

DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_566-572

УДК 621.38:620.22(075.8)

ОДНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ПО МОДЕЛИ ЛИНХАРДА-ШАРФА-ШИОТТА

Е.Ю. Плотникова¹, А.А. Винокуров¹, А.В. Арсентьев¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к моделированию технологического процесса ионной имплантации на языке программирования высокого уровня C# с возможностью графического анализа полученных результатов.

Ключевые слова: ионная имплантация, моделирование, p-n переход, распределение концентрации примеси.

ONE-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF IMPURITY IN SILICON AND GERMANY WITH ION IMPLANTATION ACCORDING TO THE LINKHARD-SCHARF-SCHIOTTE MODEL

E.Yu. Plotnikova¹, A.A. Vinokurov¹, A.V. Arsentev¹

¹Voronezh State Technical University

Abstract. The article discusses approaches to modeling the technological process of ion implantation in the high-level programming language C# with the ability to graphically analyze the results obtained.

Keywords: ion implantation, modeling, p-n junction, impurity concentration distribution.

При ионной имплантации заряженные частицы из пучка ионов внедряются в твердое тело, изменяя его свойства. Внедряющиеся ионы снижают свою энергию за счёт упругих и неупругих соударений. При неупругих столкновениях часть энергии ионного пучка теряется на возбуждение (ионизацию) атомов мишени (пластины), то есть взаимодействует с электронами кристаллической ре-

шетки. При упругих столкновениях энергия ионов передается ядрам атомов мишени. Энергетические потери также учитывают обмен зарядами между ионами и атомами мишени [1].

Если переданная атому при упругом соударении энергия оказывается больше, чем энергия связи атомов в теле мишени, атом покинет узел кристаллической решетки и образует пару Френкеля (вакансия + атом в междоузлии) [2]. Атомы поверхностного слоя, получив энергию иона, могут отрываться от кристалла, то есть будет происходить процесс распыления и образуется дефект Шоттки (вакансия) [2]. Первично-смещенный атом (атом отдачи) обладает большой энергией; при его движении вглубь мишени формируется каскад смещений и возникают дискретные разупорядоченные области размером 3 – 10 нм. То есть при имплантации происходит накопление дефектов, и при превышении критической величины (дозы аморфизации) в приповерхностной области пластины будет сформирован сплошной аморфный слой. Внедренные ионы могут сразу попадать в места вакансий в кристаллической решетке (что происходит редко) или занимать места в междоузлиях (стандартная ситуация при внедрении ионов примеси в кристалл). В междоузлиях они не являются электрически активными, а для их переноса в узлы кристаллической решетки и восстановления структуры кристалла проводят отжиг, при котором радиационные дефекты кристалла распадаются и аннигилируют, а внедренная примесь занимает места вакансий в узлах решетки, (образуется слой *p*-/*n*-типа проводимости).

В табл. 1 приводится справочная информация по основным материалам полупроводниковой технологии (кремний *Si* и германий *Ge*, а также основные легирующие примеси).

При моделировании [3] процесса ионной имплантации в САПР технологического уровня или в приложении, разработанном на языке программирования высокого уровня (например, C#) можно использовать упрощенную классическую модель Линхарда-Шарфа-Шиотта [4], которая описывает процесс рассеяния ионов в изотропной или аморфной полубесконечной мишени случайным образом (распределение пробега ионов по Гауссиане).

При моделировании технологического процесса ионной имплантации обычно используются аналитические модели и статистические данные. Аналитические модели основываются на расчете стандартных профилей имплантации или на экспериментальных профилях распределения ионов примесей. Для статистического анализа принято использовать модель Монте-Карло.

Таблица 1 - Параметры материалов полупроводниковой технологии, используемые для расчёта имплантации

Материал	Атомный номер, Z	Атомный вес M , г/моль	Число ат. в ед. объема, $N \times 10^{23}$ ат/см ²
Параметры полупроводниковой пластины (мишени):			
Si	14	28	50,4
Ge	32	72,6	45,3
Параметры имплантируемой примеси:			
B	5	10,8	137
P	15	30,97	35,6
As	33	74,91	17,4

В стандартных технологических САПР для моделирования ионной имплантации используется SVDP-модель (SIMS-Verified Dual Pearson, Техасский ун-т в Остине). Согласно этой модели для основных загоняемых в кремний примесей (B, P, As) с помощью статистических выборок определены диапазоны задаваемых параметров технологического процесса (табл. 2), типичные для моделирования с использованием модели Пирсона II (Dual Pearson Implant SVDP Model) [5].

Таблица 2 - Стандартный диапазон значений энергии и дозы легирующей примеси для расчёта ионной имплантации

Примесь	Энергия E , КэВ	Доза легирования D , см ⁻²
B	1 – 100	$10^{12} - 8 \cdot 10^{15}$
P	12 – 200	$10^{13} - 8 \cdot 10^{15}$
As	1 - 200	$10^{13} - 8 \cdot 10^{15}$

Для B из экспериментальных данных точные расчёты дают энергии в диапазоне от 5 до 80 КэВ, для P – от 15 до 80 КэВ, для As – от 5 до 180 КэВ. Значения энергий, близкие к нижнему и верхнему пределам из табл. 2 получены интерполяцией экспериментальных кривых. Наиболее подходящим для описания рас-

пределения ионов примеси в кремнии, окисле SiO_2 и нитриде кремния Si_3N_4 является модель PEARSON IV, которая позволяет с достаточной точностью смоделировать эффект каналирования.

Для расчёта основных параметров процесса ионной имплантации рассматриваются характеристики пробега ионов внедряемой примеси:

1) коэффициенты замедляющей способности (нм/Эв)

$$K = 1,8 \cdot \frac{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \cdot (m_1 + m_2)}}{N \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot m_1}, K_1 = 3,28 \cdot (Z_1 + Z_2) \cdot \frac{N}{\sqrt{m_1}}.$$

2) полный пробег ионов R (нм) $R = 2 \cdot \frac{\sqrt{E}}{K_1} - \frac{\ln(1 + 2 \cdot K_1 \cdot K \cdot \sqrt{E})}{K_1^2 \cdot K}.$

3) дисперсия полного пробега ионов ΔR (нм) $\Delta R = R \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{m_1 \cdot m_2}}{3 \cdot (m_1 + m_2)}.$

4) проекция пробега ионов R_p (нм) $R_p = \frac{R}{1 + \frac{1}{3} \frac{m_2}{m_1}}.$

5) дисперсия проекции пробега ионов ΔR_p (нм) $\Delta R_p = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{m_1 \cdot m_2}}{m_1 + m_2} \cdot R_p.$

Если в подложку заданного типа проводимости Co вводится примесь этого же типа $C1(x)$, то в структуре $p-n$ переход не будет формироваться. Если вводимая в структуру примесь $C2(x)$ и легирование подложки Co выполнены элементами разного типа проводимости, то на пластине будут созданы один или два $p-n$ перехода в зависимости от формируемого прибора (рис. 1):

1) Если исходная пластина и легирующая примесь одного типа проводимости, профиль распределения концентрации примеси по глубине пластины $C1(x)$ ($см^{-3}$)

$$C1(x) = \frac{10^7 \cdot D}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right)} + Co.$$

2) Если исходная пластина и легирующая примесь разных типов проводимости профиль распределения концентрации примеси по глубине пластины $C2(x)$ ($см^{-3}$)

$$C2(x) = \frac{10^7 \cdot D}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right)} - Co.$$

Глубины залегания $p-n$ переходов $x1$ и $x2$ рассчитываются с использованием информации о пробеге ионов примеси (нм):

$$x1 = R_p + \Delta R_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{10^7 \cdot D}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}}\right) - 2 \cdot \ln(Co)},$$

$$x2 = R_p - \Delta R_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{10^7 \cdot D}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \Delta R_p}}\right) - 2 \cdot \ln(Co)}.$$

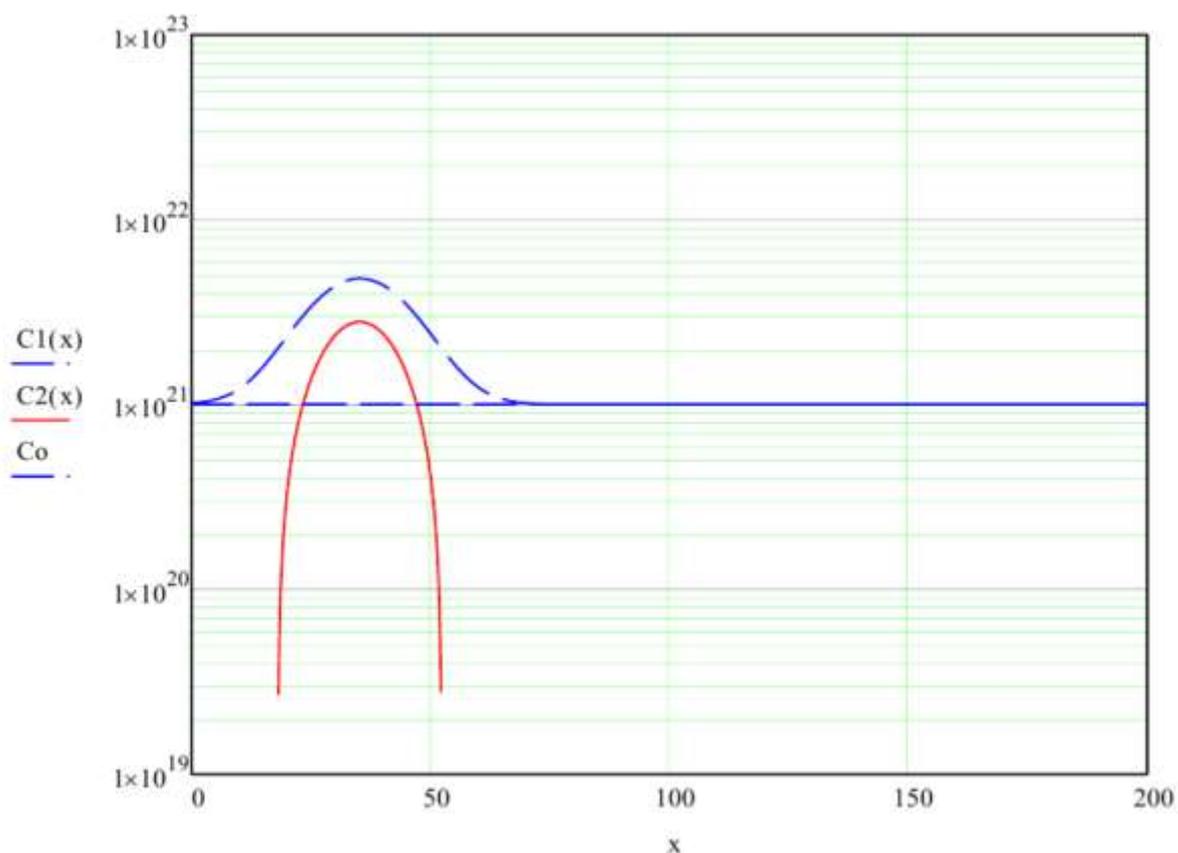


Рисунок 1 – Моделирование профиля распределения концентрации легирующей примеси

На завершающем этапе определяются максимальные концентрации легирующих примесей $C1$ и $C2$ в зависимости от проекции пробега ионов Rp $C1(Rp)$ и $C2(Rp)$ (см^{-3}). Для моделирования данного одномерного распределения ионов примесей по глубине можно использовать как различные математические пакеты, так и разработать программу на языке программирования высокого уровня.

В качестве набора параметров программы задаются числовые значения для подложки и легирующей примеси (данные из табл. 1 и 2 – переменные двойной точности с плавающей запятой *double* K , $K1$, R , $\text{delta}R$, Rp , $\text{delta}Rp$, Co , D). Наборы данных внесены в инструменты *(double)numericUpDownX* для соответствующих материалов подложки и легирующей примеси, на пример при загонке бора в кремний. Для расчёта распределения примеси вглубь пластины используются отдельные методы:

```
private double C1(double x) { return (Math.Pow(10, 7) * D) /
(Math.Sqrt(2 * Math.PI) * deltaRp) * Math.Exp(-1 / 2.0 * Math.Pow((x - Rp) / deltaRp,
2)) + Co; }
```

```
private double C2(double x) { return (Math.Pow(10, 7) * D) /
(Math.Sqrt(2 * Math.PI) * deltaRp) * Math.Exp(-1 / 2.0 * Math.Pow((x - Rp) / deltaRp,
2)) - Co; }
```

Параметры пробега ионов примеси задаются в виде математических формул по правилам синтаксиса выбранного языка программирования.

При построении стандартных графиков функций (C_0 , $C_1(x)$, $C_2(x)$) в языке C# используется инструмент *chart*.

Глубины залегания p - n переходов рассчитываются по формулам для первого и второго переходов, соответственно:

$$x1 = \text{Math.Round}(Rp + \text{deltaRp} \cdot \text{Math.Sqrt}(2 \cdot \text{Math.Log}((D \cdot \text{Math.Pow}(10, 7)) / (\text{Math.Sqrt}(2 \cdot \text{Math.PI}) \cdot \text{deltaRp})) - 2 \cdot \text{Math.Log}(Co)), 3);$$

$$x2 = \text{Math.Round}(Rp - \text{deltaRp} \cdot \text{Math.Sqrt}(2 \cdot \text{Math.Log}((D \cdot \text{Math.Pow}(10, 7)) / (\text{Math.Sqrt}(2 \cdot \text{Math.PI}) \cdot \text{deltaRp})) - 2 \cdot \text{Math.Log}(Co)), 3);$$

Рассчитанные величины можно вывести на экран в любом удобном формате. Результат работы программы для загонки примеси бора в подложку из кремния показан на рис. 2 и совпадает с моделированием в стандартном математическом пакете.

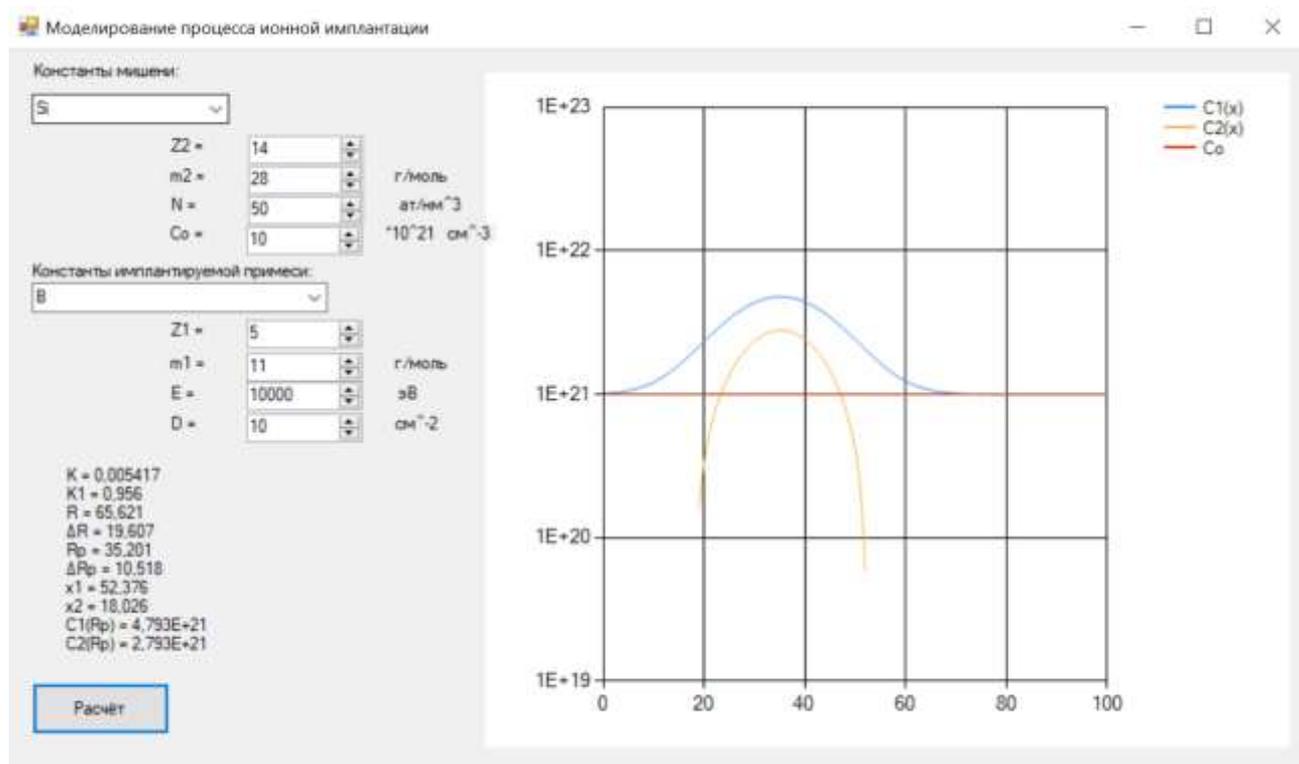


Рисунок 2 - Результат работы программы

Выводы

Таким образом, зная основные законы, по которым можно рассчитывать различные технологические операции (например, ионную имплантацию), модель процесса с достаточной точностью рассчитывается и визуализируется как в стандартных математических пакетах, так и в программе, разработанной на языке программирования (например C#).

Список литературы

1. Пирс К. Технология СБИС: в 2-х кн. / К. Пирс, А. Адамс, Л. Кац и др. Кн. 1. Пер с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: учеб. / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. - 4-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2002. -368 с.
3. Зольников К.В., Гамзатов Н.Г., Евдокимова С.А., Потапов А.В., Допира Р.В., Кучеров Ю.С., Яночкин И.Е., Стоянов С.В., Плотников А.М. Моделирование процессов в полупроводниковых структурах при радиационном воздействии // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 106-127.
4. Линдхард Дж., Шарфф М., Шиотт Х.Э. Понятия о дальностях и пробегах тяжелых ионов // Кгл. Дэн. Вид. Сельск. Мат.-физ. Медд. Т. 33, - 1963.
5. Полуэктов А.В., Макаренко Ф.В., Ягодкин А.С. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33-41.

References

1. Pierce K. VLSI technology: in 2 books. / K. Pierce, A. Adams, L. Katz and others. Book. 1. Translated from English. / Ed. S. Zee. – M.: Mir, 1986. – 404 p.
2. Pasyнков V.V. Materials of electronic technology: textbook. / V.V. Pasyнков, V.S. Sorokin. - 4th ed., erased. - St. Petersburg: Lan, 2002. -368 p.
3. Zolnikov K.V., Gamzatov N.G., Evdokimova S.A., Potapov A.V., Dopira R.V., Kucherov Yu.S., Yanochkin I.E., Stoyanov S.V., Plotnikov A.M. Modeling of processes in semiconductor structures under radiation exposure // Modeling of systems and processes. – 2022. – Т. 15, No. 3. – P. 106-127.
4. Lindhard J., Scharff M., Schiott H.E. Range Concepts and Heavy Ion Ranges // Kgl. Dan. Vid. Selsk. Mat.-fys. Medd. V. 33, - 1963.
5. Poluektov A.V., Makarenko F.V., Yagodkin A.S. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data // Modeling of systems and processes. - 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 33-41.