

**Гостев Алексей Григорьевич**

магистрант

ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

## **РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИМЕСЯМИ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО СЛОЯ**

**Аннотация:** в данной статье рассматриваются положения, законы и принципы, на которых строится полуаналитическая приборно-технологическая модель расчёта электрических характеристик планарно-эпитаксиального многоэмиттерного биполярного транзистора.

**Ключевые слова:** многоэмиттерный биполярный транзистор, расчет профиля легирования.

Расчет профиля легирования примесями эпитаксиального слоя, т.е. распределение концентрации примесей по глубине полупроводниковой структуры. Профиль легирования позволяет определить глубины залегания р-п-границ (эмиттер-база и база-коллектор), толщины слоёв эмиттера, коллектора и базы, электрические параметры этих слоёв, и в конечном счёте, рассчитать основные электрические параметры транзистора.

Процесс введения примеси для создания базовой области транзистора проводится в две стадии. На первой стадии, называемой «загонкой» легирующая примесь (например, бор), вводится в полупроводниковую пластину в строго определенном количестве. При этом поверхностную концентрацию бора  $N_{os}$  на этой стадии выбирают исходя из величины предельной растворимости бора в кремнии при определенной температуре. Таким образом, данная стадия проводится при температурах от 950 до 1100° С и  $N_{os} = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [4].

Вторая стадия процесса введения примеси в эпитаксиальный слой называется «разгонкой». На этой стадии примесь внедряется на необходимую глубину с получением необходимого профиля распределения примеси. «Разгонку» бора

проводят при температурах от 1100 до 1200° С [4] и времени от часа до двух часов.

Процесс введения примеси для создания эмиттерной области транзистора проводится в одну стадию. Этот процесс осуществляется при условии достижения предельной растворимости фосфора в кремнии. Поэтому в практике производства эпитаксиально-планарных n-p-n биполярных транзисторов диффузия фосфора проводится при температурах от 900 до 1200° С и поверхностной концентрация фосфора  $N_{oe}=10^{21} \text{ см}^{-3}$ .

Обозначим  $N_{os}$  – поверхностная концентрация бора при базовой, а  $N_{oe}$  фосфора при эмиттерной диффузии. Температурные характеристики выше означенных процессов «загонки» и «разгонки» бора и «загонки» фосфора зададим в виде вектора  $T$ , а временные – в виде вектора  $t$ . В MathCAD эти характеристики будут выглядеть согласно алгоритму, приведенному ниже:

Расчет профиля легирования

$$t = \begin{pmatrix} 25 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \\ 60 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 273 + 1050 \\ 273 + 1200 \\ 273 \\ 273 \\ 273 + 1100 \\ 273 \\ 273 \end{pmatrix}$$

- 1) загонка бора;
- 2) разгонка бора;
- 3) загонка фосфора.

$N_{os}=2 \times 10^{19}$  Поверхностная концентрация бора при загонке

$N_{oe}=6 \times 10^{20}$  Поверхностная концентрация фосфора при загонке

Далее рассчитываем коэффициент диффузии атомов бора в базе.

Для этого необходимо вначале задать предэкспоненциальный коэффициент диффузии для бора, энергию активации диффузии для атомов бора. В Mahtcad – это будет выглядеть следующим образом:

$D_{db}=7.6 \times 10^{-1}$  – предэкспоненциальный коэффициент диффузии для бора,  $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ ;

$\delta E_b = 7.6$  – энергия активации атомов бора, эВ.

Далее зададим номера элементов векторов температуры  $T$  и времени  $t$  и расчитаем согласно формуле (1) коэффициент диффузии бора  $D_i$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$ , на  $i$ -той стадии диффузии [4]:

$$D_i = D_{db} \cdot \exp\left(-\frac{\delta E_b \cdot e}{k \cdot T_i}\right), \quad (1)$$

где  $D_{db}$  – предэкспоненциальный коэффициент диффузии для бора,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;

$\delta E_b$  – энергия активации атомов бора, эВ;

$T_i$  – температура при которой производиться  $i$ -тая стадия диффузии, К;

$k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;

$e$  – элементарный заряд, Кл;

Поскольку процесс диффузии бора многостадийный, то суммарная «разгонка» примеси будет определяться следующей суммой [4]

$$Dt = \sum_j D_j \cdot t_j \cdot 60. \quad (2)$$

Далее рассчитываем коэффициент диффузии атомов фосфора в эмиттере. Для фосфора, также как и для бора, необходимо вначале задать предэкспоненциальный коэффициент диффузии и энергию активации.

Закон распределения атомов примеси на стадии «загонки» фосфора будет определяться согласно формуле:

$$N_e(x) = N_{0e} \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{Dte}}\right)\right). \quad (3)$$

Согласно литературе по проектированию микросхем [4] глубина залегания металлургической границы эмиттер-база выбирается в диапазоне от одного до трёх мкм. Глубина залегания металлургической границы эмиттер-база определяет соответственно ширину базы и напряжение пробоя эпитаксально-планарного транзистора. Минимальная величина ширины базы, ограничена смыканием коллекторной и эмиттерной областей при максимальных обратных напряжениях на р-п границах. Максимальная ширина базы ограничена необходимостью обеспечить требуемый коэффициент передачи тока по базе и граничную частоту транзистора.

В результате выше проделанных расчетов может быть получен профиль распределения примесей в эпитаксиальном слое на полупроводнике.

### ***Список литературы***

1. Носов Ю.Р. Математические модели элементов интегральной электроники / Ю.Р. Носов, К.О. Петросянц, В.А. Шилин. – М.: Сов. радио, 1976. – 304 с.
2. Process and Device Simulation Tools to Accelerate Innovation // Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.synopsys.com/TOOLS/TCAD/> (дата обращения: 06.02.2017).
3. Тихомиров П. Система SENTAURUS TCAD компании SYNOPSYS. Новое поколение приборно-технологических САПР / П. Тихомиров, П. Пфеффли, М. Зорзи // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – №7. – С. 89.
4. Базылев В.К. Расчёт биполярных транзисторов: Учеб. пособие / В.К. Базылев. – Рязань: РГРА, 2004. – 68 с.
5. Березин А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем: Учебное пособие для вузов / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина; под общ. ред. И.П. Степаненко. – М: Радио и связь, 1983. – 232 с.
6. Крутякова М.Г. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования / М.Г. Крутякова, Н.А. Чарыков, В.В. Юдин. – М.: Радио и связь, 1983. – 352 с.
7. Гуртов В.А. Твердотельная электроника / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с.
8. Колосницаин Б. С. Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем: Учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 1: Расчет и проектирование биполярных транзисторов / Б.С. Колосницаин. – Минск: БГУИР, 2011. – 68 с.
9. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.