

Моделирование процессов ионной имплантации для формирования сверхмелкозалегающих $p-n$ переходов МОП - транзисторов.

Н.Е. Курбанова, студент каф. ФЭ

*Научный руководитель Т.И. Данилина проф., к.т.н.
г. Томск, ТУСУР*

Введение

Одной из основных задач субмикронной технологии сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) является получение мелкозалегающих $p-n$ -переходов с необходимыми электрическими характеристиками и низкой концентрацией дефектов. Так, уменьшение длины канала в МОП - транзисторах – лучший способ снижения потребляемой мощности и увеличения плотности упаковки элементов в интегральных схемах. Уменьшение глубины легированных областей позволяет устранить или минимизировать короткоканальные эффекты. Эти эффекты связаны с малой длиной канала и сильно зависят от глубины залегания истоковых и стоковых $p-n$ -переходов. Приемлемые характеристики в МОП - транзисторах с коротким каналом могут быть достигнуты формированием мелких $p-n$ -переходов в подложках с низким уровнем легирования.

Экспериментальный подбор технологических режимов производства СБИС – дорогостоящий и длительный, поэтому математическое моделирование является необходимым инструментом разработки и исследования используемых процессов, в частности, ионной имплантации и диффузионного переноса имплантированных атомов при постимплантационных термообработках.

В настоящей работе рассматриваются физико-математические модели, позволяющие достаточно точно моделировать современные технологические процессы создания элементной базы СБИС. Средой разработки модели ионной имплантации является программа TCAD фирмы Synopsys.

Цель работы

Получение мелкозалегающих $p-n$ переходов моделированием процесса ионной имплантации в Synopsys TCAD.

Низкоэнергетическая имплантация и формирование сверхмелких переходов.

Преимущества ионной имплантации (ИИ) проявляются в возможности создания очень мелких $p-n$ -переходов для СБИС [1]. Формирование сверхмелких (менее 50 нм) имплантированных слоев является одной из главных и наиболее интересных задач в области ионного легирования Si. Формирование сверхмелких переходов лимитируется:

- глубиной пробега ионов в полупроводниковом материале (энергией и массой ионов, эффектом каналирования ионов);
- глубиной диффузии примеси при термообработке, необходимой для активации примеси и отжига имплантационных дефектов.

Методы решения задачи:

- Уменьшение энергии ионов.
- Увеличение массы ионов (молекулярные ионы, кластерные ионы).

Выбор математической модели расчета ионной имплантации.

Для построения профилей распределения примеси в TCAD наиболее часто используются такие функции, как: гауссиана, Пирсон IV (ре), а также распределение, рассчитанное по методу Монте-Карло. Выбор функции зависит от многих параметров: учета асимметрии распределения примеси, связанной с потерями энергии ионами, вида имплантируемых ионов (легкие или тяжелые), быстроты оценки распределения пробегов и т.п.[2]. В данной работе моделирование профилей проводилось с использованием функции распределения – Пирсон (IV).

Методы решения задачи.

Одним из способов управления глубиной залегания p-n переходов является уменьшение энергии внедряемых ионов. В данной работе рассматривалась имплантация бора, и выбор необходимых значений энергий для решения поставленной задачи был основан на предписаниях международной технологической карты для полупроводникового производства (The International Technology Roadmap for Semiconductors) в соответствии с топологическими нормами [1].

В результате в модулях среды TCAD – DIOS (см. приложение 1) и INSPECT [3] смоделированы и построены распределения примеси с соответствующими энергиями и графически определены значения p-n переходов (рис.1).

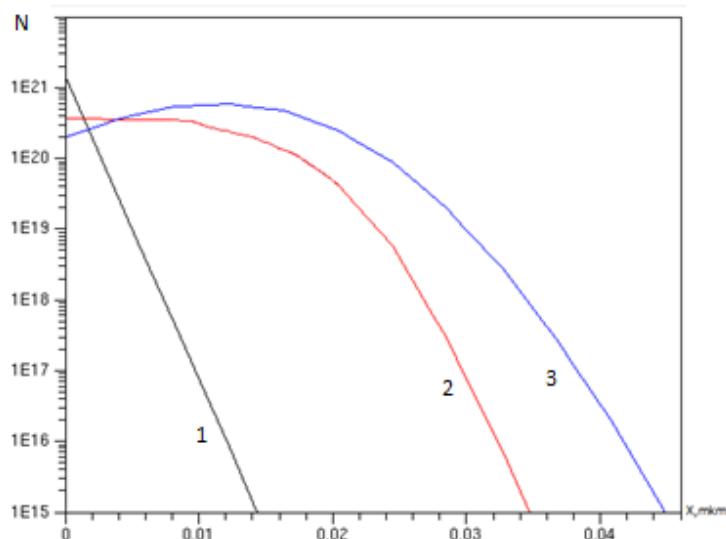


Рисунок – 1 Распределение примеси бора с энергиями: $E=0.75\text{КэВ}$, $X_{p-n}=14\text{ нм}$ (1), $E=2.2\text{КэВ}$, $X_{p-n}=35\text{ нм}$ (2), $E=3\text{КэВ}$, $X_{p-n}=46\text{ нм}$ (3).

Из полученного графика видно, что для получения сверхмелкозалегающих p-n переходов бора необходима энергия ионов ниже 5 кэВ, но ее уменьшение ведет к неизбежному падению тока пучка, формируемого ионной оптикой. Кроме того, с уменьшением энергии вид зависимостей искажается, что говорит о невозможности моделирование в TCAD ИИ с данными значениями (кривая -1 на рис.1). Следовательно, для образования переходов в нанометровом диапазоне нужно наряду с уменьшением энергии, увеличивать массу иона, что достигается путем легирования тяжелых ионов бора. Если использовать тяжелые молекулярные ионы, например BF_2 , то распределение бора показывает, что те же значения p-n переходов можно получить при более высоких энергиях (рис.2).

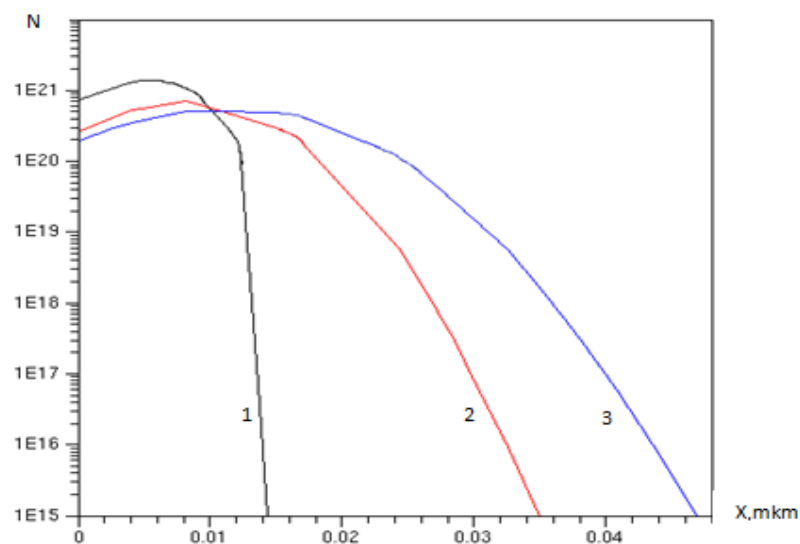


Рисунок – 2 Распределение примеси BF_2 с энергиями $E= 6$ КэВ(1), $E= 10$ КэВ (2), $E= 14$ КэВ (3).

Из рисунка 2 следует, что при легировании подложки тяжелым ионом BF_2 , зависимость распределение примеси не искажается, и полученные энергии лежат в диапазоне, который можно осуществить имплантером на практике без снижения ионного тока.

Визуализация процесса в среде TCAD.

Для представления процесса ИИ в полупроводниковой структуре в 2D исполнении в Synopsys TCAD [3] использовался модуль программы- TECPLOT (рис.3).

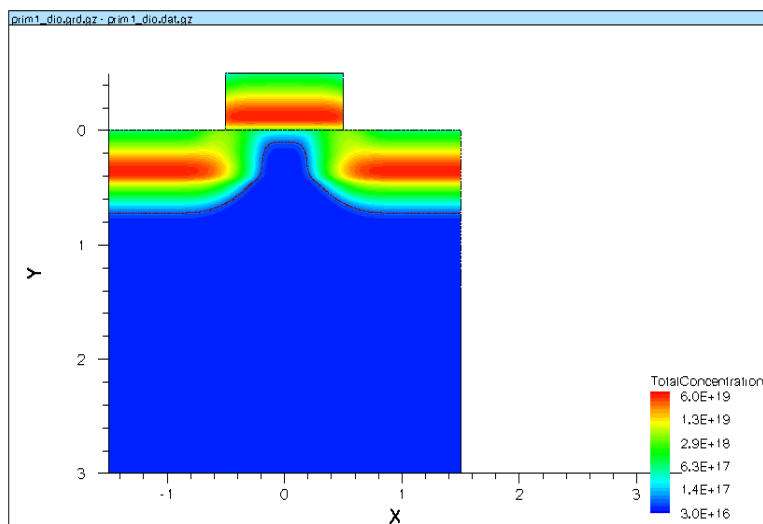


Рисунок 3- Распределение имплантированной примеси бора в кремниевой подложке в модуле TECPLOT

Интерфейс данного модуля позволяет наглядно проследить за изменением концентрации примеси при движении ионов вглубь структуры, а также численно увидеть ее уменьшение с глубиной.

Процесс термообработки в ИИ.

По ходу внедрения ионов в подложку, они испытывают столкновения с атомами кремния, которые испытывая сотни и тысячи смещений, нарушают его структуру. В

результате эффект легирования, ради которого выполнялась ионная имплантация, может оказаться подавлен дефектообразованием. На рис.4 изображены траектории движения пробегов ионов в кремнии для разных значений энергий, рассчитанных методом Монте-Карло. Расчеты были выполнены в среде моделирования SRIM [4].

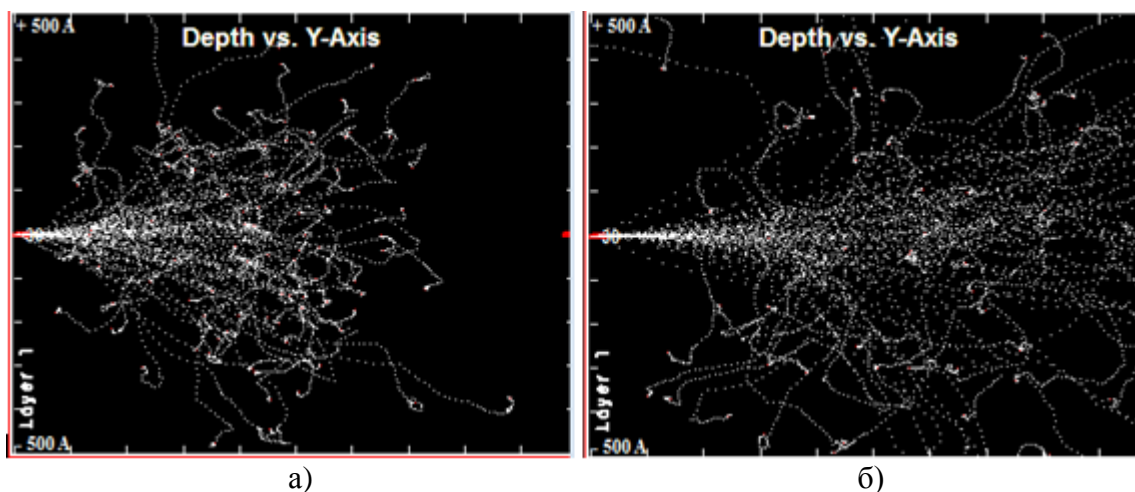


Рисунок 4 – Моделирования траектории пробегов ионов бора при а) $E=10\text{КэВ}$; б) $E=22\text{КэВ}$.

Из полученных траекторий пробегов (рис.4) можно сделать вывод, что чем выше энергия имплантации, тем глубже будет глубина залегания примеси при ИИ. Кроме того увеличивается боковое рассеяние ионов, а следовательно и дефектообразование.

Чтобы восстановить структуру подложки и активировать введенную примесь после процесса ионного легирования проводят термическую обработку (отжиг), тем самым стремятся приблизить состояние облученного материала к термодинамическому равновесию [1]. В данной работе проводится два вида отжига: термический (ТО) и быстрый термический отжига (БТО). А также на примере ионов BF_2 были получены р-п переходы при тех же параметрах ИИ (табл. 1).

Таблица 1 Зависимость глубины залегания от вводимой энергии для иона BF_2 с ТО и БТО.

№	$E_{\text{BF}_2}, \text{кэВ}$	$Q, \text{см}^{-2}$	$X_{p-n}, \text{нм.}$ Без отжига	$X_{p-n}, \text{нм (ТО)},$ $t=10 \text{ мин.}$ $T=900^\circ\text{C}$	$X_{p-n}, \text{нм}$ (с БТО) $t=5 \text{ сек.}$ $T=1050^\circ\text{C}$
1	6	10^{15}	14	75.3	51.7
2	10	10^{15}	35	81.5	54
3	14	10^{15}	46	84.4	57
4	18	10^{15}	51	88.3	62.5
5	22	10^{15}	58	91.9	70.4

В результате проделанной работы был смоделирован процесс ИИ в среде Synopsys TCAD с целью получения сверхмелкозалегающих р-п переходов для создания истока и стока МОП транзистора. Данная задача решалась посредством уменьшения энергии ионов и увеличения их массы используя тяжелые ионы. Из полученных моделей распределения примеси можно сделать вывод, что для реализации процесса необходимо понижать энергию одновременно с повышением массы ионов. Кроме того, рассмотрено влияния

термообработки на перераспределение примеси и предложено уменьшение этой зависимости путем применения БТО.

Список использованных источников

- 1 Данилина Т.И.,Кагадей В.А, Анищенко Е.В. Технология кремниевой наноэлектроники. В-Спектр: учебное пособие. - Томск, 2011. -264с.
2. Зариковская Н.В. Математическое моделирование технологических процессов. ТУСУР : учебное пособие.- Томск,2012.-82с.
3. Ассессоров В .В., Быкадорова Г .В, Ткачев А.Ю., Бормонтов А.Е., Арушанов А.Г. Основы работы в среде приборно-технологической САПР ISE TCAD : учебно-методическое пособие.- Воронеж, 2006.-62с.
4. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния :практикум. – Нижний Новгород, 2013. – 21с.

Приложение 1

```
title ('Implantation', newdiff=1, sidiff=0)
grid (x=(0, 1.5) y=(-3, 3), nx=10)
substrate (orientation=100,element=p, conc=3e16, ysubs=0)
replace(control(ngra=1))
graph(triangle=off, plot)
mask(mat=oxide,th=500nm,xl=0,xr=0.5)
imp(elem=BF2,en=18,dose=1e15)
!diffusion (time=10, tem=900)
reflect(reflect=0.0)
1d(file=imp4, spe(bactive), xsect(1.0), fac=-1)
save(file='prim4',type=mdraw)
end
```