

О ЗАХВАТЕ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НЕЙТРАЛЬНЫМИ ЦЕНТРАМИ

© В.Г. Джакели, И.А. Тутберидзе

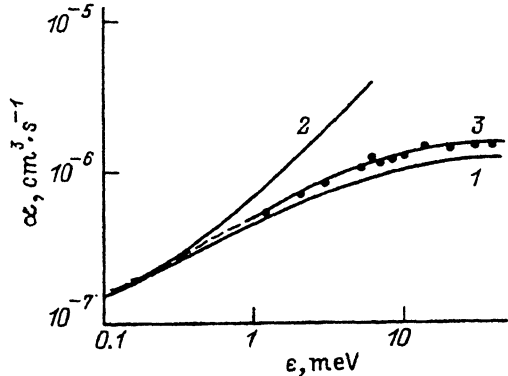
Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили
380028 Тбилиси, Грузия
(Получена 28 июля 1994 г. Принята к печати 18 июля 1995 г.)

Изучается захват свободных электронов на нейтральные центры и его влияние на процесс рекомбинации. Получено условие, при выполнении которого, указанный процесс доминирует над процессом захвата на положительно заряженные центры. Учет указанного процесса рекомбинации приводит к увеличению поля пробоя.

В легированных полупроводниках, помимо захвата свободных электронов на положительно заряженные примесные центры, возможен также захват на нейтральные центры (НЦ).

В работе [1] был рассмотрен процесс захвата свободных электронов на НЦ. При этом испускается один акустический или оптический фонон с энергией $\hbar\omega_q = \varepsilon + E_i$, где $E_i = \hbar^2/2ma_i^2 \simeq 5 \cdot 10^{-2} E_B$ — боровская энергия «лишнего» электрона, ε — энергия свободного электрона, E_B — боровская энергия. Нейтральный центр моделировался δ -образным потенциалом [1]. Рассмотрен процесс захвата как для «медленных» ($\varepsilon \ll E_B$), так и для «быстрых» ($\varepsilon \gg E_B$) электронов. В работе [2] рассматривался захват «медленных» электронов изолированным нейтральным центром (НЦ), потенциал которого изменен близкорасположенным кулоновским центром. Показано, что наличие соседнего притягивающего кулоновского центра приводит к увеличению коэффициента захвата и изменяет его энергетическую зависимость на «близких» расстояниях $R \ll R_C = 2/(k_0^2 a_B)$ — для «очень медленных» ($\varepsilon \ll E_i$) электронов, где k_0 — волновой вектор свободного электрона. Наличие же соседнего отталкивающего кулоновского центра приводит к резкому уменьшению коэффициента захвата.

В работе [3] показана неприменимость приближения потенциала нулевого радиуса действия для «быстрых» электронов [1] и вычислен коэффициент захвата $\alpha(\varepsilon)$ на изолированных нейтральных центрах (ИНЦ) во всей области энергии захватываемого электрона. Результат вычисления $\alpha(\varepsilon)$ приводятся в виде графической зависимости, которая в области энергии $\varepsilon \simeq E_i$ имеет максимум (рисунков).



Зависимость дифференциального коэффициента захвата α от энергии ϵ медленных электронов: 1 — результат данной работы, 2 — результат работы [1], 3 — результат работы [2].

В предлагаемой работе выясняется условие, при котором рекомбинация свободных электронов на нейтральных центрах может внести вклад в процесс захвата электронов. С этой целью с использованием из работы [3] графической зависимости $\alpha(\epsilon)$ в греющем электрическом поле (в приближении электронной температуры T_e) вычислен соответствующий коэффициент рекомбинации. Рассматривается полупроводник n -типа при низких температурах решетки T , содержащий мелкие донорные и акцепторные примеси с концентрациями соответственно N_D и N_A .

Можно убедиться, что графическая зависимость $\alpha(\epsilon)$ [3] с хорошей точностью описывается аналитическим выражением вида

$$\alpha(\epsilon) = \alpha_0 \left(1 - \frac{\beta}{1+Y} \right)^2 (1+Y) \exp(-Y), \quad (1)$$

где

$$\alpha_0 = E_d^2 \pi^2 / 4 \rho \hbar s^2, \quad \beta = (2ms^2/E_i)^{1/2} (4/\pi), \quad Y = \epsilon/E_i,$$

s — скорость звука, E_d — константа деформационного потенциала, ρ — плотность кристалла.

Коэффициент рекомбинации свободного электрона на ИНЦ, вычисленный с использованием (1), имеет вид

$$B_0(T_e) = \alpha_0 \left(\frac{E_i}{kT_e} \right)^{3/2} \left[(1-2\beta) \left(1 + \frac{E_i}{kT_e} \right)^{-3/2} + \frac{\Gamma(5/2)}{\Gamma(3/2)} \left(1 + \frac{E_i}{kT_e} \right)^{-5/2} + \beta^2 \exp \left(1 + \frac{E_i}{kT_e} \right) \Gamma \left(-1/2; 1 + \frac{E_i}{kT_e} \right) \right], \quad (2)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция, $\Gamma(-1/2; 1 + E_i/kT_e)$ — неполная гамма-функция.

Принимая во внимание, что:

— в результате кулоновского взаимодействия довольно высока вероятность для разноименно заряженных центров оказаться соседними. В этом случае их влиянием на нейтральные центры можно пренебречь;

— для малых степеней компенсации $c = N_A/N_D$ имеем

$$N_n^0 \gg N_n^{\sim}, \quad (3)$$

где $N_n^0 = N_D - 3N_A - 2n$ — концентрация ИНЦ, $N_n^{\sim} = 2N_A + n$ — концентрация ННЦ;

— в греющем электрическом поле уменьшается число очень медленных электронов. В этом случае влиянием ННЦ на процесс захвата свободных электронов можно пренебречь. При выполнении соотношения $n \ll N_A$ неравенство (3) дает $c \ll 0.2$.

В этих условиях уравнение рекомбинационной кинетики с учетом захвата свободных электронов на нейтральные центры принимает вид

$$\frac{dn}{dt} = (A_T + A_I n)(N_D - N_A - n) - B_+ n(N_A + n) - B_0 n(N_D - 3N_A - 2n), \quad (4)$$

где $A_T(t)$ и $A_I(T, T_e)$ — коэффициенты термической и ударной ионизации, $B_+(T, T_e)$ — коэффициент рекомбинации свободных электронов на положительно заряженных центрах [4].

Для сравнения процессов захвата свободных электронов на положительно заряженные и нейтральные центры рассмотрим отношение второго и третьего членов уравнения (4):

$$\varphi = \frac{B_+(N_A + n)}{B_0(N_D - 3N_A - 2n)}. \quad (5)$$

Численные оценки показывают, что, например, для Si при $T_e = T = 4$ К $B_+/B_0 \simeq 10^2$, т.е. акт захвата на притягивающем центре происходит гораздо быстрее, чем на ИНЦ. Из равенства (5) при $n \ll N_A$ получаем предельное значение степени компенсации, ниже которого процесс захвата электронов при $T_e = T = 4$ К контролируется ИНЦ: $c < c_0 \simeq 10^{-2}$. С другой стороны, значение c_0 ограничено сверху условием (3), при котором $c_0 \ll 0.2$. С увеличением T_e отношение B_+/B_0 уменьшается и, соответственно, увеличивается c_0 , а тем самым и роль захвата на ИНЦ.

Анализ решения уравнения (4) показывает, что условие примесного пробоя записывается в виде

$$c = \frac{A_I - B_0}{A_I + B_+ - 3B_0}. \quad (6)$$

Из (6) вытекает, что захват на ИНЦ может увеличить значение поля пробоя при малой степени компенсации, и тем сильнее, чем меньше c .

Авторы признательны З.С. Качлишвили за обсуждение результатов и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Е.Б. Гольдгур, Р.И. Рабинович. ЖЭТФ, **84**, 1109 (1983).
- [2] Е.Б. Гольдгур, Р.И. Рабинович. ЖЭТФ, **23**, 1674 (1989).
- [3] S.G. Dmitriev, A.G. Zhdan, A.M. Kozlov, T.M. Lifshits, V.V. Rylkov, O.G. Shagimuratov. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 544 (1993).
- [4] T.O. Gegechkory, V.G. Yakeli, Z.S. Kachlishvili. *Phys. St. Sol. (b)*, **112**, 379 (1982).

Редактор Т.А. Полянская

On carrier capture by neutral centers

V.G. Dzhakeli, I.A. Tutberidze

I. Dzhavaknishvili State University, 380028 Tbilisi, Georgia

Capture of free electrons by neutral centers and its influence on the process of recombination has been studied. A condition is obtained that is obeyed then the process in question predominates over that of capture of free electrons by positively charged centers. Taking account of this recombination process results in an increase in breakdown fields.
