

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ЛЕГИРОВАННЫЙ ТЕЛЛУРОМ И СЕЛЕНОМ $n\text{-GaAs}_{1-x}P_x$

И. Ф. СВИРИДОВ

Одесский институт народного хозяйства

(Поступила в редакцию 17 октября 1983 г.)

На примере тройного соединения $\text{GaAs}_{1-x}P_x$ n -типа с донорной примесью теллура и селена рассмотрено влияние гидростатического давления и температуры на удельное сопротивление и коэффициент Холла. На основании полученных данных определены концентрации и подвижности электронов в минимумах (000) и (100) зоны проводимости при различных давлениях и температурах, а также энергетический зазор между этими минимумами и его зависимость от температуры и давления.

Исследование коэффициента Холла и удельного сопротивления в полупроводниках в зависимости от высокого давления при различных температурах представляет значительный интерес для физики полупроводников. Такие совместные измерения постоянной Холла и электропроводности при различных давлениях и температурах позволяют получить достаточно надежную информацию об изменении концентрации носителей тока, ширины запрещенной зоны в зависимости от давления, а также высказывать определенные суждения о некоторых особенностях зонной структуры исследуемых образцов.

Как известно, примеси определяют многие существенные свойства полупроводникового материала. Обычно рассматривают только те состояния примесного центра, которые связаны с абсолютным минимумом зоны проводимости или с абсолютным максимумом валентной зоны, поскольку эти состояния оказываются, как правило, наинизшими по энергии и определяют концентрацию свободных носителей тока при заданной температуре. Поэтому естественно, что в большинстве экспериментов проявляются только те примесные состояния, которые связаны с абсолютным экстремумом зоны проводимости.

До настоящего времени поведение твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x}P_x$ при высоком давлении исследовалось лишь путем измерения зависимости удельного сопротивления от давления [1, 2].

В настоящей работе на образцах $\text{GaAs}_{1-x}P_x$ кроме измерений удельного сопротивления ρ проведены также измерения зависимости коэффициента Холла R_H от гидростатического давления в интервале температур 80—400 К, что позволило существенно сократить количество дополнительных предположений при расчетах [1]. На основе измерений зависимости ρ и R_H от давления были определены концентрации и подвижности электронов в минимумах (000) и (100) зоны проводимости, а также энергетиче-

ческий зазор между минимумами и его зависимость от температуры и давления.

Исследовались компенсированные твердые растворы $GaAs_{0,76}P_{0,24}$ и $GaAs_{0,43}P_{0,57}$ n -типа с донорной примесью теллура и селена при давлении до 15 кбар в интервале температур 80—400 К. Параметры исследованных кристаллов при 300 К и атмосферном давлении приведены в табл. 1. Все измерения проводились в камере высокого давления из термообработанной бериллиевой бронзы [3]. Измерения эффекта Холла и сопротивления проводились методом Ван-дер-Паува [4].

Таблица 1
Основные характеристики изучаемых образцов $n-GaAs_{1-x}P_x$ при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Образец	Состав x	Примесь (донор)	$n_{300\text{ К}}, \text{ см}^{-3}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1А	0,24	Te	$4,5 \cdot 10^{17}$	570
3Б	0,57	Se	$1,5 \cdot 10^{13}$	512

Согласно работе [5] полагали, что изменение объема образца при давлении до 15 кбар составляет не более 2%, следовательно, изменением формы кристалла при гидростатическом сжатии можно было пренебречь; тогда $R(P)/R(0) \equiv \rho(P)/\rho(0)$.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости ρ и R_H от давления для образцов $GaAs_{0,76}P_{0,24}$ (Te) (далее образец серии 1А) и $GaAs_{0,43}P_{0,57}$ (Se) (далее образец серии 3Б) n -типа проводимости при различных температурах. Как видно на рис. 1 и 2, при 80 и 196 К с ростом давления ρ возрастает, достигая максимума в интервале 2,8—4 кбар для образца 1А и в интервале 3,5—4,2 кбар для образца 3Б. Максимумы ρ уменьшаются при увеличении температуры до 400 К и смещаются в область высоких давлений. При 80 и 196 К коэффициент Холла для обоих образцов вначале растет с давлением, достигая максимума вблизи 2,6 кбар, а при 296 и 400 К максимумы исчезают и в области давлений от 2,6 до 7 кбар R_H быстро уменьшается. Далее с увеличением давления вплоть до 15 кбар постоянная Холла медленно уменьшается и почти достигает постоянного значения во всем изученном интервале температур, не превышающих 400 К.

На рис. 3 изображен график зависимости эффективной подвижности электронов μ^* в образцах n -типа $GaAs_{1-x}P_x$ от давления для двух температур: 80 К (зависимости 1) и 296 К (зависимости 3). Другие зависимости имеют аналогичный ход и отличаются только тангенсом угла наклона. Из этого рисунка следует, что μ^* уменьшается с ростом давления при всех температурах.

Наблюдаемые нами изменения ρ , R_H , μ^* в области температур от 296 до 400 К, возможно, сопоставимы с зонной структурой $GaAs_{1-x}P_x$ и могут быть объяснены в предположении, что в области давлений до 5 кбар, где наиболее сильно возрастает ρ , имеет место переход от проводимости по двум минимумам (000) и (100) к проводимости в минимуме (100).

Согласно [2] энергетический зазор ΔE_{12} между минимумами (000) и (100) зоны проводимости $GaAs_{1-x}P_x$ с ростом давления уменьшается и электроны переходят в вышележащий минимум (100), где электроны имеют более низкую подвижность, чем в минимуме (000).

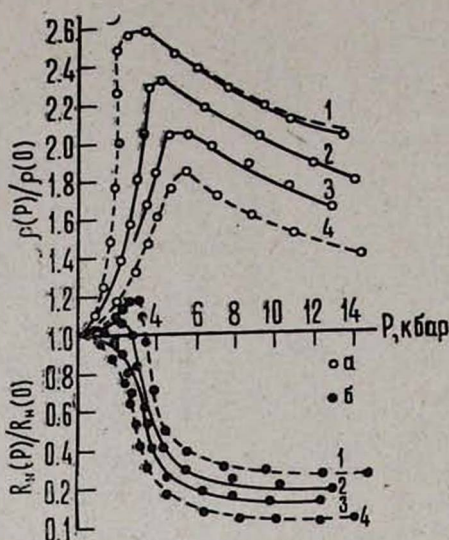


Рис. 1.

Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) образца серии 1А от давления при различных температурах: 1—80; 2—196; 3—296; 4—400 К (кружки—экспериментальные результаты, штриховые кривые построены на основе формул (1) и (2)).

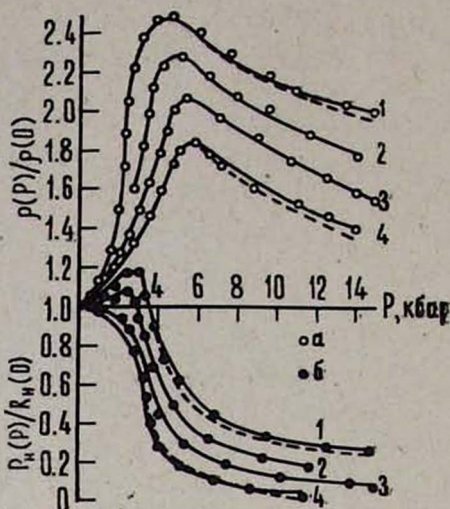


Рис. 2.

Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) образца серии 3Б от давления при различных температурах: 1—80; 2—196; 3—296; 4—400 К (кружки—экспериментальные данные, штриховые линии построены на основе формул (1) и (2)).

В рассмотренной области температур (296—400 К) R_H и μ^* быстро уменьшаются при давлении, равном 2,6 кбар, а выше 7 кбар постоянная Холла слабо падает, подвижность становится почти постоянной и равной

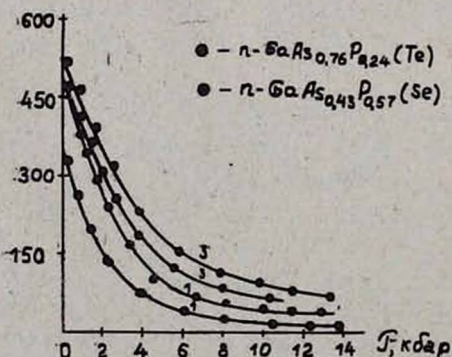


Рис. 3. Зависимость эффективной подвижности электронов в образцах $n-GaAs_{1-x}P_x$ от давления при различных температурах: 1—80; 3—296 К.

в среднем $\mu^* = 38 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для образца 1А и $\mu^* = 32 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для образца 3Б. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что проводимость осуществляется только электронами в минимуме (100).

Концентрация n_2 электронов в минимуме (100) при температуре 296 К и давлении в 5 кбар для обоих образцов равна соответственно $4,5 \cdot 10^{17}$ и $1,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. При этом считалось, что при комнатной температуре практически все донорные центры ионизированы и суммарная концентрация носителей тока $n = n_1 + n_2$ в минимумах (000) и (100) зоны проводимости постоянна и равна $4,5 \cdot 10^{17}$ и $1,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ соответственно для образцов 1А и 3Б. Зная $n = n_1 + n_2$ и μ_2 , можно посчитать n_1 , n_2 и μ_1 при различных давлениях и температурах.

При 80 и 196 К ρ возрастает значительно быстрее с давлением, чем при температурах 296 и 400 К, и достигает максимума в интервале 3—5 кбар, R_H имеет максимум при $P = 2$ —3 кбар (см. рис. 1 и 2), а μ^* при 80 и 196 К монотонно убывает и достигает постоянной величины $\mu^* = 22$ см 2 /В·с для образца 1А и $\mu^* = 18$ см 2 /В·с для образца 3Б.

Таблица 2
Расчетные характеристики исследуемых образцов $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

Образец	x	T, K	$\mu_2, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$\Delta E_{12}(0), \text{эВ}$	$b = \frac{\mu_1}{\mu_2}$	$\gamma = \frac{n_2}{n_1}$	$\frac{d\Delta E_{12}}{dP}, \text{эВ/кбар}$
1А	0,24	80	20	0,045	29	7,2	{ 12·10 $^{-3}$
		196	23	0,067	22	—	
		296	30	0,071	19	5,6	
		400	45	0,079	18	4,8	
3Б	0,57	80	15	0,029	21	—	{ 10·10 $^{-3}$
		196	20	0,041	19	0,85	
		296	29	0,055	18	3,30	
		400	35	0,058	16	5,31	

При 80 и 196 К, как и при температурах 296 и 400 К, мы считаем, что в точках максимума ρ все электроны находятся в минимуме (100). Однако суммарную концентрацию $n = n_1 + n_2$ нельзя считать не зависящей от давления, так как при температурах от 80 до 196 К донорные уровни в образцах ионизированы частично. Уменьшение сопротивления с давлением от 3 до 5 кбар (см. рис. 1 и 2) соответствует уменьшению энергетического зазора между донорными уровнями Te , Se и дном минимума (100) с коэффициентом $-0,7 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар для образца серии 1А и с коэффициентом $-0,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар для образца серии 3Б.

Согласно работе [6] минимум (100) зоны проводимости в GaP понижается с ростом давления с коэффициентом $-1,1 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар. Различия этих коэффициентов можно объяснить тем, что донорные уровни Te и Se с ростом давления также приближаются к валентной зоне с коэффициентами $-0,4 \cdot 10^{-3}$ и $-0,6 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар для наших образцов.

Зная зависимость $\rho(P)$ и $n = n_1 + n_2$, мы определили n_1 , n_2 и μ_1 при разных значениях давления и температуры. При этом мы воспользовались формулами для удельного сопротивления и коэффициента Холла в случае проводимости по двум зонам:

$$\frac{\rho(P)}{\rho(0)} = \frac{b + \gamma \frac{1 + \gamma \exp(\gamma P/kT)}{1 + \gamma b + \gamma \exp(\gamma P/kT)}}{1 + \gamma b + \gamma \exp(\gamma P/kT)}, \quad (1)$$

$$R_H = [(1 + \nu)/en] [(b^2 + \nu)/(b + \nu)^2], \quad (2)$$

где $b = \frac{\mu_1}{\mu_2}$, $\nu = b \exp(-\Delta E_{12}(0)/kT) = n_2(0)/n_1(0)$, e — заряд электрона, T — абсолютная температура (К), P — давление (кбар), k — постоянная Больцмана, γ — барический коэффициент энергетического зазора между минимумами (000) и (100) зоны проводимости $GaAs_{1-x}P_x$.

Выражение (1) позволяет определить величину барического коэффициента. Найденная таким образом величина $d\Delta E_{12}/dP$ для исследуемых образцов составляет $12 \cdot 10^{-3}$ и $10 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар и находится в хорошем согласии с данными других работ [6, 7].

С использованием найденных нами барических коэффициентов для образцов серий 1А и 3Б была проведена теоретическая оценка зависимостей $\rho(P)$ и $R_H(P)$ при разных температурах и сравнена с экспериментальными данными. На рис. 1 и 2 показано сравнение расчетных кривых с экспериментом (кружки — экспериментальные данные, штриховые кривые — результаты расчета по формулам (1) и (2)). Из сравнения видно, что для образца серии 1А получено хорошее согласие теории с экспериментом для всего диапазона давлений и температур, а для образца серии 3Б — до 5,5 кбар при 80 и 400 К.

В расчетах учитывалось, что энергетический зазор ΔE_{12} между минимумами (000) и (100) зоны проводимости $GaAs_{1-x}P_x$ при возрастании давления и температуры уменьшается:

$$\Delta E_{12}(P, T) = \Delta E_{12}(0) - \left(\frac{d\Delta E_{12}}{dT} \right)_P T - \left(\frac{d\Delta E_{12}}{dP} \right)_T P,$$

где $d\Delta E_{12}/dT = 0,4 \cdot 10^{-4}$ эВ/К [1], $\Delta E_{12} = 0,36 - 0,8x + (6 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ эВ [8], x — состав (см. табл. 1). Все расчетные величины исследуемых образцов приведены в табл. 2.

Таким образом, совместное измерение удельного сопротивления и коэффициента Холла под давлением в широком интервале температур позволяет получить достаточно надежную информацию об изменении концентрации носителей тока, ширины запрещенной зоны в зависимости от давления, а также высказать определенные суждения о некоторых особенностях зонной структуры исследуемого полупроводникового материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fenner G. E. Phys. Rev., 134A, 1113, (1964).
2. Craford M. G. et al. Phys. Rev., 168, 867 (1968).
3. Свиридов И. Ф. и др. Изв. вузов, Физика, № 1, 124 (1972).
4. Van der Pauw L. J. Phil. Res. Rep., 13, 1 (1958).
5. Свиридов И. Ф., Преснов В. А. ФТП, 9, 445 (1975).
6. Zallen R., Paul W. Phys. Rev., 134A, 1628 (1964).
7. Лихнер А. И., Пель Э. Г. ФТП, 5, 1725 (1971).
8. Юрова Е. С. ФТП, 6, 2093 (1972).

ՀԵՇՄԱՆ ԵՎ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ
ՏԵԼԼՈՒՐՈՎ ԵՎ ՍԵԼԵՆՈՎ ԼԵԳԻՐԱՑՎԱԾ $n\text{-GaAs}_{1-x}P_x$ -Ի ՎՐԱ

Ի. Ֆ. ՍՎԻՐԻԴՈՎ

Դիտարկված է հիդրոստատիկ ճնշման և շերմաստիճանի ազդեցությունը տեղյութի և սելենի զոնորային խառնուրդներով եռակի n -տիպի $\text{GaAs}_{1-x}P_x$ միացության տեսակարար դիմադրության և λ_{00} ի զործակցի վրա: Որոշված են էլեկտրոնների խտությունը և շարժունակությունը հաղորդականության զոնայի (000) և (100) մինիմումներում, ինչպես նաև էներգետիկ բացվածքը նշված մինիմումների արանքում զանազան շերմաստիճանների և ճնշումների դեպքում:

THE INFLUENCE OF HYDROSTATIC PRESSURE AND TEMPERATURE ON T_e AND S_e DOPED n -TYPE $\text{GaAs}_{1-x}P_x$

I. F. SVIRIDOV

The dependence of resistivity and of Hall coefficient on the pressure up to 15 kbar and temperatures ranging from 80 to 400 K has been studied for n -type $\text{GaAs}_{1-x}P_x$ samples with T_e and S_e donor impurities. On the basis of these data the concentration and mobility of electrons in (000) and (100) minima of the conduction band were obtained at different pressures and temperatures as well as the energy gap between these minima and its temperature and pressure dependences were determined.