

Гостев Алексей Григорьевич

магистрант

ФГБОУ ВО «Донской государственный

технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ДИФФУЗИИ.

ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ ФИКА

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.

Процесс диффузии в полупроводниковой технологии представляет собой направленный перенос атомов примесей, обусловленный тепловым движением при наличии градиента концентрации примеси [5]. Диффузионный перенос атомов описывается дифференциальным уравнением (1) в котором J , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, диффузионный поток, возникающий при наличии градиента концентрации примесей N ;

$$J = -D \cdot \text{grad}(N), \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$.

Это уравнение носит название первого закона Фика. Для случая изотропной диффузии коэффициент диффузии D является скалярной величиной. В большинстве случаев диффузия в полупроводниках может быть представлена как одномерный процесс, описываемый уравнением

$$J = -D \cdot \frac{\partial N}{\partial x} \quad (2)$$

где x – координата, направленная от плоскости источника примеси вглубь материала. Применяя к последнему выражению уравнение непрерывности потока $dN/dt = dJ/dx$, получаем уравнение (3).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial N}{\partial x} \right). \quad (3)$$

При постоянном коэффициенте диффузии D уравнение (3) переходит в уравнение (4) определяющее распределение концентрации диффундирующих частиц в зависимости от времени $N(x, t)$, см⁻³, (второй закон Фика).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Коэффициент диффузии D , см²/с, имеет экспоненциальную зависимость от температуры:

$$D = D_0 \cdot \exp(-\Delta E / (k \cdot T)), \quad (5)$$

где ΔE – энергия активации примеси, эВ; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; D_0 – предэкспоненциальный коэффициент, см²/с.

Предэкспоненциальный коэффициент определяется видом полупроводникового материала и диффузанта. Таким образом, решая уравнение (4), для каждого конкретного случая, можно найти концентрацию в определенный момент времени t для произвольно выбранной точки с координатой x .

Решение уравнения (4) может быть выполнено методом разделения переменных и в общем случае для неограниченного тела имеет определённый вид.

Наибольший практический интерес представляют два частных случая этого решения, которые могут характеризовать две стадии диффузии, применяемые в планарной технологии изготовления транзисторов.

Во многих случаях, при изготовлении различных элементов ИМС используют двустадийные диффузионные процессы. Первая стадия диффузионного процесса, называется «загонкой». Вторая стадия, называется «разгонкой». Первый случай, соответствующий «загонке» примеси, представляет собой диффузию от поверхности постоянной концентрации: часто его называют случаем диффузии из бесконечного источника. Для этого случая поверхностная концентрация N_s остается постоянной, и граничные условия могут быть записаны в виде $N(x > 0, 0) = 0$, $N(0, t \geq 0) = N_s$.

Решение уравнения (4) в этом случае для полуограниченного тела принимает вид [5].

$$N(x,t) = N_s \cdot \operatorname{erfc}(x/(2 \cdot \sqrt{D \cdot t})), \quad (6)$$

где $\operatorname{erfc}(x/(2 \cdot \sqrt{D \cdot t})) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{D \cdot t}} e^{-\eta^2} d\eta$ - дополнительная функция ошибок.

Второй случай с некоторым приближением отражает перераспределение примесей в процессе «разгонки» и носит название диффузии из ограниченного источника [5], созданного в течение первой стадии диффузии. Граничное условие для этого случая означает отсутствие потока примесей для всех $t \geq 0$ через поверхность $x = 0$, т. е.

$$\left. \frac{\partial N(x,t \geq 0)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (7)$$

Диффузия ведется из слоя толщиной h , в котором имеется примесь с постоянной концентрацией N_s . Тогда граничные условия представляются в виде

$$N(x,0) = \begin{cases} N_s & \text{при } 0 \leq x \leq h \\ 0 & \text{при } x > h \end{cases}, \quad (8)$$

а решение диффузионного уравнения имеет следующий вид:

$$N(x,t) = \frac{N_s}{2} \cdot \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{h-x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x+h}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right\}. \quad (9)$$

Если толщина начального диффузионного слоя очень мала по сравнению с глубиной проникновения атомов примеси на второй стадии диффузии, то соотношение (9) будет описывать процесс диффузии в полубесконечное тело из бесконечно тонкого слоя, расположенного внутри тела в непосредственной близости от его поверхности. В качестве характеристики такого тонкого слоя берётся величина Q , которая показывает отношение полного количества атомов примеси, находящихся в слое в начальный момент времени к единице поверхности.

Распределение примеси в бесконечно тонком слое полупроводника можно определить из выражения (9), подставив в него $N_s = Q/h$, а затем перейдя к пределу в правой части при стремлении h к нулю, т. е.

$$N(x,t) = Q \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{h-x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x+h}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right\}}{2 \cdot h} = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right). \quad (10)$$

Величину Q можно найти, если воспользоваться первым законом Фика. Так как на первой стадии диффузионного процесса атомы примеси распределены по закону дополнительной функции ошибок согласно формуле (8).

$$N(x,t) = N_s \cdot \operatorname{erfc}(x/(2 \cdot \sqrt{D_0 \cdot t})), \quad (11)$$

тогда вычисленный с помощью первого диффузионного закона Фика поток диффундирующих атомов примеси через единицу поверхности на первой стадии диффузионного процесса будет равен

$$J(t) = -D_0 \cdot \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{D_0 \cdot N_{s0}}{\sqrt{\pi \cdot D_0 \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D_0 \cdot t}\right) \Big|_{x=0} = N_{s0} \cdot \sqrt{\frac{D_0}{\pi \cdot t}}, \quad (12)$$

где D_0 – коэффициент диффузии атомов примеси на стадии «загонки»; N_{s0} – поверхностная концентрация атомов примеси, диффундирующих на этой стадии.

Из выражения (16) следует, что

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt = 2N_{s0} \sqrt{\frac{D_0 t_0}{\pi}}, \quad (13)$$

где t_0 – продолжительность стадии «загонки».

Тогда, функция распределения концентрации атомов примеси на второй стадии диффузии приобретает вид

$$N(x,t) = \frac{2 \cdot N_{s0}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_0 \cdot t_0}{D \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right). \quad (14)$$

Таким образом, мы рассмотрели положения, законы и принципы на которых строится полуаналитическая приборно-технологическая модель расчёта электрических характеристик планарно-эпитаксиального многоэмиттерного биполярного транзистора. Также, произвели расчёт профиля легирования эпитаксиального слоя данного транзистора.

Список литературы

1. Брюхова Н.Г. Психологические особенности акмеориентированного саморазвития людей зрелого возраста. – СПб.: Социосфера, 2011. – 5 с.

2. Деркач А.А. Деятельность как основание акмеологического развития субъекта и надситуативная активность субъекта как действенный фактор ее развития / А.А. Деркач, Э.В. Сайко // Мир психологии. – 2008. – №2. – 12 с.
3. Кавецкий И.Т. Основы психологии и педагогики / Т.Л. Рыжковская, И.А. Коверзнева, В.Г. Игнатович, Н.А. Лобан, С.В. Старовойтова. – Минск: Изд-во МИУ, 2010. – 453 с.
4. Мансурова И.С. Особенности надежды и отношения к жизни у специалистов инженерно-технического профиля / И.С. Мансурова, Е.А. Суредова, Н.Н. Хачатурян // Инженерный Вестник Дона. – 2015. – Т. 37. – №3. – С. 65.
5. Портнова А.Г. Личностная зрелость: подходы к определению. – М., 2008. – 5 с.
6. Руднева И.А. Формирование позитивного самоотношения у подростков в условиях образовательной среды школы / Е.И. Луценко. – Томск: ВГСПУ, 2016. – 3 с.
7. Соколова Е.Т. Самосознание и самооценка при аномалиях личности. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 215 с.
8. Azuma H. Child Development and Education in GB, K. Hakuta (eds). – San Francisco: Freeman, 2012. – 262–272 pp.
9. Cooper C.L. International Review of Industrial and Organizational Psychology. Vol 18 / Cary L. Cooper, I.T. Robertson. – 2008. – Vol. 23. – 302 p.
10. Uvarova G. Motivation Sphere Peculiarities Of Students With Different Reflexivity Levels / E.V. Krasnova, I.S. Mansurova, A.V. Korochentseva, E.V. Ezhak // 3rd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM 2016 Conference proceedings. – 2016. – С. 231–237.