ПЛОТНОСТЬ ДЫРОК В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ n-ГЕРМАНИИ

© *Ю.В.Шикина, Н.И.Шикина*

Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия
(Получена 21 февраля 1995 г. Принята к печати 16 апреля 1995 г.)

Приводится расчет плотности дырок в легированном донорами и пластически деформированном германии. Сравнение расчетных и экспериментальных значений этой плотности дает информацию о свойствах нижнего акцепторного уровня для электронов, локализованных на дислокациях.

Цель работы — вычисление плотности дырок в пластически деформированном германии, исходно имеющем электронную проводимость. Существует разновидность дислокационной инверсии типа проводимости, наблюдавшаяся в работе [1], которая гарантирует стремление уровня Ферми с ростом плотности дислокаций к нижнему акцепторному уровню E_1 для электронов на дислокациях. Это дает возможность получить независимую информацию о свойствах данного уровня, в частности о его конечной емкости C_1.

Система определений для плотности дырок $n_p(T)$ в объеме пластически деформированного n-германия при появлении тенденции к инверсии типа проводимости выглядит так:

$$n_p(T) = N_v(T)\exp(-F/T), \tag{1}$$

$$f = C_1\left[\exp(E_1 + V_c - F)/T + 1\right]^{-1} + C_2\left[\exp(E_2 + V_c - F)/T + 1\right]^{-1}, \tag{2}$$

$$V_c = e\varphi(r_0), \qquad r_0 = a/f, \tag{3}$$

$$\pi R^2 n_d + 2\pi\int\limits_{r_0}^{R} n_p(r)r\,dr = f/a, \tag{4}$$

$$n_p(r) = n_p(T)\exp\left[e\varphi(r)/T\right], \qquad n_p(T) = n_p(r)|_{r=R}, \tag{5}$$

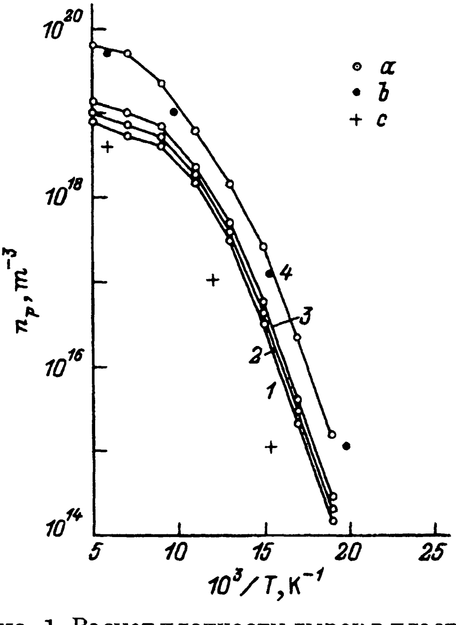
$$\Delta\varphi = 4\pi e\varepsilon^{-1}\left[n_d + n_p(r)\right], \tag{6}$$

$$\varphi'|_{r=0} = 0, \quad \varphi|_{r=R} = 0, \quad \varphi'|_{r=r_0} = 2ef/\varepsilon a, \tag{7}$$

$$(\pi R^2)^{-1} = N. \tag{8}$$

Здесь $n_p(r)$ — плотность дырок в окрестности дислокации, ε — диэлектрическая постоянная полупроводника, R — величина ридовского радиуса, связанная с плотностью дислокаций N соотношением (8). Измеряемая плотность дырок $n_p(T)$ выбрана совпадающей с локальной плотностью дырок $n_p(r)$ на периферии ридовского цилиндра (при $r = R$). $N_v(T)$ — плотность состояний в валентной зоне, F — положение уровня Ферми, отсчитанное от вершины валентной зоны, E_1, E_2 — положение дислокационных уровней, C_1, C_2 — соответствующие емкости, f — коэффициент заполнения дислокации электронами, a — межатомное расстояние, $\varphi(r)$ — электрический потенциал, удовлетворяющий уравнению Пуассона (6), n_d — объемная плотность доноров. В интересующих нас условиях все доноры ионизированы. Граничные условия (7) для потенциала $\varphi(r)$ законны в пренебрежении вкладом свободных электронов в условие интегральной нейтральности кристалла (4).

Система (1)–(8) аналогична обсуждавшейся в работе в [2] при описании явления дислокационной инверсии типа проводимости в кремнии. Разница лишь в том, что для германия становится заметным вклад ды-



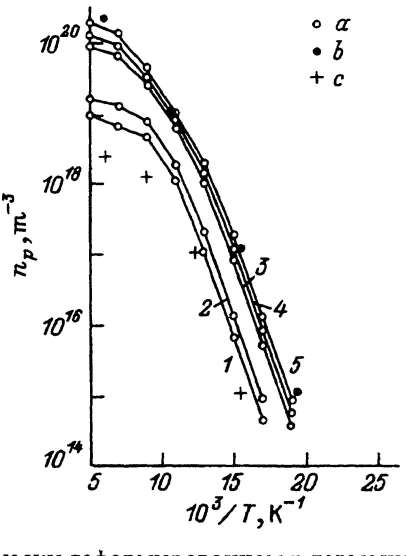


Рис. 1. Расчет плотности дырок в пластически деформированном n-германии для модели с двумя электронными уровнями (точки a и линии) Параметры расчета $E_1 = 0.11$ эВ, $C_1 = 0.1$, $E_2 = 0.28$ эВ, $n_d = 5 \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$. Плотность дислокаций N_d, см$^{-2}$: *1* — $3 \cdot 10^6$, *2* — $4 \cdot 10^6$, *3* — $5.5 \cdot 10^6$, *4* — $3 \cdot 10^7$ Параметры спектра подбирались для наилучшего совпадения с кривой *4* эксперименатльных данных (b) из работы [1]. Кроме того, здесь приведены данные о плотности дырок из работы [1] для кривой *1* (c).

Рис. 2. Расчет плотности дырок в пластически деформированном германии (точки a и линии). Параметры электронного спектра такие же, как на рис. 1. Плотность доноров $n_d = 3 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$. Плотность дислокаций N_d, см$^{-2}$: *1* — $5 \cdot 10^6$, *2* — $8.5 \cdot 10^7$, *3* — $4.5 \cdot 10^7$, *4* — $6.5 \cdot 10^7$, *5* — 10^8. Экспериментальные данные из работы [1]: b — для кривой *5*, c — для кривой *1*.

рок в условие (4), и поэтому приходится решать нелинейное уравнение Пуассона (6) с условиями (7). Его приближенное решение строится из двух частей, в одной из которых (вблизи оси дислокации) можно пренебречь плотностью доноров по сравнению с дырочной. Такое упрощенное уравнение

$$\Delta\varphi \approx \exp(e\varphi/T)$$

решается аналитически [3]. На периферии, т.е. в области $r \leqslant R$, уравнение (6) линеаризуется.

Как и в работе [2], система (1)–(8) сводится к определению поведения уровня Ферми как функции от температуры T и плотности дислокаций при разных значениях емкости C_1 (емкость C_2 имеет масштаб единицы). Зная F, можно построить зависимость $n_p(T)$ (1) и, сравнивая ее с имеющимися экспериментальными данными [1], подобрать величину C_1.

Рассчитанные с помощью такого алгоритма значения $n_p(T)$ приведены на рис. 1, 2 вместе с экспериментальными данными [1]. Оптимальная величина C_1 оказывается равной $C_1 \cong 0.1$. Расчет приводит к правильной температурной зависимости $n_p(T)$ для разных плотностей дислокаций и качественно правильному сдвигу этих кривых в функции от плотности дислокаций. Интересно отметить, что если в случае p-германия зависимости $n_p(T)$ для разных плотностей дислокаций пересекаются в одной точке $T = T_*$ (см. [1,4,5]), отвечающей обращению в нуль коэффициента заполнения f, то в данном случае речь идет о практически параллельном сдвиге этих кривых с изменением плотности дислокаций без тенденции к пересечению. Это обстоятельство нетрудно понять, ибо в обсуждаемом варианте задачи дислокации постоянно заряжены за счет доноров n_d, введенных исходно в полупроводник.

Работа частично финансирована Международным научным фондом, грант MRZ000.

Список литературы

[1] F.I. Kolubakin, G.A. Shevchenko. Phys. St. Sol. (a), **63**, 677 (1981).
[2] Ю.В. Шикина, В.Б. Шикин. ФТП, **28**, 675 (1994).
[3] Э. Камке. *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям* (М., Наука, 1965).
[4] Ю.В. Шикина, В.Б. Шикин. ФТП, **25**, 2225 (1991).
[5] Ю.В. Шикина, В.Б. Шикин. ФТП, **26**, 927 (1992).

Редактор Т.А. Полянская

Hole Density in Plastically Deformed n-Germanium

Yu.V. Shikina, N.I. Shikina

Institute for Solid State Physics, Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia