

УДК 621.315

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В МНОГОДОЛИННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.И. ВАГАНЯН*, Е.М. БАГИЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: aivahanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 10 февраля 2014 г.)

Показана возможность определения отдельных концентраций доноров и акцепторов в многодолинных полупроводниках на основе температурной зависимости общей концентрации носителей заряда. В отличие от однодолинного полупроводника учитывается, что эффективная масса плотности состояний и эффективная энергия ионизации не постоянны и изменяются с температурой.

Известно, что отдельные концентрации доноров и акцепторов однодолинного полупроводника определяются по температурной зависимости концентрации носителей заряда. Суть метода заключается в том, что по положению плато в области температур насыщения определяется эффективная концентрация доноров (или акцепторов – в случае полупроводника *p*-типа):

$$n_s = N_d - N_a, \quad (1)$$

где n_s – концентрация насыщения, N_d – концентрация доноров, N_a – концентрация акцепторов. В низкотемпературной области используется выражение [1]

$$\frac{n(n + N_a)}{N_d - N_a - n} = \beta^{-1} N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_d}{kT}\right), \quad (2)$$

где ε_d – энергия ионизации донорных уровней, N_c – эффективная плотность состояний, n – общая концентрация носителей, β – фактор спинового вырождения.

Энергия ионизации донорных уровней определяется по наклону прямолинейного участка кривой логарифма температурной зависимости концентрации электронов. Тогда, при совместном решении уравнений (1) и (2) определяются N_d и N_a .

При исследовании многодолинных полупроводников необходимо учитывать, что с изменением температуры, вследствие электронных переходов между долинами, изменяются наблюдаемая эффективная масса плотности состояний и наблюдаемая энергия ионизации примесных уровней [2].

Если известны эффективная плотность состояний N_c^* и эффективная энергия ионизации ε_d^* многодолинного полупроводника, то для определения

раздельных концентраций доноров и акцепторов используется формула [1]

$$\frac{n(n + N_a)}{N_d - N_a - n} = (\beta^*)^{-1} N_c^* \exp\left(-\frac{\varepsilon_d^*}{kT}\right). \quad (3)$$

Правая часть логарифма выражения (3) не является прямой линией в зависимости от обратной температуры, т.к. N_c^* и ε_d^* изменяются с температурой. В этом случае энергия ионизации примесных уровней определяется по наклону касательной к кривой в выбранной точке температурной зависимости.

В выражении (3) N_c^* и ε_d^* рассчитываются по формулам

$$N_c^* = \sum_i N_{ci} \exp\left(-\frac{\delta E_i}{kT}\right), \quad (4)$$

$$(\beta^*)^{-1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_d^*}{kT}\right) = \sum_i (\beta_i)^{-1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{di} - \delta E_i}{kT}\right), \quad (5)$$

где ε_{di} – энергия ионизации примесных уровней, связанных с i -долиной, δE_i – энергетическое расстояние i -долины от нулевого уровня, а фактор спинового вырождения можно принять $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta^* = 2$.

Если же вышеупомянутые параметры N_c^* и ε_d^* многодолинного полупроводника неизвестны, то для определения N_d и N_a достаточно иметь значение эффективной массы плотности состояний в абсолютной долине. Заметим, что для большинства полупроводниковых материалов этот параметр известен довольно точно.

При очень низких температурах, когда практически все электроны находятся в абсолютной долине и выполняется условие $n \ll N_a < N_d$, из формулы

$$\frac{n(n + N_a)}{N_d - N_a - n} = \frac{1}{2} N_{c1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{d1}}{kT}\right) \quad (6)$$

следует, что

$$n = \frac{N_d - N_a}{2N_a} N_{c1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{d1}}{kT}\right) \quad (7)$$

или

$$\frac{nAT^{-3/2}}{N_d - N_a} = \frac{M_1 m_1^{3/2}}{N_a} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{d1}}{kT}\right), \quad (8)$$

где $A = \beta^* h^3 / (2(2\pi k)^{3/2})$, M_1 – число эквивалентных минимумов, m_1 – эффективная масса электрона в абсолютной долине, а ε_{d1} – энергия ионизации донорных уровней абсолютной долины.

График зависимости логарифма левой части этого уравнения от обратной температуры представляет прямую линию. По отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат, можно определить предэкспоненциальный множитель $M_1 m_1^{3/2} / N_a$ [3]. По известным значениям $M_1 m_1^{3/2}$ легко вычислить N_a , следова-

тельно, и N_d , т.к. $N_d - N_a$ определяется по положению плато в области температур насыщения (1).

Отметим, что точность определения отдельных концентраций доноров и акцепторов, а также параметров зонной структуры многодолинного полупроводника во многом зависит от точности определения температурной зависимости концентрации носителей заряда и величины $N_d - N_a$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **J.S.Blakemore**. Semiconductor Statistics, New York, Dover, 2002.
2. **А.И. Ваганян**. ФТП, **16**, 3 (1982).
3. **А.И.Ваганян, Е.М.Багиян**. Изв. НАН Армении, Физика, **49**, 263 (2014).

ԴՈՆՈՐՆԵՐԻ ԵՎ ԱԿՑԵՊՏՈՐՆԵՐԻ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՑԻԱՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ԲԱԶՄԱՀՈՎԻՏ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԻԶՆԵՐՈՒՄ

Ա.Ը. ՎԱՀԱՆՅԱՆ, Ե.Մ. ԲԱԴԻՅԱՆ

Ցույց է տրված բազմահովիտ կիսահաղորդիչներում դոնորների և ակցեպտորների կոնցենտրացիաների որոշման սկզբունքային հնարավորությունը: Ի տարբերություն միահովիտ կիսահաղորդիչների, հաշվի է առնվել, որ վիճակների խտությունը, արդյունաբար զանգվածը և խառնուկային մակարդակների իոնիզացման արդյունաբար էներգիան կախված են ջերմաստիճանից:

DETERMINATION OF CONCENTRATIONS OF DONORS AND ACCEPTORS IN MANY-VALLEY SEMICONDUCTORS

A.I. VAHANYAN, Y.M. BAGHIYAN

A possibility of determination of uncooperative concentrations of donors and acceptors in many-valley semiconductors is shown on the basis of temperature dependence of total charge carriers' concentrations. In contradiction to single-valley semiconductor, it is necessary to take into account that effective mass of density of states and effective ionization energy are variable and depend on temperature.