

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ n -GaAs

И. Ф. СВИРИДОВ, В. А. ПРЕСНОВ

В работе проведены измерения электропроводности и постоянной Холла на образцах n -GaAs под гидростатическим давлением до 77 кбар при комнатной температуре. По результатам измерений σ и R_H обсуждается изменение подвижности электронов, связанное с изменением величины энергетического зазора между минимумами (000) и (100) зоны проводимости с различными плотностями состояний.

Измерения постоянной Холла и электропроводности при высоких давлениях представляют существенный интерес физики полупроводниковых кристаллов.

Совместные измерения постоянной Холла R_H и электропроводности σ при различных давлениях позволяют получить достаточно надежную информацию об изменении подвижностей носителей тока, ширины запрещенной зоны в зависимости от давления, а также высказать определенные суждения о некоторых особенностях зонной структуры исследуемых полупроводников.

Объектом исследования были образцы n -GaAs. Исходные параметры приведены в таблице. Все измерения были проведены при комнатной температуре. Омические контакты создавались согласно работе [1]. Рабочее давление в камере высокого давления создавалось по

Таблица
Характеристика некоторых данных
исследуемых образцов n -GaAs

№ п/п	n , (см ⁻³)	μ_0 , см ² /в·сек
1	$3,5 \cdot 10^{14}$	6250
2	$1,7 \cdot 10^{14}$	7350
3	$6,25 \cdot 10^{15}$	6900
4	$2,7 \cdot 10^{15}$	7050

аналогичной методике, описанной в работе [2], до 77 кбар. Катушка вокруг закаленной стальной рабочей камеры обеспечивала действующее магнитное поле, равное 6,25 кэ, при зазоре между полюсами в 1,35 мм. Образцы имели ориентацию $\langle 000 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$. Образцы (шайбы) были диаметром 2 мм и толщиной 0,25 мм. Манометры были проградуированы при помощи переходов висмута I—II и III—I при 25,4 кбар [3] и 77 кбар [4].

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента Холла R_H и удельного сопротивления ρ от давления для нескольких образцов, которые показывают, что имеет место переход электронов из минимума Γ_1 на

вышележащий минимум X_1 , в котором подвижность электронов значительно меньше.

С другой стороны, отметим, что $R_H(P)/R_H(0)$ при 50 кбар вследствие полного перехода электронов из Γ_1 на X_1 не будет соответствовать единице.

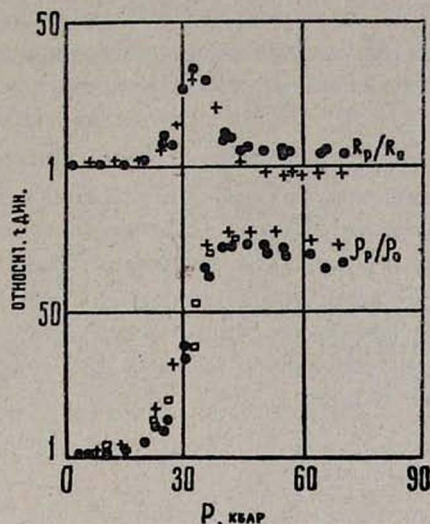


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_H от гидростатического давления P при $T=296^\circ\text{K}$ для образцов n -GaAs с концентрацией электронов $n=10^{14}-10^{18}\text{ см}^{-3}$. $\bullet$ — $n=10^{14}\text{ см}^{-3}$, $+$ — $n=10^{15}\text{ см}^{-3}$, $\square$ — экспериментальные данные [11].

Для приведения результатов в соответствие запишем уравнение нейтральности

$$N_D - N_A = \sum_i n_i + n_d, \quad (1)$$

где i относится к Γ_1 и X_1 состояниям, N_D , N_A — числа доноров и акцепторов, n_d — число электронов на донорных уровнях,

$$n_d = \frac{N_d}{1 + \frac{1}{\sum g_i e^{(E_F - E_i)/kT}}}; \quad (2)$$

здесь g_i — вырождение в различных минимумах, E_F , E_i — энергии Ферми и примесного уровня соответственно.

Кроме того,

$$n_i = N_i F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_i}{kT} \right), \quad (3)$$

где N_i — плотность состояний.

Для образцов с малой концентрацией носителей тока, уровень Ферми которых находится гораздо ниже Γ_1 минимума, можно записать

$$\frac{n_r}{n_x} = \frac{N_r}{N_x} e^{\frac{\Delta E(x-r)}{kT}}, \quad (4)$$

но для образцов, где $N_D - N_A > 10^{17} \text{ см}^{-3}$, статистика Ферми не применима. Барический коэффициент энергии подзон был определен из кривой наклона удельного сопротивления при 30 кбар и равен $12 \cdot 10^{-6} \text{ эв/бар}$.

Скорость изменения подвижности носителей заряда была взята из работы Коннезлса [5] как линейная экстраполяция значений для всех концентраций. Это является приближением, так как для высокопримесных образцов $n \simeq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ рассеяние на колебаниях решетки должно преобладать над рассеянием на ионах примеси, $\mu_n \propto m_a^{*2}$. Если учесть это при вычислениях, то для таких концентраций носителей тока истинные значения не должны отклоняться более чем на 3% от значений, вычисленных с помощью линейной экстраполяции при 40 кбар. Незначительное расхождение, по-видимому, является следствием преобладания электронов проводимости минимума (100).

На основе экспериментальных данных для удельного сопротивления и коэффициента Холла

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = n_x e \left(\frac{n_r}{n_x} \mu_r + \mu_x \right), \quad (5)$$

$$R_H = e \frac{n_r \mu_r^2 + n_x \mu_x^2}{\sigma^2},$$

были определены значения n_r и n_x , которые приведены на рис. 2; при этом подвижности электронов μ_x брались постоянными до $330 \text{ см}^2/\text{в.сек.}$

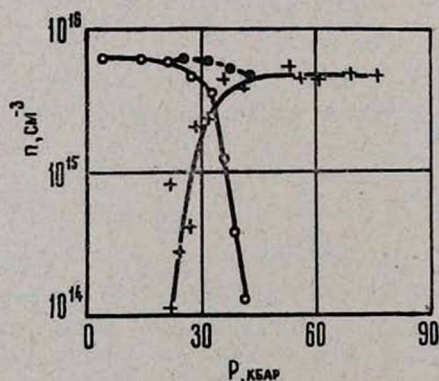


Рис. 2. Вычисленные значения количества электронов в Γ_1 и X_1 минимумах зоны проводимости в зависимости от давления P при $T=296^\circ\text{K}$ для образцов $n\text{-GaAs}$ с концентрацией электронов носителей тока как и на рис. 1

○ — n_r , + — n_x , ● — $n_r + n_x$.

Подвижность вычисляется из электропроводности в том же приближении, что и холловская подвижность, и ошибка не должна быть более 10%, так как параметр рассеяния $r = \mu^H/\mu^s$ должен быть почти равным 1 в минимуме Γ_1 с высокой подвижностью, и не больше 1,2 для минимума X_1 , если преобладает внутреннее рассеяние.

Этот коэффициент, зависящий от отношения эффективных масс $(\mu_{||}/\mu_{\perp})$ в эллипсоидальном минимуме, аналогичен для Ge и Si и составляет ≈ 0.8 [6].

Если r взять равным единице, изменение подвижности в этом случае можно записать с помощью упрощенного уравнения для подвижности

$$\mu^H = \frac{\left[\frac{n_{\Gamma}}{n_X} + \left(\frac{\mu_X}{\mu_{\Gamma}} \right)^2 \right] \cdot \mu_{\Gamma}}{\frac{n_{\Gamma}}{n_X} + \frac{\mu_X}{\mu_{\Gamma}}} \quad (6)$$

Теоретические и экспериментальные значения подвижностей изображены рис. 3, из которого видно, что они различаются там, где использованы два смежных параметра $\Delta E_{(x-\Gamma)}$ при атмосферном давлении и отношении плотностей состояний N_X/N_{Γ} при $P=0$.

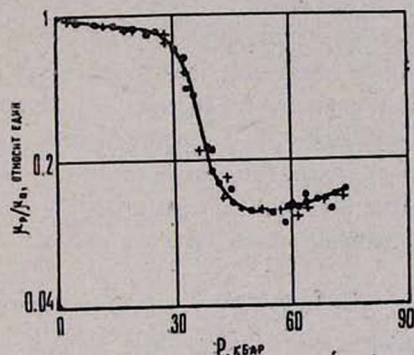


Рис. 3.

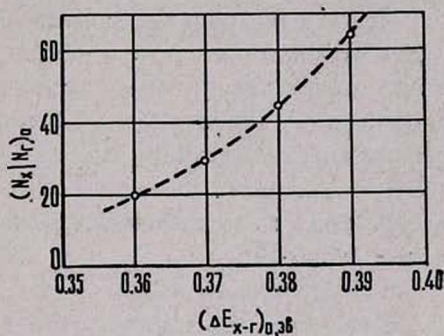


Рис. 4.

Рис. 3. Зависимость экспериментальной и теоретической подвижностей электронов образцов n-GaAs от давления при $T=296^\circ\text{K}$. — $\circ$ — теория,

• + — эксперимент.

Рис. 4. Зависимость отношения плотностей состояний $(N_X/N_{\Gamma})_{P=0}$ при высоком давлении P от изменения энергетического зазора $(\Delta E_{x-\Gamma})_{P=0}$ между Γ_1 и X_1 минимумами зоны проводимости при $T=296^\circ\text{K}$.

На рис. 4 показано отношение плотностей состояний $(N_X/N_{\Gamma})_{P=0}$ в зависимости от изменения энергетического зазора $(\Delta E_{(x-\Gamma)})_{P=0}$ при $T=298^\circ\text{K}$. Из рисунка следует, что для энергетического зазора между минимумами Γ_1 и X_1 , равного 0,38 эВ, требуется отношение плотностей состояний, равное 45, т.е. эффективная масса электронов равна $m_x^* = 0,4 m_0$ в минимуме X_1 и $m_{\Gamma}^* = 0,67 m_0$ в минимуме Γ_1 , что находится в удовлетворительном согласии с известными ранее данными [7].

С помощью теории Херринга-Брукса (Х-Б) [8] была сделана попытка подобрать нужный механизм рассеяния к нашим экспериментальным данным, где для μ_T были использованы измеренные постоянные значения, равные 375 и 350 $\text{см}^2/\text{в.сек}$ (см. рис. 5), и

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_i} \quad (7)$$

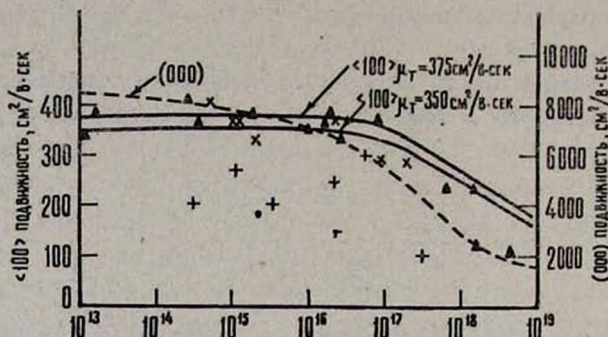


Рис. 5. Зависимость подвижности носителей тока в X_1 минимуме образцов n -GaAs от их концентраций под давлением при $T=296^\circ\text{K}$. $\times$ Δ — экспериментальные данные работ [10–12], $+$ — наши, сплошные линии — рассчитанные по теории Х-Б.

Такое согласование показывает, что выражение (7) является хорошим приближением, хотя теория предсказывает более высокое значение подвижности, чем экспериментальное, в диапазоне высоких концентраций. Однако рассеяние по теории Х-Б может быть единственным приближением, так как предполагается, что примеси рассеивают электроны незначительно. При высоких концентрациях носителей заряда может также играть важную роль рассеяние на примесных парах [9].

Расчеты подтверждают, что если учитывать отмеченные в работе [9] факторы при определении подвижностей носителей заряда, теоретические кривые понижаются и лучше согласуются с экспериментальными. Взятые нами величины подвижностей $\mu_T = 375$ и $350 \text{ см}^2/\text{в.сек}$ являются более высокими, чем ранее предсказываемые в работах [10–12] в диапазоне между 110 и $230 \text{ см}^2/\text{в.сек}$. Полученные нами величины подвижностей с учетом вышеуказанных факторов составляют около 155 – $260 \text{ см}^2/\text{в.сек}$ и указывают на неоднородность исследуемых образцов.

Таким образом, совместное измерение коэффициентов Холла и удельного сопротивления под давлением позволяет вычислить концентрации, подвижности носителей тока и энергетический зазор между минимумами $\Delta E_{\text{х-г}}$.

Одесский госуниверситет
им. И. И. Мечникова

Поступила 20.III.1972,
после переработки 11.X.1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л. Н. Конопля, А. Ф. Кравченко, В. С. Сироткина. ПТЭ, 3, 186 (1965).
2. И. Ф. Свиридов, В. А. Преснов и др. Изв. вузов СССР, Физика, 1, 124 (1972).
3. G. C. Kennedy, P. W. LaMori. Progress in Very High Pressure Research, (N. York), 304 (1960).
4. W. Klement, A. Javaraman, G. C. Kennedy. Phys. Rev., 131, 632 (1963).
5. G. A. N. Connell. High Temp. High Press., 1, 177 (1969).
6. C. Herring. Bell Syst. Tech. J., 34, 237 (1955).
7. R. A. Stradling, R. A. Wood. J. of Physics. C. (Proc. Phys. Soc.), Ser. 2, 1; 171 (1968).
8. H. Brooks. Adv. in Electron and Electron Phys., 7, 87 (1955).
9. E. J. Moore. Phys. Rev., 160, 618 (1967).
10. E. M. Conwell, M. O. Vassell. Phys. Rev., 166, 767 (1968).
11. A. R. Hutson, A. Javaraman, A. S. Coriell. Phys. Rev., 155, 786 (1967).
12. W. P. Wasse, J. Lees, G. Ktn. Solid State Electron, 9, 601 (1966).

ՄԵՆ ՃՆՇՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ n -GaAs-ի ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ
ՇԱՐԺՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ի. Ֆ. ՍՎԻՐԻԴՈՎ, Վ. Ա. ՊՐԵՍՆՈՎ

Աշխատանքում կատարված են n -GaAs-ի էլեկտրահաղորդականության (σ) և Հոլլի հաստատունի (R_H) չափումներ սենյակի ջերմաստիճանի և մինչև 77 կբար ճնշման դեպքում:

Ճնշման տակ (R_H)-ի և σ -ի չափումների հիման վրա քննարկվում է էլեկտրոնների շարժունակության փոփոխությունը, որը կապված է վիճակների տարբեր խտությունների դեպքում հաղորդականության զոնայի ենթազոնաների միջև եղած էներգետիկ ճեղքի մեծության փոփոխության հետ:

EFFECT OF HIGH HYDROSTATIC PRESSURE ON THE
MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN n -TYPE GaAs

I. F. SVIRIDOV, V. A. PRESNOV

Measurements of conductivity σ and Hall constant R_H of n -type GaAs under hydrostatic pressures up to 77 kbar at room temperature were performed.

The variation of an electron mobility due to the changes in an energy gap between subbands of conduction band of different state densities is discussed.