УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 90 НМ

Новиков Ф.П., Пашкевич В.Э., Ветошкин В.В., Якуш В.С., Волчёк В.С., Ловшенко И.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by

Аннотация: в работе представлены результаты компьютерного моделирования полного технологического маршрута формирования n-канального МОП-транзистора с проектными нормами 90 нм, охватывающего более 20 основных и 50 вспомогательных операций. Рассмотрены этапы формирования изоляции типа «мелкая канавка» глубиной 310 нм с углом наклона стенок 85°, выращивания подзатворного диэлектрика толщиной 7 нм, формирования поликремниевого затвора длиной 140 нм и боковых диэлектрических спейсеров шириной 50 нм.

Ключевые слова: САПР, моделирование, 90 нм, метод Монте-Карло, ионная имплантация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для полупроводниковых структур, сформированных по проектным нормам 90 нм нереализуемо масштабирование по Деннарду [1] вследствие экспоненциального роста токов утечки через подзатворный диэлектрик. Для снижения этого эффекта применён нитридированный оксид кремния (SiON) с эквивалентной оксидной толщиной от 1,6 до 2,0 нм. Применение технологии напряжённого кремния (эпитаксиальный SiGe) в сток-истоковых областях МОП-транзисторов позволяет создать сжимающее и растягивающее напряжения в области канала для p- и n-канальных транзисторов соответственно. Литография реализована на ArF-эксимерных лазерах (λ = 193 нм) с числовой апертурой до 0,93. Технологический маршрут включает плазменное травление канавок для формирования межэлементной изоляции, имплантацию B/P/As с энергиями от 1 до 200 кэВ, быстрый термический отжиг при пиковых температурах до 1100 °C и формирование силицида никеля для контактных областей.

Моделирование процессов требует учёта нестационарной ускоренной диффузии, кластеризации примесей, квантово-механических поправок для инверсионного слоя и короткоканальных эффектов с решением 2D/3D уравнений Пуассона и непрерывности.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполнена настройка параметров физико-математических моделей технологических операций в пакетах Athena и Victory Process, обеспечивающих моделирование технологического маршрута формирования приборных структур с проектными нормами 90 нм. Калибровка проведена сопоставлением расчётных профилей легирования, глубин переходов и толщин диэлектриков с эталонными SIMS-данными. Для имплантации – ключевой операции формирования карманов, HALO, LDD и сток-истоковых областей используется оператор IMPLANT с обязательными параметрами DOPANT, ENERGY, DOSE; параметр SUB.ROT задаёт ориентацию подложки (<100> при 0°, <110> при 45°) и критичен для моделирования каналирования при малых углах. В Athena реализован аналитический метод на основе таблиц моментов – быстрый, но ограниченный углами наклона >10°, не учитывающий затенение, обратное рассеяние и накопление дефектов. Victory Process поддерживает метод Монте-Карло (BCA) с числом траекторий N.ION, который учитывает кристаллическую структуру, ядерное и электронное торможение, каскады столкновений; установлено, что для бора с энергией больше 10 кэВ необходимо использовать количество ионов не меньше 500 000, для мышьяка – от 100 000 до 300 000, а оптимальное значение подобрано посредством 1D-моделирования. Victory Process автоматически накапливает повреждения (аморфизация, избыточные межузельные атомы) при последовательных имплантациях без отжига, что влияет на деканализацию последующих ионов, в то время как в Athena этот эффект отсутствует. Температура пластины учитывается только при применении метода Монте-Карло. Также в Victory Process диффузия описывается парными моделями с параметром DAM.FAC, масштабирующим начальную концентрацию межузельных атомов (калибруется по глубине p-n-перехода).

Показано, что Victory Process обеспечивает более качественное автоматическое построение сетки и лучшую сходимость по сравнению с Athena, а большинство вычислительно трудоёмких численных алгоритмов в Victory Process эффективно распараллелены. Результирующая полная структура n-канального МОП-транзистора представлена на рисунке 1.

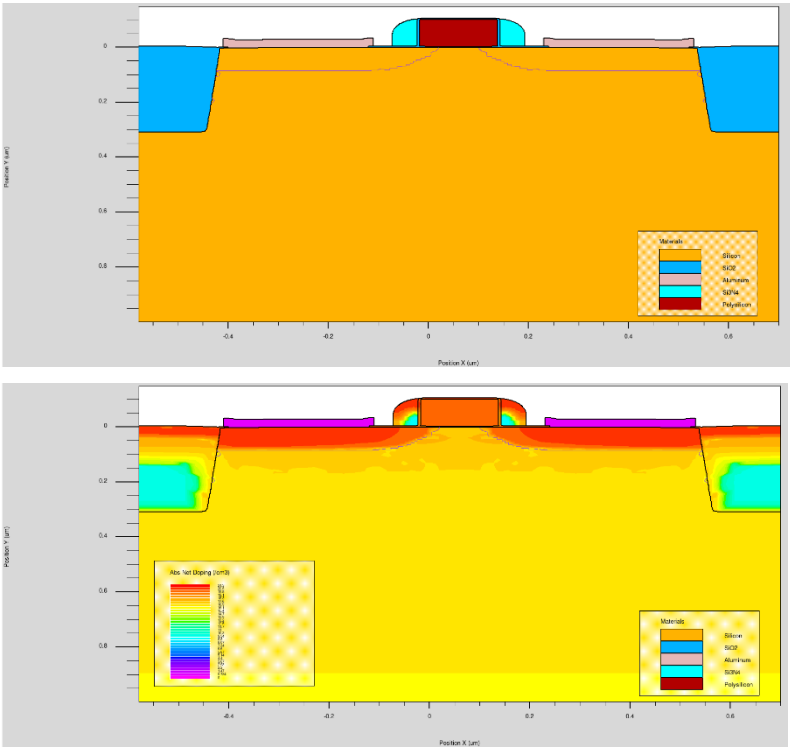


Рисунок 1. Итоговая структура МОП-транзистора с отображением границ p-n-переходов (а) и распределения примеси (б)

В ходе моделирования подтверждено, что при использовании метода Монте-Карло линейное распараллеливание расчетов приводит к существенному увеличению производительности. Так, использование механизмов распараллеливания вычислений до 12 потоков обеспечило десятикратное ускорение наиболее ресурсоёмких этапов моделирования без потери точности по сравнению со стандартным подходом, реализованным в Athena. Установлена эффективность применения физической модели термического окисления с решением уравнений вязкого течения для непланарных структур, что исключило появление ошибок, связанных с расчетной сеткой на наклонных поверхностях, и повысило скорость сходимости расчёта до 30 % по сравнению со стандартными подходами.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что для имплантации при формировании областей карманов, пороговых и исток-стоковых областей обязательно применение статистического метода Монте-Карло с набором от 300 000 до 2 000 000 траекторий ионов. Применение метода Монте-Карло при моделировании технологического маршрута формирования кремниевых приборных структур с проектными нормами 90 нм позволяет корректно учесть эффекты каналирования и накопления кристаллических повреждений, а использование Victory Process обеспечивает повышенную точность и производительность расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions / R. H. Dennard [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1974. – Vol. SC-9, № 5. – P. 256–268.

MONTE CARLO SIMULATION OF PROCESS FLOW FOR SILICON DEVICE STRUCTURES

F.P. Novikau, V.E. Pashkevich, V.V. Vetoshkin, V.S. Yakush, V.S. Volcheck, I.Yu. Lovshenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, lovshenko@bsuir.by

Abstract: this paper presents the results of computer simulation of the complete process flow for forming an n-channel MOSFET with 90 nm node, covering more than 20 main and 50 auxiliary operations. The stages of forming shallow trench isolation with a depth of 310 nm and an 85° sidewall slope angle, a gate dielectric with a thickness of 7 nm, a polysilicon gate with a length of 140 nm and sidewall spacers with a width of 50 nm are considered.

Keywords: CAD, simulation, 90 nm, Monte Carlo method, ion implantation.