

УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОТОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ПРИБОРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ

О. К. Гусев, Л. И. Шадурская, Н. В. Яржемицкая

Белорусский национальный технический университет, nv.yarjem@gmail.com

Структуры с барьерами, неоднородно-легированные полупроводники относятся к элементной базе современной твердотельной электроники и составляют основу фотоэлектрических приборов информационной техники [1]. Поэтому изучение возможностей управления таким инженерным параметром как высота потенциального барьера с помощью легирования и уровня инжекции представляют актуальную задачу.

Целью работы явилось моделирование рекомбинационных процессов в неоднородно-легированных полупроводниках с глубокими примесями, используемых для создания барьерных структур. Предполагалось, что области с разной концентрацией глубокой примеси, окруженные потенциальным барьером, являются электронейтральными и рекомбинацией в области пространственного заряда можно пренебречь.

Для примесей, окруженных потенциальным барьером, введем в рассмотрение неравновесную стационарную функцию заполнения f_I , определяющую вероятность заполнения центров электронами при неравновесных стационарных условиях и зависящую от высоты потенциального барьера.

Суммарные скорости захвата электронов из зоны проводимости U_{nI} и дырок из валентной зоны U_{pI} на примеси, окруженные (отделенные) потенциальным барьером в неравновесных стационарных условиях могут быть записаны в виде:

$$U_{nI} = N_I \gamma_n (1 - f_1)(n_{0I} + \Delta n_I) - N_I \gamma_n f_1 n_I \quad (1)$$

$$U_{pI} = N_I \gamma_p f_1 (p_{0I} + \Delta p_I) - N_I \gamma_p (1 - f_1) p_I, \quad (2)$$

где N_I – концентрация примеси в области полупроводника, окруженной потенциальным барьером; $n_{0I} = n_0 \exp(-\phi_0 / kT)$ и $p_{0I} = p_0 \exp(-\phi_0 / kT)$ – равновесные концентрации электронов и дырок в области, окруженной (отделенной) потенциальным барьером; n_0, p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок в матрице; ϕ_0 – высота потенциального барьера вокруг неоднородно легированной области в состоянии термодинамического равновесия; k – постоянная Больцмана; T – температура; $\Delta n_I = \Delta n \exp(-\phi_1 / kT)$ и $\Delta p_I = \Delta p \exp(-\phi_1 / kT)$ – неравновесные концентрации электронов и дырок в области, окруженной потенциальным барьером; ϕ_1 – высота потенциального барьера при произвольном уровне инжекции; γ_n, γ_p – коэффициенты рекомбинации электронов и дырок на глубокой примеси, окруженной потенциальным барьером; n_I, p_I – концентрации электронов и дырок при совпадении уровня Ферми с уровнем примеси; $\Delta n, \Delta p$ – концентрации неравновесных носителей заряда в матрице.

В стационарном состоянии

$$U_{nI} = U_{pI} \quad (3)$$

Уравнение электронейтральности в области, окруженной потенциальным барьером имеет вид:

$$\Delta p_1 = \exp(-\varphi_1 / kT)(\Delta n + N_1(f_1 - f_{01})) \quad (4)$$

где f_{01} – равновесная функция Ферми-Дирака для примесей, окруженным потенциальным барьером.

Решение уравнения (3) относительно f_1 с учетом (1), (2), и (4), в предположении, что $f_1 > 0$, дает

$$f_1 = \frac{-(\Omega_1 + K_1 \Delta n) + ((\Omega_1 + K_1 \Delta n)^2 + F_1 + R_1 \Delta n)^{1/2}}{L_1} \quad (5)$$

где

$$\Omega_1 = \gamma_n(n_0 e^{-\varphi_0 / kT} + n_1) + \gamma_p(p_0 e^{\varphi_0 / kT} + p_1 - N_1 f_{01} e^{-\varphi_1 / kT}),$$

$$K_1 = e^{-\varphi_1}(\gamma_n + \gamma_p), R_1 = 4N_1 \gamma_p \gamma_n e^{-2\varphi_1 / kT},$$

$$F_1 = 4N_1 \gamma_p e^{-\varphi_1 / kT}(\gamma_p p_1 + \gamma_n n_0 e^{-\varphi_0 / kT}), L_1 = 2\gamma_p N_1 e^{-\varphi_1 / kT}.$$

Высота потенциального барьера φ_1 в неравновесных стационарных условиях и число неравновесных электронов в области, окруженной барьером задаются следующими соотношениями

$$\varphi_1 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_0 + \Delta n}{n_{01} + \Delta n^*}\right) \quad (6)$$

$$\Delta n^* = (\Delta n - N_1(f_1 - f_{01}))e^{-\varphi_1 / kT} \quad (7)$$

где q – заряд электрона, Δn^* – число неравновесных носителей заряда в области, окруженной барьером, с учетом того, что часть свободных носителей заряда захватывается глубокой примесью.

При этом $f_1 > f_{01}$, если $\gamma_n > \gamma_p$ и примеси, окруженные барьером, захватывают электроны, $f_1 < f_{01}$, если $\gamma_n < \gamma_p$ и имеет место прилипание дырок [2].

Величина φ_1 зависит от Δn^* , а Δn^* – от числа носителей, захваченных на примеси, окруженные потенциальным барьером (от f_1 , которая в свою очередь определяется высотой барьера φ_1).

Методом итераций проводились численные расчеты f_1 , φ_1 , а также времени жизни электронов и дырок τ_n , τ_p в неоднородно легированном полупроводнике с глубокими примесями в зависимости от уровня инжекции по следующей схеме: пусть в нулевом приближении f_1 не зависит от φ_1 и определяется выражением [2], а величина φ_1 не зависит от уровня инжекции и равна высоте потенциального барьера в состоянии термодинамического равновесия φ_0 .

В нулевом приближении Δn^* тогда определяется соотношением

$$\Delta n^{*(0)} = (\Delta n - N_1(f - f_0))e^{-\varphi_0 / kT}$$

Зная $\Delta n^{*(0)}$ по формулам (5), (6) рассчитываем $f_1^{(1)}$ и $\varphi_1^{(1)}$ в первом приближении.

Подставив полученные значения $f_1^{(1)}$ и $\varphi_1^{(1)}$ в (7), определим $\Delta n^{*(1)}$, а затем рассчитаем $f_1^{(2)}$ и $\varphi_1^{(2)}$ и т. д. Такая процедура продолжается до тех пор, пока $(n+1)$ приближение не совпадет с n -м в пределах заданной точности.

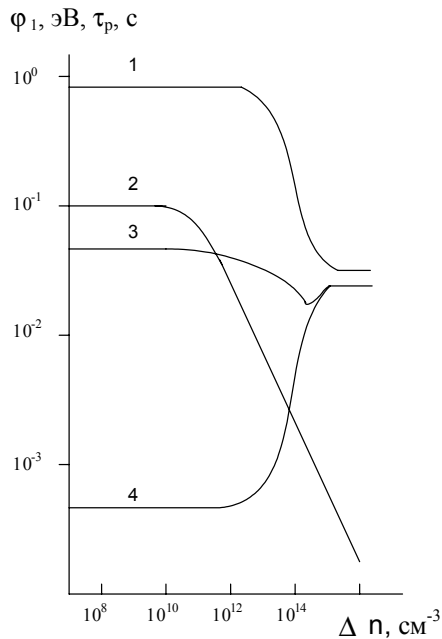


Рис. 1. Зависимость f_I , ϕ_I , τ_n и τ_p от уровня инжекции в Ge n -типа: 1 – f_I ; 2 – ϕ_I ; 3 – τ_n ; 4 – τ_p ; $n_0 = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $N_I = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 100 \text{ К}$; $E = E_c - 0,20 \text{ эВ}$; $\gamma_n = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-3}$; $\gamma_p = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$

Полученные в n -м приближении значения f_I и ϕ_I использовались для расчета τ_n и τ_p [2].

На рисунке 1 приведены зависимости f_I , ϕ_I , τ_n , τ_p от уровня инжекции в Ge n -типа.

Проведенное моделирование показывает, что высота потенциального барьера в полупроводниках неоднородно-легированных глубокими примесями зависит от параметров глубокой примеси (сечения захвата для электронов и дырок, глубины залегания энергетических уровней) и концентрации глубокой примеси. Зависимости времени жизни электронов и дырок τ_n , τ_p от уровня возбуждения определяются как инжекционной перезарядкой дефектов, так и снижением потенциального барьера с ростом уровня инжекции. Высотой потенциального барьера можно управлять, подбирая глубокую примесь с соответствующими параметрами и концентрацией, а также изменяя уровень инжекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоконов, В. М. Кремниевые фотоприемники длинноволнового ИК-диапазона / В. М. Белоконов, Ю. И. Завадский, Ю. А. Кузнецов, В. В. Чернокожин // Электронная промышленность. 2003. № 2. С. 169.
2. Ткачев, В. Д. О нелинейной стационарной рекомбинации в полупроводниках / В. Д. Ткачев, Л. И. Шадурская, В. Ю. Явид // ФТП. 1979. Т. 13. № 1. С. 71.