectronics CAD.