

## Арсенид индия *p*-типа — квазибесщелевой полупроводник

© М.И. Даунов, И.К. Камилов, А.Б. Магомедов, А.Ш. Киракосян

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
367003 Махачкала, Россия

(Получена 5 мая 1998 г. Принята к печати 29 июня 1998 г.)

При всестороннем давлении до значений  $P = 1.5$  Па и температурах  $T = 77.6$  и  $300$  К по данным о полевых (до  $H = 12$  кЭ и  $E = 25$  В/см) зависимостях коэффициента Холла  $R$  и удельном сопротивлении  $\rho$  в сильно легированном компенсированном полупроводнике  $p$ -InAs с концентрацией избыточных акцепторов  $N_{\text{ext}} = (N_A - N_D) \simeq 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $N_A/N_D \simeq 0.9$  рассчитаны характеристические параметры носителей заряда. Выяснено, что на хвосте плотности состояний зоны проводимости располагается глубокая акцепторная зона и при низких температурах реализуется состояние типа сильно легированного полностью компенсированного полупроводника.

Анализируя известные данные об аномалиях кинетических свойств узкозонных дырочных сильно легированных компенсированных полупроводников (СЛКП) CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) [1–6], HgCdTe [7], InAs с  $N_{\text{ext}} < 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [8,9], InSb(Cr) [12], мы пришли к выводу [4–6] о единообразии электронного спектра этих веществ, определяемого, с одной стороны, наличием глубокой акцепторной зоны, расположенной на хвосте плотности состояний зоны проводимости, а с другой стороны, влиянием крупномасштабного флуктуирующего потенциала. Поскольку бесщелевое состояние в этих веществах индуцировано дефектами, они получили название квазибесщелевых полупроводников (КБП) [5,6].

В данном кратком сообщении приведены исследования некоторых электрофизических свойств кристаллов СЛКП  $p$ -InAs с  $N_{\text{ext}} \simeq 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при всестороннем давлении (рис. 1–3, таблица).

Методика эксперимента, процедура вычисления эффективных характеристических параметров носителей заряда — подвижностей  $\mu_c, \mu_A, \mu_v$  и концентраций  $n, p_A, p_v$  (здесь и далее индексы "с", "А", "v" относятся к зонам проводимости, акцепторной и валентной) и модельные представления применительно к  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) подробно изложены в работах [1–6]. Ввиду подобия кинетических свойств и единой природы рассматриваемых явлений в дырочных CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) и InAs далее приводится их краткое обсуждение.

В образце 3 (см. таблицу)  $N_{\text{ext}} \simeq N_A$ , где  $N_A$  — концентрация глубоких акцепторных центров. Специфичность

ситуации и целесообразность проведения сопоставления с данными для образца 10  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) с аналогичными характеристиками (см. работу [5]) явились причиной акцентирования нашего внимания на кинетических свойствах именно этого образца.

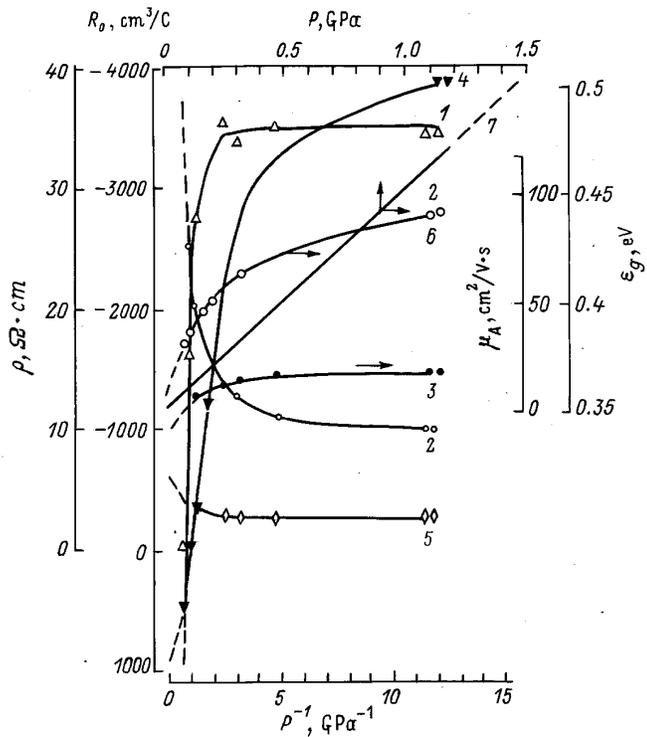
При расчетах использованы известные сведения о законе дисперсии, величинах эффективной массы электронов на дне зоны проводимости  $m_c/m_0$ , ширины запрещенной зоны  $\varepsilon_g$  и спин-орбитального расщепления валентных зон  $\Delta_s$  [8,9,12]. Ранее считалось, что величина  $\Delta_s$  и эффективная масса дырок по плотности состояний  $m_p/m_0$  не зависят от давления  $P$ . Уширением глубокого акцепторного уровня при 300 К пренебрегалось [2]. При 300 К, в отличие от  $T = 77.6$  К, зависимость  $n(P)$  носит экспоненциальный характер. Поэтому применение закона дисперсии для идеального полупроводника в полупроводнике с флуктуирующим потенциалом, каким является СЛКП  $p$ -InAs, корректно (см. [1,2,4,5]). Из результатов количественного анализа при 300 К следует:

$$\begin{aligned} m_c/m_0 &= 0.022 + 4.34 \cdot 10^{-3}P, \\ \varepsilon_g &= (0.36 + 9 \cdot 10^{-2}P) \text{ эВ}, \\ \varepsilon_A &= (-0.13 - 9 \cdot 10^{-2}P) \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (1)$$

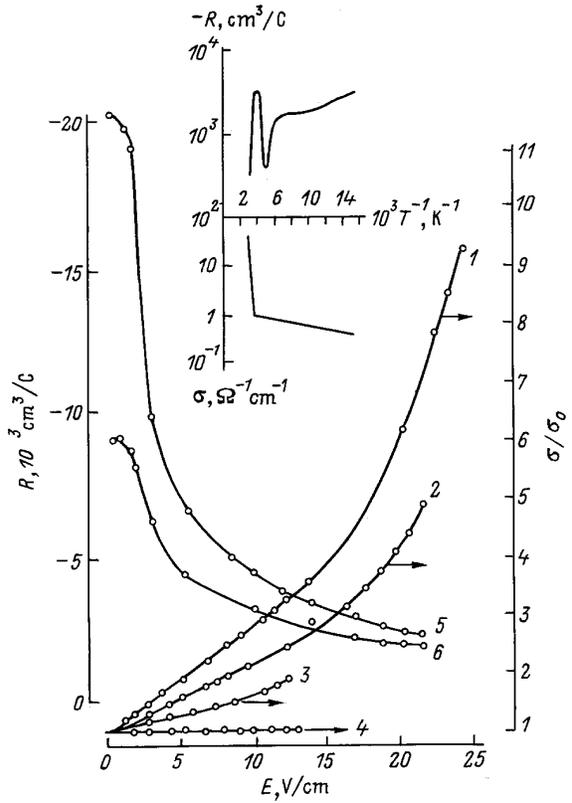
Здесь давление  $P$  — в единицах ГПа,  $\varepsilon_A$  — энергия глубокого акцепторного уровня (энергия отсчитывается вверх от невозмущенного края зоны проводимости).

Параметры образцов

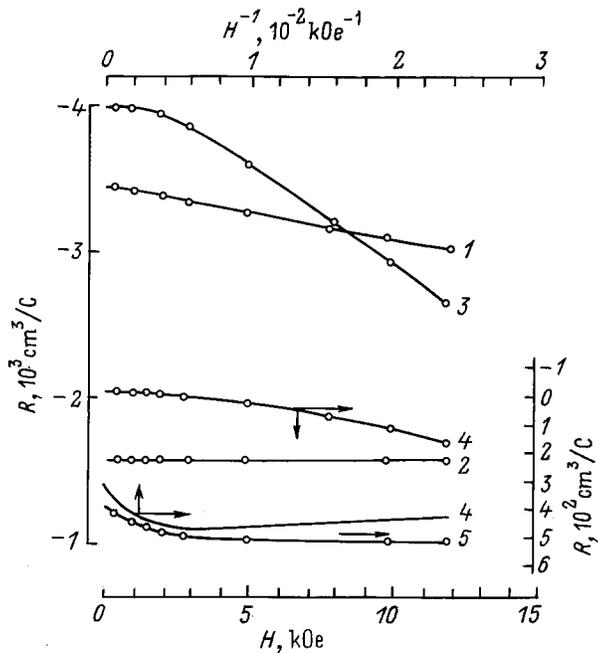
$T, \text{ К}$	Образец № 3									Образец № 4		
	$P, \text{ ГПа}$	$R_0, \text{ см}^3/\text{Кл}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ см}$	$p_A, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\mu_A, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{ с}$	$p_A/n$	$p_v/n$	$\mu_c/\mu_A$	$\mu_c/\mu_v$	$P, \text{ ГПа}$	$R_0, \text{ см}^3/\text{Кл}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ см}$
300	$10^{-4}$	−4000	1.67	1.84	95.5	$1.4 \cdot 10^2$	35.3	88.4	44.0	$10^{-4}$	−1800	1.53
	1.46	520	3.76	1.84	41.0	$1.4 \cdot 10^4$	3500	186	33	1.5	135	3.76
	$\infty$	931	5.81	1.84	10.2	$\infty$	$\infty$	0	0	1.5	135	3.76
77.6	$10^{-4}$	−3450	9.09	2.26	25.3	915	7	133	18.7	$10^{-4}$	−3340	4.92
	1.1	−1560	25	2.26	9.03	2570	19.8	179	9.0	1.17	−6432	45.64
	$\infty$	36000	200	2.26	0	$\infty$	$\infty$	0	0	1.17	−6432	45.64



**Рис. 1.** Зависимости коэффициента Холла в предельно слабом магнитном поле  $R_0$  (1,4), удельного сопротивления  $\rho$  (2,5), подвижности дырок акцепторной зоны  $\mu_A$  (3,6) и ширины запрещенной зоны  $\epsilon_g$  (7) при  $T = 77.6$  (1-3) и 300 К (4-7) от давления  $P$  в образце 3. Экспериментальные данные (значки и сплошные линии) получены при подъеме давления, штриховые линии — экстраполяция.



**Рис. 3.** Электрополевые зависимости нормализованной к атмосферному давлению удельной электропроводности  $\sigma/\sigma_0$  (1-4) и коэффициента Холла  $R$  (5,6) при  $T = 77.6$  К (1-3, 5, 6) и 300 К (4) в образце 4. Давление  $P$ , ГПа: 1, 5, 6 — 1.05; 2 — 0.67; 3 — 0.03; 4 — 1.42. Магнитное поле  $H$ , кЭ: 5 — 2, 6 — 15.



**Рис. 2.** Магнитополевые зависимости коэффициента Холла  $R$  в образце 3 при  $T = 77.6$  (1,2) и 300 К (3-5) при давлениях  $P$ , (ГПа): 1 — 0.4, 2 — 1.1, 3 —  $10^{-4}$ , 4 — 1.06, 5 — 1.4. Значки — эксперимент, сплошные линии — теория.

В образце 3 коэффициент заселенности акцепторной зоны  $K_A = (N_A - p_A)/N_A$  убывает от 0.19 до 0 с убыванием  $T$  от 300 до 77.6 К, а энергия Ферми изменяется как

$$\epsilon_F = (-0.17 - 9 \cdot 10^{-2}P) \text{ эВ.} \quad (2)$$

Таким образом в процессах переноса наряду с дырками валентной зоны принимают участие носители заряда глубокой акцепторной зоны. Положение уровня Ферми фиксировано относительно потолка валентной зоны статистикой дырок, так как  $n \ll p_A, p_V$  и энергетический промежуток между валентной и акцепторными зонами не зависит от давления. Полученные значения  $d\epsilon_g/dP$  и  $m_p/m_0 = 0.44$  согласуются с известными данными [9,12].

С понижением температуры случайные колебания потенциала возрастают и ниже 100 К достигают значений порядка расстояния от невозмущенного края зоны проводимости до уровня Ферми, "вмороженного" в акцепторную зону, т.е. формируется состояние типа сильно легированного полностью компенсированного полупроводника (СЛПКП) [4-6]. Концентрация электронов в этом случае при  $T \rightarrow 0$  стремится к конечной величине. Кроме того, различие в динамике локализации электронов зоны проводимости и дырок акцепторной зоны, наблюдаемое, например, в аналогичной ситуации

в  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub><Cu> [1,4–6], обуславливает заметный рост отношения  $\mu_c/\mu_A$  с убыванием температуры.

Итак, формирование состояния типа СЛПКП в квазибесщелевом полупроводнике естественно объясняет отрицательный знак  $R$  и аномальный характер зависимости  $R(T)$  при низких температурах (рис. 3) [8,9]. Подчеркнем, что точка зрения на природу необычной зависимости  $R(T)$  и  $R < 0$  при низких температурах в  $p$ -InAs, объясняющая эти явления образованием вырожденного поверхностного слоя  $n$ -типа с объемной концентрацией электронов порядка  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> [7–9], противоречит барическим зависимостям кинетических коэффициентов (рис. 1–3). Действительно, в этом случае инверсионный слой, обволакивая, согласно [8], всю поверхность образца, должен полностью шунтировать его объем, коэффициент Холла не должен зависеть от давления, а сопротивление  $\rho$  должно слабо (не более 50% на 1 ГПа) возрастать. В заключение отметим актуальность предлагаемых модельных представлений, поскольку игнорирование влияния случайного потенциала, приводящего к формированию состояния типа СЛПКП в квазищелевом полупроводнике при обсуждении результатов эксперимента типично [7,11,13].

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку (проект 97-02-16545).

## Список литературы

- [1] М.И. Даунов, А.Б. Магомедов, В.И. Данилов. ФТП, **25**, 467 (1991).
- [2] М.И. Даунов, А.Б. Магомедов, В.И. Данилов. УФЖ, **37**, 103 (1992).
- [3] М.И. Даунов, К.М. Алиев, В.И. Данилов. УФЖ, **38**, 1811 (1993).
- [4] И.К. Камиллов, М.И. Даунов, В.А. Елизаров, А.Б. Магомедов. ЖЭТФ, **104**, 2436 (1993).
- [5] М.И. Даунов, И.К. Камиллов, А.Б. Магомедов. ЖЭТФ, **111**, 562 (1997).
- [6] М.И. Даунов, И.К. Камиллов, В.А. Елизаров, А.Б. Магомедов, В.И. Данилов. Докл. РАН, **357**, 612 (1997); Тез. докл. III Всеросс. конф. по физике полупроводников, **227** (1997).
- [7] I.M. Tsdilkovski, G.I. Narus, N.G. Shelushinina. Adv. Phys., **34**, 43 (1985).
- [8] В.В. Воронков, Е.В. Соловьева, М.И. Иглицин, М.Н. Пивоваров. ФТП, **2**, 1800 (1968).
- [9] О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп* (М., Мир, 1967).
- [10] В.В. Попов, М.Л. Шубников, С.С. Шалыт, В.В. Косарев. ФТП, **11**, 1914 (1977).
- [11] В.В. Косарев, Р.Р. Парфеньев, В.В. Попов, С.С. Шалыт. ФТТ, **18**, 489 (1976).
- [12] А. Плиткас, А. Крокус, Л.А. Балагуров, Э.М. Омеляновский. ФТП, **14**, 2123 (1980).
- [13] С.Г. Гасанзаде, Е.А. Сальков, Г.А. Шепельский. ФТП, **31**, 35 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

## Quasi-gapless semiconductor $p$ -InAs

M.I. Danilov, I.K. Kamilov, A.B. Magomedov,  
A.Sh. Kirakosjan

Institute of Physics of Daghestan Science Center,  
Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** We use data on the pressure up to  $P = 1.5$  GPa and field dependences up to  $H = 12$  kOe and  $E = 25$  V/cm of the Hall coefficient and the resistivity at 77.6 K and 300 K in  $p$ -InAs with the excess-acceptor densities  $N_{\text{ext}} = N_A - N_D \approx 10^{16}$  cm<sup>-3</sup> and  $N_A/N_D \approx 0.9$  to calculate the effective characteristics of charge carriers. It is shown that at the tail of the density of states, the conduction band has a deep acceptor band. A modification of the model of a heavily-doped, completely compensated semiconductor is realized in  $p$ -InAs at low temperature.

E-mail: kamilov@sinol.ru