

## О глубоком донорном уровне в *n*-GaAs по данным об электронном транспорте при всестороннем давлении

© М.И. Даунов, У.З. Залибеков, И.К. Камиллов, А.Ю. Моллаев<sup>†</sup>

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия.

(Получена 21 ноября 2013 г. Принята к печати 19 декабря 2013 г.)

Приведены результаты количественного анализа экспериментальных данных о барических зависимостях электросопротивления и коэффициента Холла при всесторонних давлениях от атмосферного до 18 ГПа в *n*-GaAs. В интервале давлений  $10 \leq P \leq 18$  ГПа обнаружен глубокий донорный центр. Обсуждаются положение его уровня энергии относительно края Г-долины зоны проводимости при атмосферном давлении и его принадлежность вакансии мышьяка.

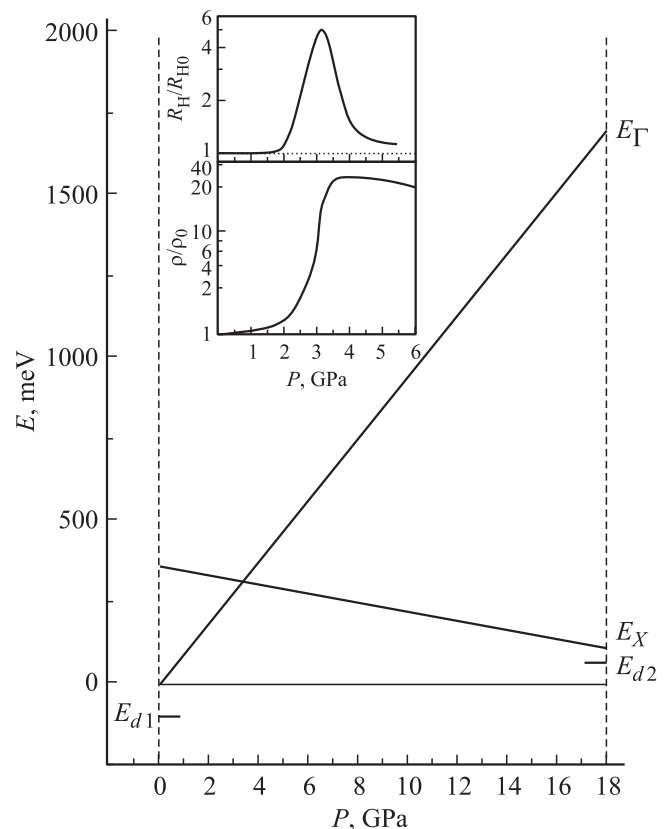
1. К эффективным внешним воздействиям с целью исследования примесного энергетического спектра относится высокое всестороннее давление. Особенно актуально применение высокого давления в случае, когда ставится задача обнаружения глубоких и глубоких резонансных, уровни энергии которых расположены на зонном континууме, примесных центров. В отличие от мелких примесных центров, которые „следят“ при всестороннем давлении за собственной зоной, с которой они генетически связаны, энергия глубоких примесных центров относительно абсолютного вакуума, как показал анализ экспериментальных данных [1–4], практически, на уровне погрешности эксперимента, остается постоянной при изотропном сжатии кристаллической решетки. Это обусловлено тем, что их волновые функции следует строить по всей зоне Бриллюэна и характер воздействия всестороннего давления на их энергию определяется эволюцией всей структуры энергетического спектра, а не только ближайшими одной или двумя зонами [5–7].

Уместно отметить, что только лишь по результатам феноменологического описания примесного центра по данным об энергии ионизации, сечения захвата и т. п. при атмосферном давлении идентифицировать примесный центр, мелким или глубоким он является, затруднительно [1–4]. В этой связи исследование эволюции энергетического спектра носителей заряда в полупроводниках под воздействием всестороннего давления, особенно в хорошо изученных модельных объектах, каким является арсенид галлия, весьма актуально.

В данной работе приведены результаты количественного анализа экспериментальных данных о барической зависимости коэффициента Холла  $R_H$  и электросопротивления  $\rho$  в *n*-GaAs при всесторонних давлениях от атмосферного до  $P = 18$  ГПа [8,9].

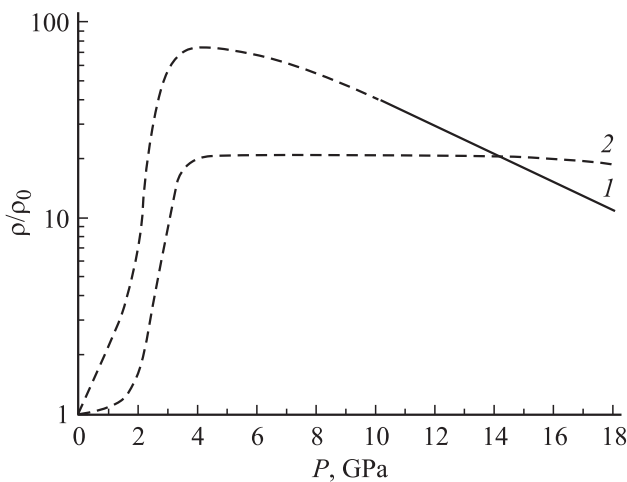
2. Известно [9,10], что в *n*-GaAs с ростом всестороннего давления от атмосферного сопротивления  $\rho$  резко возрастает при  $P > 2$  ГПа, а при  $P = (5–6)$  ГПа выходит на насыщение. Коэффициент Холла до 2 ГПа слабо зависит от давления, проходит через экстремум и при  $P = (5–6)$  ГПа близок по величине к значению

при атмосферном давлении (рис. 1). Подобные зависимости  $\rho(P)$  и  $R_H(P)$  обусловлены разнодолинным Г–Х переходом в зоне проводимости (рис. 1) и перетеканием электронов в Х-долину из Г-долины. Барический коэффициент ширины запрещенной зоны относительно потолка валентной зоны отрицателен:  $\Delta = dE_{gX}/dP = -14$  мэВ/ГПа. Край Г — долины находится выше  $E_X$  более чем на 300 мэВ при



**Рис. 1.** Зависимости краев Г-долины  $E_G$  и Х-долины  $E_X$  зоны проводимости GaAs от всестороннего давления.  $E_{d1}$  и  $E_{d2}$  — энергии глубокого двойного донорного центра (разъяснение в тексте). На вставке — зависимости нормализованных удельного электросопротивления  $\rho/\rho_0$  и коэффициента Холла  $R_H/R_{H0}$  от всестороннего давления в образце *n*-GaAs [9].

<sup>†</sup> E-mail: a.mollaev@mail.ru



**Рис. 2.** Зависимости нормализованного удельного электро-сопротивления  $\rho/\rho_0$  от давления: сплошная линия — эксперимент [8], пунктирные линии — расчет для двух значений энергии глубокого двойного донорного центра (разъяснение в тексте).

$P > 6$  ГПа ( $dE_{g\Gamma}/dP = 94$  мэВ/ГПа,  $E_X - E_r = 360$  мэВ при  $P = 0$ ), и концентрация электронов в  $\Gamma$ -долине  $n_r \approx 0$  [9,10]. Кроме того, из данных о температурных зависимостях  $\rho(T)$  и  $R_H(T)$  при атмосферном давлении в объемных кристаллах *n*-GaAs с концентрацией избыточных доноров  $N_d = 1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \div 5.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [9] обнаружен уровень энергии примесного центра  $E_{d1} = (0.15 - 1.1 \cdot 10^{-7} N_d^{1/3})$  эВ.

При  $P > 10$  ГПа, концентрации электронов в  $\Gamma$ -долине  $n_\Gamma \approx 0$ , наблюдается убывание  $\rho$  в интервале  $10 < P < 18$  ГПа (рис. 2) [8]. Это свидетельствует о наличии уровня энергии глубокого донорного центра под дном  $X$ -долины зоны проводимости  $E_X$ , так как с ростом давления энергетический зазор между ним и краем  $X$ -долины ( $E_X - E_{d2}$ ) уменьшается (рис. 1) и соответственно растет концентрация электронов в  $X$ -долине. По результатам количественного анализа зависимости  $\rho(P)$  при  $10 < P < 18$  ГПа выяснено, что при атмосферном давлении уровень энергии этого глубокого донора располагается вблизи края  $\Gamma$ -долины. Расчеты были проведены при варьировании суммарной концентрации электронов в обеих долинах зоны проводимости ( $10^{15} \div 10^{18}$ )  $\text{см}^{-3}$  и при учете концепции независимости энергии глубоких примесных центров от всестороннего давления относительно абсолютного вакуума [1–4] с использованием соотношений:

$$\beta \exp E_{d1} = \frac{1 - A}{A \exp[(P_1 - P_3)\Delta^* - \eta_{X3}] - \exp[(P_1 - P_{21})\Delta^* - \eta_2]}, \quad (1)$$

$$A = \frac{n_{C1} - n_{C3} \exp[(P_1 - P_2)\Delta^* + \eta_1 - \eta_2] - 1}{n_{C1} - n_{C2} \exp[(P_1 - P_3)\Delta^* + \eta_1 - \eta_3] - 1}, \quad (2)$$

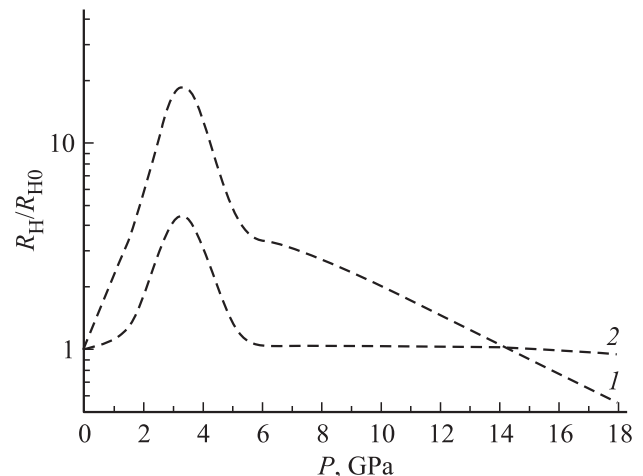
$$\frac{n_{C1} - n_{C3}}{n_{C1} - n_{C2}} = \frac{n_{d3} - n_{d1}}{n_{d2} - n_{d1}}, \quad (2a)$$

$$n_{dj} = \frac{N_d}{1 + \beta \exp(E_{dj} - \eta_{Xj})}, \quad (3)$$

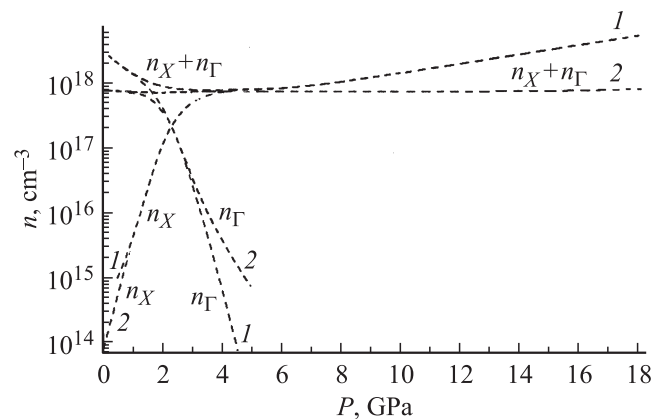
$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{n_{\Gamma 0}}{n_\Gamma} \frac{b}{b + c}, \quad (4)$$

$$\frac{R_H}{R_{H0}} = \frac{n_{\Gamma 0}}{n_\Gamma + n_X} \frac{(b^2 + c)(1 + c)}{(b + c)^2}, \quad (5)$$

$b = \mu_\Gamma/\mu_X$ ,  $c = n_X/n_\Gamma$ . Индекс „0“ соотносит параметр к атмосферному давлению. Принято отношение подвижностей  $b = 20$ , эффективные массы плотности состояний электронов  $\Gamma$ - и  $X$ -долин  $m_{d\Gamma} = 0.072m_0$ ,  $m_{dX} = 1.2m_0$  [9,10]. Давления  $P_1 < P_2 < P_3$  ( $8 \leq P \leq 18$  ГПа),  $\eta_{X1}$ ,  $\eta_{X2}$ ,  $\eta_{X3}$ ,  $\Delta^*$  — приведенные энергии Ферми относительно края  $X$ -долины и барического коэффициента  $\Delta$ ,  $\beta$  — параметр спинового



**Рис. 3.** Рассчитанные зависимости нормализованного коэффициента Холла  $R_H/R_{H0}$  для двух значений энергии глубокого двойного донорного центра (разъяснение в тексте).



**Рис. 4.** Рассчитанные барические зависимости концентраций электронов в  $\Gamma$ - ( $n_\Gamma$ ) и  $X$  ( $n_X$ )-долинах для двух значений энергии глубокого двойного донорного центра (разъяснение в тексте).

вырождения;  $n_{\Gamma}$ ,  $n_{\Gamma 0}$ ,  $n_{X1}$ ,  $n_{X2}$ ,  $n_{X3}$  и  $n_{d1}$ ,  $n_{d2}$ ,  $n_{d3}$  — концентрации электронов в  $\Gamma$ - и  $X$ -долинах и на глубоких донорных центрах;  $N_d$  — концентрация глубоких донорных центров.

В качестве иллюстрации на рис. 2–4 (кривые 1) приведены результаты оценок с использованием соотношений (1)–(5) и экспериментальной зависимости  $\rho(P)$  при  $10 \leq P \leq 18$  ГПа для суммарной концентрации электронов в  $\Gamma$ - и  $X$ -долинах порядка  $10^{18}$  см $^{-3}$ . По экспериментальной зависимости  $\rho(P)$  при  $10 \leq P \leq 18$  ГПа получено

$$E_X - E_{d2} = (289 - 14P) \text{ мэВ } (P - \text{ ГПа}) \quad (6)$$

и при  $P = 0$   $E_{d2} - E_{\Gamma} = 70$  мэВ (рис. 1). Рассчитанные зависимости  $\rho(P)$ ,  $R_H(P)$ ,  $n_{\Gamma}$ ,  $n_X$  от  $P$  с учетом наличия глубокого донорного уровня  $E_{d2}$  (6) (рис. 2–4, кривые 1) отличаются от экспериментальных данных, полученных при  $P < 6$  ГПа [9] (рис. 1).

Отметим, что наличие глубокого донорного центра в арсенидах III–V и II–IV–V $_2$  вероятно и электронный тип проводимости в специально нелегированных образцах обусловлен наличием вакансии мышьяка [11,12], а, согласно [13,14], вакансия мышьяка является двойным донором и формирует два относительно близко расположенных вблизи дна зоны проводимости уровня энергии при атмосферном давлении.

Действительно, при наличии глубокого донора, уровень энергии которого расположен вблизи края  $\Gamma$ -долины  $E_{\Gamma} - E_{d1} \approx 150$  мэВ при  $P = 0$ , рассчитанные зависимости  $\rho(P)$ ,  $R_H(P)$  до  $P < 6$  ГПа согласуются с экспериментальными данными (рис. 1–4, кривые 2), но противоречат зависимости  $\rho(P)$  при  $P > 10$  ГПа [8] (рис. 2).

Таким образом обнаруженный глубокий донорный центр  $E_{d2}$  в  $n$ -GaAs при  $10 \leq P \leq 18$  ГПа является вторым вышележащим частично заселенным „альтернативным“ уровнем двойного донора — вакансия мышьяка. Концентрация компенсирующих акцепторов ( $N_a$ ) в рассматриваемом случае  $N_d < N_a < 2N_d$ , что обусловлено технологической предысторией.

## Список литературы

- [1] М.И. Даунов, И.К. Камилов, С.Ф. Габибов. ФТП, **35** (1), 58 (2001).
- [2] M.I. Daunov, I.K. Kamilov, A.B. Magomedov, S.F. Gabibov. Phys. Status Solidi B, **235** (2), 297 (2003).
- [3] М.И. Даунов, И.К. Камилов, С.Ф. Габибов. ФТТ, **46** (10), 1766 (2004).
- [4] И.К. Камилов, С.Ф. Габибов, М.И. Даунов, А.Ю. Моллаев. ФТП, **45** (12), 1604 (2011).
- [5] W. Paul. Proc. 9th Int. Conf. Semicond (Moscow, 1968) v. 1, p. 51.
- [6] V.A. Telejkin, K.B. Tolpigo. Semiconductors, **16**, 1337, (1982).
- [7] In-Hwan Chor, Y.Yu. Peter. Phys. Status Solidi B, **211**, 143 (1999).
- [8] J.Z. Jiang, J. Staun Olsen, L. Gerward, S. Steenstrup. High Pressure Res., **22**, 395 (2002).
- [9] G.D. Pitt, J. Lees. Phys. Rev. B, **2** (10), 4144 (1970).
- [10] О. Маделунг. Физика полупроводниковых соединений элементов III и IV группы (М., Мир, 1967).
- [11] В.Д. Прочухан. Матер. VI Зимней школы по физике полупроводников (Л., 1974).
- [12] В.Н. Брудный Изв. вузов, **39** (8), 84 (1986).
- [13] G.M. Martin, S. Makram-Ebeid. In: Deep Centers in Semiconductors, ed. by S.T. Pantelides (N.Y., Gordon & Breach, 1986) p. 399.
- [14] M. Baumler, U. Kaufmann, J. Windscheif. Appl. Phys. Lett., **46**, 581 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

## Deep donor level in $n$ -GaAs at electron transport data at hydrostatic pressure

M.I. Daunov, U.Z. Zalibekov, I.K. Kamilov, A.Yu. Mollaev

Amirkhanov institute of Dagestan scientific centre of Russian academy sciences, 367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** The baric dependences of the resistivity and Hall coefficient is researched in  $n$ -GaAs at hydrostatic pressures from atmospheric up to 18 GPa. The results on the quantitative analysis of experimental data are reported. A deep donor center is found. A position of its energy level relative to the edge of conduction band  $\Gamma$ -valley at the atmospheric pressure and its belonging to arsenic vacancies is considered.