

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МАГНИТОПРОВОДИМОСТЬ СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЯ *n*- ТИПА

А.Н.Ионов, И.С.Шлимак

Экспериментально обнаружена зависимость величины магнитопроводимости в *n*-Ge от интенсивности процессов переброса электрона из одной долины в другую. Показано, что анизотропия магнитопроводимости обусловлена анизотропией коэффициента диффузии.

В работах<sup>1,2</sup> приведена теория, объясняющая аномальную магнитопроводимость  $\Delta\sigma(H) = \sigma(H) - \sigma(0)$  в полупроводниках с металлическим характером проводимости на основе учета влияния квантовых поправок к кинетическим коэффициентам. Из теории следует, что в трехмерном случае:

$$\Delta\sigma(H) = \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} f\left(\frac{4DeH}{\hbar c} \tau_\varphi\right) \left(\frac{eH}{\hbar c}\right)^{1/2} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0,605 & x \gg 1 \\ x^{3/2}/48 & x \ll 1 \end{cases}$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $H$  – магнитное поле,  $\tau_\varphi$  – время релаксации фазы волновой функции из-за неупругих столкновений. Остальные обозначения общепринятые. Из (1) видно, что в магнитном поле, где  $x \ll 1$  величина  $\Delta\sigma$  тем больше, чем больше  $D$ . В случае многодолинных полупроводников, если можно пренебречь процессами переброса электронов из одной долины в другую, вклады различных долин в магнитопроводимость будут аддитивны, т.е.

$$\Delta\sigma(H) = \sum_i \Delta\sigma_{\alpha,\beta}^i(H)$$

$$\Delta\sigma_{\alpha,\beta} = \frac{D_{\alpha,\beta}}{D_a} \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \left(\frac{eH}{\hbar c} \frac{D_c}{D_a}\right)^{1/2} f\left(\frac{4D_c eH}{\hbar c} \tau_\varphi\right) \quad (2)$$

(суммирование производится по неэквивалентным эллипсоидам), где  $D_c^2 = D_\perp (D_\perp \cos^2\theta + D_\parallel \sin^2\theta)^{-1}$ ,  $\theta$  – угол между осью эллипсоида и магнитным полем,  $D_{\alpha,\beta}$  – тензор коэффициента диффузии,  $D_a = (D_\parallel D_\perp^2)^{1/3}$ .

Таким образом, в отсутствие процессов переброса  $\Delta\sigma(H)$  величина анизотропная. В том случае, когда процессы переброса интенсивны, вклад разных долин сводится к одной долине с усредненным коэффициентом диффузии и вследствие этого  $\Delta\sigma(H)$  будет изотропна.

С целью проверки выводов теории нами исследована магнитопроводимость *n*-Ge легированного различными донорными примесями – As и Sb как в отсутствие давления, так и в условиях упругого одноосного сжатия ( $\chi$ ) вдоль оси [111]. Как известно, в *n*-Ge имеются четыре неэквивалентных эллипсоида в направлениях [111]. Выбор примесей обусловлен разной интенсивностью междолинных перебросов: в случае примеси As для донорного электрона велико значение  $|\Psi(0)|^2$ , что обуславливает высокую интенсивность междолинных переходов. Концентрация примесей была  $N_{As} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $N_{Sb} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что в силу разной величины боровского радиуса ( $a_{As} = 40 \text{ \AA}$ ,  $a_{Sb} = 60 \text{ \AA}$ ) соответствует примерно одинаковому уровню легирования, определяемому параметром  $Na^3$ . Образцы специально не компенсировались и были ориентированы своей длинной гранью вдоль направления [111]. Процессы переброса из долины в долину в магнитопроводимости можно не учитывать, если выполняется следующее условие<sup>1</sup>:

$$4eD_{\parallel,\perp} H \tau_\varphi / \hbar c \gg 1, \quad (3)$$

<sup>1</sup>) В<sup>1</sup> в выражении для  $D_c$  допущена ошибка:  $D_\perp$  и  $D_\parallel$ , стоящие в скобке, следует поменять местами.

где  $D_{\parallel, \perp}$  — коэффициент диффузии электронов в направлении вдоль ( $\parallel$ ) или поперек ( $\perp$ ) большой оси эллипсоида,  $\tau_v$  — время релаксации междолинных переходов. В нашем случае  $\tau_v \sim 3 \cdot 10^{13}$  сек и  $\tau_v \sim 4 \cdot 10^{11}$  сек для  $\text{Ge} < \text{As} >$  и  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  соответственно<sup>3</sup>. Полагая коэффициент анизотропии  $K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel} \approx 5^4$  (где  $\mu_{\perp, \parallel}$  — поперечная и продольная подвижности), получим  $D_{\parallel} \approx 7 \text{ см}^2/\text{сек}$  для As и  $D_{\parallel} \approx 10 \text{ см}^2/\text{сек}$  для Sb. Подставив эти значения получим, что критерий (3) для Sb выполняется уже при  $H \geq 0,5 \text{ кЭ}$ , в то время как для As только при  $H \geq 20 \text{ кЭ}$ . Таким образом, в полях порядка нескольких кЭ в случае  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  можно пренебречь междолинным рассеянием, а в случае  $\text{Ge} < \text{As} >$  — нельзя. Это означает, что в условиях отсутствия одноосного сжатия: 1) для  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  вклад четырех эллипсоидов в величину магнитопроводимости будет суммироваться, т.е. при фиксированных температуре и магнитном поле  $\Delta\sigma$  образца  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  будет больше, чем у образца  $\text{Ge} < \text{As} >$ ; 2) для  $\text{Ge} < \text{As} >$  должна наблюдаться изотропная магнитопроводимость, в отличие от случая  $\text{Ge} < \text{Sb} >$ , где анизотропия  $\Delta\sigma(H)$  экспериментально наблюдалась (например в<sup>2</sup>). Оба этих вывода были подтверждены нами на опыте. Из рис. 1 видно, что для образцов с одинаковым уровнем легирования  $\Delta\sigma$  в случае  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  в 11 раз больше, чем в случае  $\text{Ge} < \text{As} >$ . Из рис. 2, где приведены зависимости  $\Delta\sigma_{\parallel}$  и  $\Delta\sigma_{\perp}$  для образца  $\text{Ge} < \text{As} >$  с  $N_{\text{As}} = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  видно, что в отсутствие давления ( $\chi = 0$ )  $\Delta\sigma_{\parallel} = \Delta\sigma_{\perp}$ .

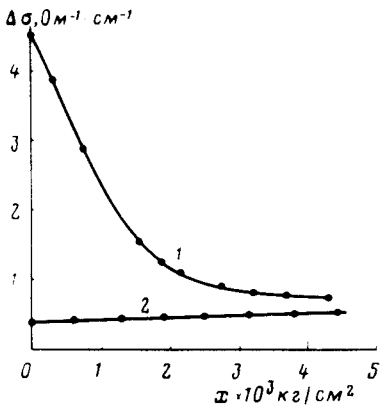


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость величины магнитопроводимости при  $H = 10 \text{ кЭ}$  от приложенного давления: 1 —  $\text{Ge} < \text{Sb} >$ ; 2 —  $\text{Ge} < \text{As} >$

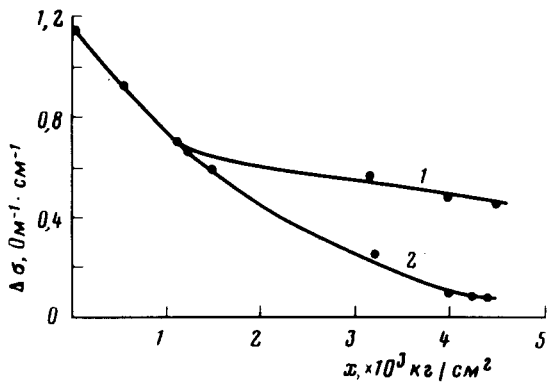


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость величины магнитопроводимости от величины приложенного давления при различных направлениях магнитного поля ( $H = 5 \text{ кЭ}$ ): 1 —  $H_{\parallel} [111]$ ; 2 —  $H_{\perp} [111]$

Рассмотрим, что произойдет при одноосном сжатии вдоль оси  $[111]$ . В этом случае, как известно, одна долина будет опускаться по энергии вниз, а оставшиеся три подниматься вверх. При достаточно больших давлениях, когда произойдет насыщение пьезосопротивления уровень Ферми будет расположен в одной долине. Для  $\text{Ge} < \text{Sb} >$  это означает, что исчезает вклад в магнитопроводимость трех верхних эллипсоидов и величина  $\Delta\sigma(H)$  должна уменьшиться. Из рис. 1 видно, что это действительно наблюдается на опыте. Для  $\text{Ge} < \text{As} >$ , где без давления из-за частых процессов переброса вклады разных долин не суммировались, а сводились фактически к вкладу одной долины с усредненным коэффициентом диффузии, изменение с давлением энергетического положения эллипсоидов не меняет существенно величину магнитопроводимости. Все ее изменение связано лишь с изменением коэффициента диффузии. На эксперименте здесь действительно наблюдается небольшое увеличение  $\Delta\sigma(H)$ . Следует также ожидать, что  $\Delta\sigma$  в этих образцах в пределах больших  $\chi$  должны быть близки друг к другу, что и наблюдается на опыте (см. рис. 1).

В том случае, когда в проводимости участвует одна долина,  $\Delta\sigma$  из-за анизотропии коэффициента диффузии должна быть анизотропной в том числе и для  $\text{Ge} < \text{As} >$ . Этот эффект показан на рис.2. Из рисунка видно, что в условиях насыщения пьезосопротивления  $\Delta\sigma_{\parallel} / \Delta\sigma_{\perp} \cong 7$ . Из выражения (2) следует, что  $\Delta\sigma_{\parallel} / \Delta\sigma_{\perp} = D_{\perp} / D_{\parallel}$ . Подставив значения  $D_{\perp}$  и  $D_{\parallel}$  получим  $\Delta\sigma_{\parallel} / \Delta\sigma_{\perp} \approx 5$ , что близко к экспериментальному значению. Таким образом, вся анизотропия магнитопроводимости обусловлена анизотропией коэффициента диффузии, как и предсказывает теория<sup>1</sup>.

В заключение авторы благодарят А.Г.Аронова, Б.Л.Альтшулера и Т.А.Полянскую за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Ларкин А.И., Хмельницкий Л.Е. ЖЭТФ. 1981. 81, 768.
2. Kawabata A. J Phys. Soc. Japar., 1980. 49. 628.
3. Mason W.P., Bateman T.B. Phys. Rev., 1964, 134, A1387.
4. Katz M.J. Phys. Rev., 1965, 140, A1323.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 января 1982 г.