

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ С КВАЗИДИСКРЕТНЫМИ УРОВНЯМИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ПОЛУПРОВОДНИКА

А.Н.Зайцев, А.К.Звездин

В работе [1] было показано, что мелкие донорные примеси в полупроводниках имеют квазидискретные уровни, связанные с вышележащими долинами. Эти уровни были обнаружены экспериментально [2, 3]. Если энергия таких уровней относительно дна основной долины $\epsilon_d \gg T_0$ (T_0 — температура решетки), то по мере разогрева электронов проводимости электрическим полем E их концентрация уменьшается из-за захвата на эти уровни, что может привести к отрицательному дифференциальному сопротивлению (ОДС).

Вольт-амперная характеристика определяется известным выражением:

$$\vec{j} = e n_e \langle \vec{v} f_k \rangle, \quad (1)$$

где символ $\langle \rangle$ обозначает суммирование по всем квазиимпульсам k . Функция распределения f_k находится из системы кинетических уравнений¹⁾:

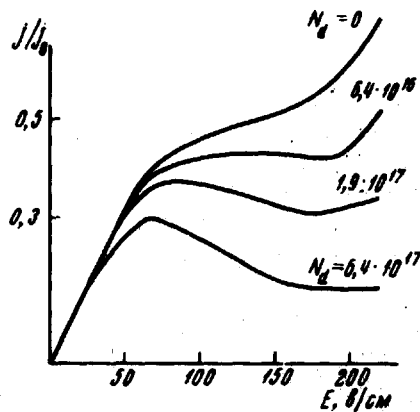
$$\partial f / \partial t + e \vec{E} \cdot \partial f / \partial \vec{p} = I_{11}(f) + I_{12}(f, n_d), \quad (2)$$

$$\partial n_d / \partial t = \rho_d \langle f_k W_{kd} \rangle - n_d \langle W_{kd} \rangle, \quad (3)$$

$$\langle f_k \rangle + n_d = N_e. \quad (4)$$

¹⁾ Эти уравнения справедливы, когда $\tau \ll \tau_{dk}$ (τ и τ_{dk} — времена, соответственно, внутримолиного рассеяния и перехода между квазидискретными уровнями и основной долиной). Поскольку $\tau \sim 10^{-13} + 10^{-14}$ сек, а τ_{dk} , согласно нашим расчетам, $\sim 10^{-11}$ сек, то это условие выполняется.

Здесь I_{11} — интеграл столкновений, описывающий внутридолинное рассеяние, I_{12} описывает взаимодействие электронов проводимости с квазидискретными уровнями, ρ_d — концентрация квазидискретных уровней, n_d — концентрация электронов на них и W_{dk} — соответственно, вероятности перехода электрона из состояния с квазимпульсом \vec{k} на квазидискретный уровень и обратно. Отношение времени $\tau/\tau_{dk} \sim I_{12}/I_{11}$ можно использовать в качестве малого параметра при решении кинетических уравнений. В нулевом приближении по этому параметру в стационарном случае функция распределения определяется из (2) с точностью до константы. Считаем частоту межэлектронных столкновений достаточно большой, так что симметричная часть этой функции суть $C \exp(-\epsilon/T_e)$, где T_e — электронная температура.



Вольт-амперные характеристики для Ga Sb и T_e при $T_0 = 77^\circ \text{K}$. $i_0 = e N_e \sqrt{3 T_0} / m^*$ (T_0 — температура Дебая). N_d — концентрация примесей

Поскольку, как можно показать, времена жизни электрона на квазидискретном уровне, обусловленные электрон-фононным взаимодействием и рассеянием на кулоновском потенциале примеси есть, соответственно, величины порядка 10^{-11} и 10^{-9} сек, и в электрон-фононном взаимодействии эффективны только фононы с квазимпульсом $q \sim k_0$ (k_0 — разность квазимпульсов основного и вышележащего минимумов), то следует различать два случая: $\epsilon_d > \hbar \omega_{k_0}$ (A) и $\epsilon_d \leq \hbar \omega_{k_0}$ (B). Выражение для концентрации электронов n_e при указанном выше виде функции распределения с помощью уравнений (3) и (4) записывается так:

$$n_e = N_e \left[1 + 2/\sqrt{\pi} \frac{\rho_d}{\rho(T_e)} D \exp\left(-\frac{\epsilon_d + \hbar \omega_{k_0}}{T_e}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $\rho(T_e) = \sqrt{2/\pi^2} (m^* T_e / \hbar^2)^{3/2}$ есть число электронных состояний в

основной долине,

$$D = \left(\frac{\epsilon_d + \hbar \omega_{k_0}}{\epsilon_d - \hbar \omega_{k_0}} \right)^{1/2} \quad \text{в случае (A) и}$$

$10^2 \left[\left(\frac{\epsilon_d + \hbar \omega_{k_0}}{\epsilon_d - \hbar \omega_{k_0}} \right) \right]^{1/2}$ в случае (B), а N_e есть концентрация электронов при $\epsilon_d E = 0$. n_e имеет минимальное значение при $T_e = 2/3(\epsilon_d + \hbar \omega_{k_0})$.

Естественно ожидать, что ОДС сможет возникнуть, если концентрация связанных электронов n_d будет порядка n_e . В случае (A) это имеет место при $\rho_d \sim 3 \cdot 10^{20} (m^*/m_0)^{3/2} \text{ см}^{-3}$ (для $\epsilon_d \sim 3 \hbar \omega_{k_0} (\hbar \omega_{k_0} (2-3) 10^{20} \text{ К}))^2$. В случае (B) необходимая величина ρ_d уменьшается на два порядка и может быть легко достигнута во многих полупроводниках.

На рисунке представлены вольт-амперные характеристики, вычисленные для GaSb с примесью атомов T_e ; здесь осуществляется случай (A) ($\epsilon_d \sim 6 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$) и $\rho_d = 8N_d$. При вычислениях использовались формулы (1) и (5), а также выражение для дрейфовой скорости и выражение, связывающее E и T_e , полученные Стрэттоном [4] для случая релаксации на полярных оптических колебаниях.

С точки зрения рассмотренного здесь эффекта представляют интерес твердые растворы полупроводников (Ge-Si, различные полупроводники типа A^{III}B^V), варьируя состав которых можно подбирать величину ϵ_d так, чтобы осуществлялся случай (B).

Выражаем благодарность за обсуждение работы В.М. Елеонскому, Р.Ф. Казаринову и В.В. Осипову.

Поступила в редакцию

5 мая 1969 г.

После переработки

19 мая 1969 г.

Научно-исследовательский институт
физических проблем

Литература

- [1] G.A. Peterson. *Proc. Int. Conf. Phys. Semicond., Paris, 1964, p. 771.*
- [2] R.T. Bate. *J. Appl. Phys.*, **33**, 26, 1962.
- [3] A.G. Foyt, R.E. Halsted, W. Paul. *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 55, 1966.
- [4] R. Stratton. *Proc. Roy. Soc.*, **246A**, 406, 1958.

²⁾ В зависимости от материала $\rho_d = (2 + 12) N_d$.