

**О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ В БАРЬЕРЕ ШОТТКИ ИЛИ В БАРЬЕРЕ P<sup>+</sup>-N ПЕРЕХОДА В СЛУЧАЕ ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ**

Н.А. Пенин

*Обсуждаются условия реализации такого распределения примесей в области запирающего слоя диода, при котором обеспечивается линейная зависимость барьерной емкости от напряжения.*

Характер зависимости барьерной емкости у диодов с p-n переходом или у диодов Шоттки от приложенного напряжения определяется видом распределения атомов примеси в области барьера. Функциональная связь между барьерной емкостью  $C$  и приложенным напряжением  $U$  для разных видов распределения примеси в области барьера в общем рассмотрена в работах [1-3]. Однако реализация конкретного типа распределения обычно связана с определенными ограничениями и требует более детального рассмотрения. В настоящем сообщении рассматривается возможность создания такого распределения примесей, которое обеспечивало бы линейную зависимость барьерной емкости от напряжения хотя бы в ограниченном интервале изменения напряжения и обсуждаются условия реализации такого распределения.

В дальнейшем с целью упрощения вычислений рассматриваются плоскостные структуры p<sup>+</sup>-n или металл-полупроводник (барьер Шоттки) на основе полупроводника n-типа. Предполагается, что атомы примеси в полупроводнике полностью ионизованы.

В работе [3] показано, что для получения линейной зависимости между  $C$  и  $U$  необходимо, чтобы примесные атомы в области барьера были распределены по закону  $1/x^3$ , где  $x$  — расстояние, отсчитываемое от плоскости инверсии типа проводимости в случае p<sup>+</sup>-n перехода или от границы с металлом, если инверсия в области барьера Шоттки не имеет места. Однако реализация такого распределения наталкивается на два принципиальных ограничения. С одной стороны, при  $x \rightarrow 0$ , т.е. по мере приближения к границе с металлом или p<sup>+</sup>-слоем, концентрация примеси не может возрасти неограниченно, как это следует из требуемого распределения. Очевидно, что концентрация примеси вблизи границы с металлом или p<sup>+</sup>-слоем должна быть ограничена сверху. С другой стороны, при увеличении  $x$ , т.е. по мере удаления от границы с металлом или p<sup>+</sup>-слоем, концентрация примеси должна стремиться к нулю. Это также невыполнимо, т.к. исходный полупроводник должен содержать необходимую концентрацию примеси. Отсюда следует, что линейную зависимость барьерной емкости от напряжения можно обеспечить лишь в ограниченной области изменения напряжения.

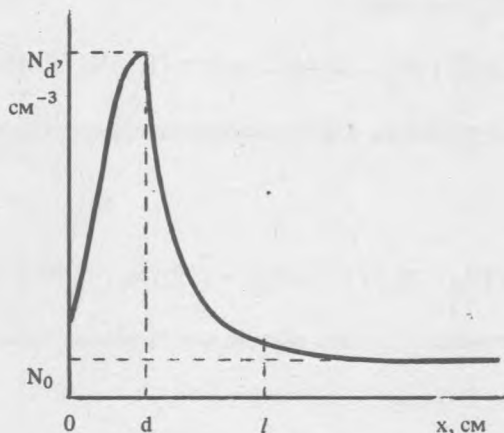


Рис. 1. Распределение концентрации атомов примеси в области барьера.

Такому требованию удовлетворяет, например, распределение примесных атомов, показанное на рис. 1. В нем имеются две области:

$$0 \leq x \leq d \quad N = N_1(x),$$

где  $N_1(x)$  — произвольная, но интегрируемая функция, удовлетворяющая условию  $N_1(d) = N_d$  при  $x = d$ . Другими словами, в слое от  $x = 0$  до  $x = d$  примеси могут быть распределены по какому-либо технологически реализуемому закону:

$$x \geq d \quad N(x) = (N_d - N_0)d^3/x^3 + N_0,$$

где  $N_d$  — концентрация атомов примеси в плоскости  $x = d$ ,  $N_0$  — концентрация примеси в толще полупроводника.

Вычисление зависимости барьерной емкости от напряжения сводится к двукратному интегрированию уравнения Пуассона для обеих областей распределения с учетом граничных условий:

1) На границе барьера со стороны полупроводника напряженность электрического поля равна нулю, т.е.  $E(l) = 0$  при  $x = l$ .

2) На границе между обеими областями, т.е. в плоскости  $x = d$ , напряженность электрического поля  $E$  и потенциал  $\varphi$  не испытывают скачков.

Уравнение Пуассона имеет вид:

$$d^2\varphi/dx^2 = - (4\pi e/\epsilon)N_1(x), \quad 0 \leq x \leq d, \quad d^2\varphi/dx^2 = - (4\pi e/\epsilon)[(N_d - N_0)d^3/x^3 + N_0], \quad x \geq d,$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость.

Последовательное интегрирование этих уравнений для обеих областей дает выражение, связывающее полную разность потенциалов на барьере с толщиной барьера  $l$ , в виде

$$U + U_k = \frac{4\pi e}{\epsilon} \left[ \int_0^d x N_1(x) dx + d^2 (N_d - N_0) \left(1 - \frac{d}{l}\right) + \frac{d^2}{2} N_0 \left( \frac{l^2}{d^2} - 1 \right) \right],$$

где  $U_k$  — контактная разность потенциалов. Первый член в прямых скобках, содержащий интеграл, и  $U_k$  можно исключить, если ввести начальное напряжение  $U = U_d$ , при котором  $l = d$ . В этом случае имеем:

$$U_d + U_k = (4\pi e/\epsilon) \int_0^d x N_1(x) dx.$$

Тогда для разности напряжений  $U - U_d$  получим:

$$U - U_d = (4\pi e/\epsilon) d^2 [(N_d - N_0) (1 - d/l) + (1/2) N_0 (l^2/d^2 - 1)].$$

В случае полной ионизации примесей величины  $d$  и  $l$  можно выразить через величины емкостей  $C_d = \epsilon S/4\pi d$  и  $C = \epsilon S/4\pi l$ . В итоге получаем

$$U - U_d = (e\epsilon/4\pi) (S^2/C_d^2) [N_d - N_0] (1 - C/C_d) + (1/2) N_0 (C_d^2/C^2 - 1). \quad (1)$$

На основании этого выражения можно сделать вывод, что линейная зависимость между  $C$  и  $U$  имеет место, если

$$(N_d - N_0) (1 - C/C_d) - N_0/2 \gg N_0 C_d^2/2C^2.$$

В этом случае

$$U - U_d = (\epsilon\epsilon/4\pi) (S^2/c_d^2) [N_d - (3/2)N_0 - (N_d - N_0)C/C_d].$$

При дальнейшем увеличении напряжения линейная зависимость сменяется зависимостью вида

$$U - U_d = (\epsilon\epsilon/8\pi) (S^2/C^2) N_0,$$

характерной для равномерного распределения примесей.

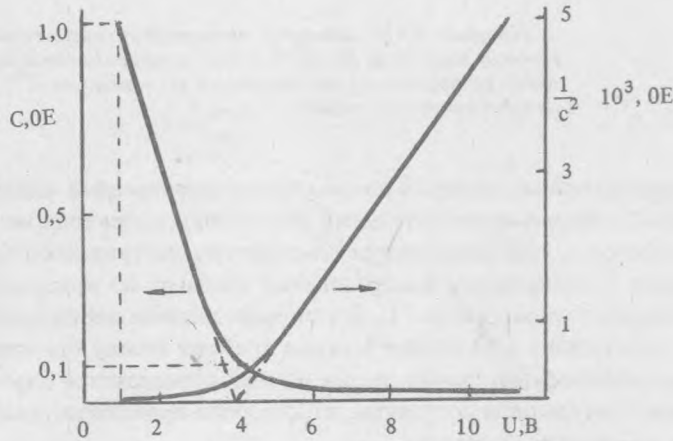


Рис. 2. Зависимость барьерной емкости и квадрата обратной величины барьерной емкости от напряжения.

Выражение (1) позволяет оценить отношение концентраций атомов примеси  $N_0/N_d$  для заданной кратности линейного изменения емкости  $K = C_d/C$  и заданной точности  $M$  выполнения линейной зависимости емкости от напряжения, определяемой отношением

$$\frac{N_0 C_d^2 / 2C^2}{N_d (1 - C/C_d) - N_0 (3/2 - C/C_d)} = M.$$

Отсюда для отношения концентраций получаем:

$$\frac{N_0}{N_d} = \frac{2(K-1)}{(K^2/M+3)K-2}.$$

Например, для того, чтобы при 10-кратном изменении емкости ( $K = 10$ ) линейная зависимость выполнялась с точностью в 5% ( $M = 0,05$ ), отношение концентраций  $N_0/N_d$  должно быть равно  $\sim 10^{-3}$ . На рис. 2 показана зависимость относительной величины барьерной емкости от напряжения, вычисленная согласно (1), для следующих исходных данных:  $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\epsilon = 12$ ,  $U_d = 1 \text{ В}$ ,  $U_K = 0,5 \text{ В}$ . Видно, что область линейного изменения емкости простирается по напряжению от 1 до 4 В. Здесь же изображена зависимость  $1/C^2$  от  $U$ , показывающая, что по мере увеличения напряжения начинает проявляться зависимость, характерная для равномерного распределения атомов примеси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вул Б. М. ЖТФ, 25, 3 (1955).
2. Вул Б. М. ФТТ, 3, 204 (1961).
3. Берман Л. С. Введение в физику варикапов. Л., Наука, 1968.

Поступила в редакцию 2 мая 1986 г.