

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ГЕРМАНИИ, n -ТИПА И ЕГО АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

Т.А.Полянская, И.И.Сайдашев

Сопоставление экспериментальных данных с теорией свидетельствует о необходимости учитывать вклад в магнитосопротивление, связанный с межэлектронным отталкиванием. Оценены значения константы взаимодействия электронов и времени релаксации фазы волновой функции, которое оказалось близким ко времени затухания одноэлектронных возбуждений.

В работах [1 – 4] предлагается новая теоретическая интерпретация отрицательного магнитосопротивления (ОМС) в сильно легированных полупроводниках, связанная с учетом влияния магнитного поля на квантовые поправки к проводимости. Неизвестными параметрами теории являются: константа межэлектронного взаимодействия – g и время релаксации фазы волновой функции электрона – τ_ϕ . В данной работе приводятся новые экспериментальные результаты исследования ОМС в германии, легированном сурьмой. Техника эксперимента описана в работе [5]. Проведены измерения зависимостей магнитосопротивле-

ния в ЭДС Холла от напряженности магнитного поля H в диапазоне $30 + 5 \cdot 10^4$ Гс, на основании которых было рассчитано изменение проводимости в магнитном поле $\Delta\sigma_e(H) = \sigma_e(H) - \sigma_e(0)$. Квантовая поправка к проводимости $\Delta\sigma_q(H)$ вычислялась как разность:

$$\Delta\sigma_q(H) = \Delta\sigma_e(H) - \Delta\sigma_c(H), \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_e(H)$ — классическая часть магнитопроводимости, рассчитанная в приближении $\epsilon_F/kT \gg 1$ (ϵ_F — энергия Ферми). Экспериментальные зависимости (1) сравнивались с теоретическими, рассчитанными для случая невзаимодействующих электронов [2]:

$$\Delta\sigma_f = a_f c_q \sum_i D_i f(b_i H \tau_\phi / \hbar) \quad (2)$$

и с учетом межэлектронного взаимодействия [3]:

$$\Delta\sigma_\phi = a_\phi c_q \sum_i D_i \phi(b_i H / 2\pi kT), \quad (3)$$

где $c_q = \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \sqrt{\hbar c / eH}$, $a_f = 1 - \beta(g)$, $a_\phi = -g$, функции $f(x)$, $\phi(x)$ и $\beta(g)$ приведены в работах [2], [3] и [4], соответственно. D_i и b_i определяются тензором коэффициента диффузии, суммирование ведется по четырем эллипсоидам изоэнергетической поверхности германия [3]. При расчетах g и τ_ϕ оставались свободными параметрами.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости 1 для образцов с концентрацией электронов в диапазоне $3,7 \cdot 10^{17} + 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. На том же рисунке показаны зависимости $\Delta\sigma_f(H)$ для случая невзаимодействующих электронов 2. Значения τ_ϕ , которые были использованы при их расчете, приведены на рис. 2, а. Величина коэффициента a_f 2 оказалась равной 0,4 + 0,5 для всех образцов. Как видно из рис. 1, экспериментально наблюдаемая магнитопроводимость хорошо описывается теорией без учета взаимодействия электронов [2] в магнитном поле $0,03 < H < 3$ кГс и в широком диапазоне изменения $\Delta\sigma_q$ (на 2 + 3,5 порядка величины $\Delta\sigma_q$ (см. рис. 1)). Однако, при $H > 3$ кГс экспериментальная магнитопроводимость растет с магнитным полем медленнее, чем предсказывается теорией для невзаимодействующих электронов. Можно предположить, что это расхождение связано с отталкиванием электронов. В этом случае константа взаимодействия $g > 0$ и проводимость, связанная с учетом взаимодействия 3, убывает с ростом магнитного поля ($\Delta\sigma_\phi < 0$). На рис. 1 приведены теоретические зависимости $\Delta\sigma_f(H) + \Delta\sigma_\phi(H)$, рассчитанные для образца с концентрацией $n \sim 3,7 \cdot 10^{17}$ см⁻³ при значениях $a_\phi = -0,25$ и $-0,3$. Как видно из рисунка, предположение об отталкивании электронов и учет соответствующего вклада $\Delta\sigma_\phi(H)$ в изменение проводимости с магнитным полем приводят к значительно лучшему согласию теории с экспериментом в диапазоне магнитного поля от 3 до 30 кГс. Трудно сравнить значения коэффициентов a_ϕ 3 и a_f 2, полученные нами, так как зависимость $\beta(g)$ для положительных значений $g > 0,1$ не рассматривалась в работе [4].

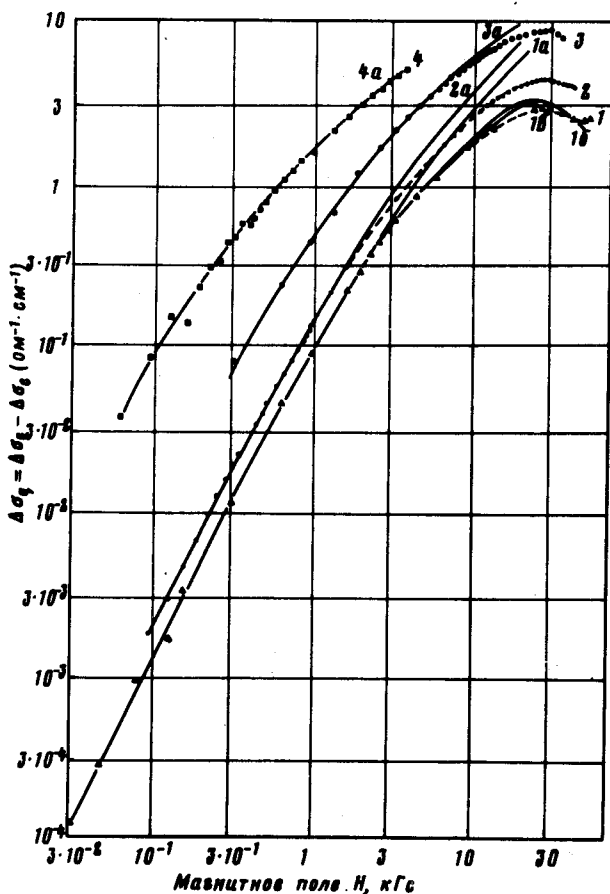


Рис. 1. Изменение проводимости в магнитном поле $\Delta\sigma_q(H)$ (точки и пунктирные линии) для образцов с концентрациями $n = 1/eR_H (10^{17} \text{ см}^{-3})$: 1 - 3,7; 2 - 5,5; 3 - 11; 4 - 52, измеренное при $T = 4,2 \text{ К}$. Теоретические зависимости (линии) $\Delta\sigma_f(H)$: 1a - 4a, $\Delta\sigma_f(H) + \Delta\sigma_\phi(H)$: 1б - 4б, $a_\phi = -0,25$, $a_\phi = -0,3$

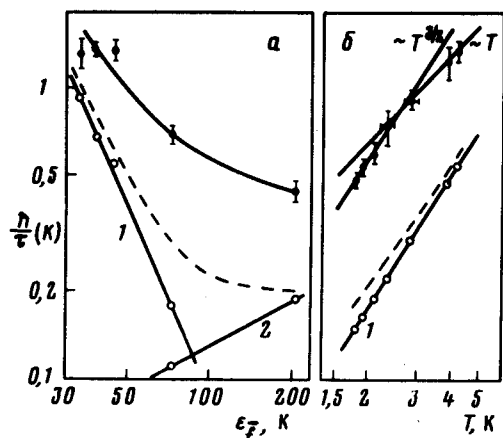


Рис. 2. Зависимости обратного времени релаксации $\hbar/\tau(\text{K})$: а - от энергии Ферми $\epsilon_F(\text{K})$, б - от температуры $T(\text{K})$. ● - эксперимент (\hbar/τ_ϕ), ○ - теория: 1 - \hbar/τ_ϕ , 2 - \hbar/τ_{ph} , пунктирные линии - $(\hbar/\tau_\phi + \hbar/\tau_{ph})$

Экспериментальные значения τ_ϕ (рис. 2, а) сравнивались 1) со временем затухания одноэлектронных возбуждений в присутствии дефектов, ограничивающих длину свободного пробега электрона, $\tau_{ee}^{(2)} \equiv \tau_\phi \sim T^{3/2}/\epsilon_F^2$ [6]; 2) со временем релаксации фазы волновой функ-

ции в условиях квазиупругого электрон-фононного взаимодействия τ_{ϕ}'' [3]. В нашем случае $\tau_{\phi}'' \sim \tau_{ph}$, так как справедливо неравенство: $\tau_{ph} s \epsilon_F / v_F > 1$, где τ_{ph}^{-1} — частота электрон-фононных столкновений, s — скорость звука, v_F — скорость электрона с энергией ϵ_F .

На рис. 2, а представлены значения τ_{ϕ}'' и τ_{ph} , рассчитанные для исследованных образцов. Видно, что экспериментальные значения τ_{ϕ}'' в области малых концентраций электронов близки к значениям τ_{ϕ}'' , а при концентрации $n \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($\epsilon_F \sim 200 \text{ К}$) — к значению τ_{ph} . Пунктирная линия на рис. 2, а представляет сумму $\hbar/\tau_{\phi}'' + \hbar/\tau_{ph}$, которая хорошо описывает ход экспериментальной зависимости $\hbar/\tau_{\phi}''(\epsilon_F)$.

Измерения магнитосопротивления в слабых магнитных полях (рис. 3) для образца с концентрацией $n \sim 5,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне температуры 1,8 — 4,2 К позволили оценить температурную зависимость τ_{ϕ}'' . При $H \rightarrow 0$ $\Delta\rho/\rho_0 \sim H^2$, как и предполагает теория. Поскольку вклад, связанный со взаимодействием, при $H \rightarrow 0$ мал по параметру $\sim (\hbar/2\pi k T \tau_{\phi})^{3/2}$, то им можно пренебречь и $-\Delta\rho/\rho_0 H^2 \approx \Delta\sigma_f/\sigma_0 H^2 \sim \tau_{\phi}^{3/2}$ [2, 3]. Температурная зависимость \hbar/τ_{ϕ}'' , полученная таким образом, приведена на рис. 2, б вместе с расчетной зависимостью $\hbar/\tau_{\phi}''(T)$ для этого же образца, которая оказалась близкой к экспериментальной.

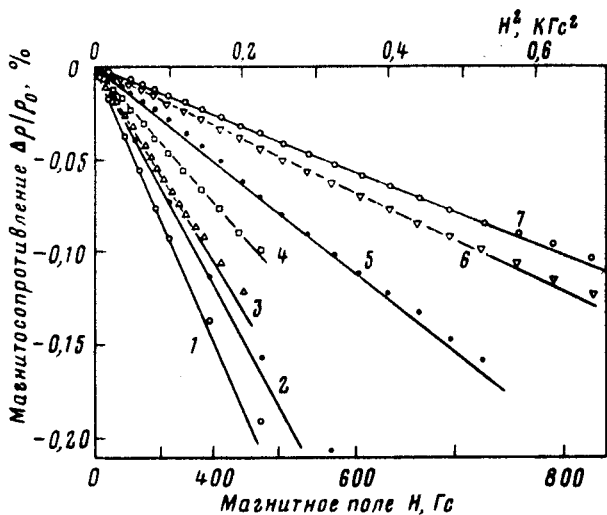


Рис. 3. Зависимости магнитосопротивления от квадрата магнитного поля, измеренные при температуре $T(\text{К})$ 1 — 1,8; 2 — 1,9; 3 — 2,1; 4 — 2,3; 5 — 2,8; 6 — 3,9; 7 — 4,2

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы: 1) новая теория ОМС [2, 3] хорошо согласуется с экспериментом, причем в области магнитных полей $H > 3 \text{ кГс}$ проявляется вклад в магнитосопротивление, связанный с межэлектронным отталкиванием [3]; 2) величина времени релаксации фазы волновой функции τ_{ϕ} , а также его концентрационная и температурная зависимости оказываются сравнимыми со временем затухания одноэлектронных возбуждений τ_{ϕ}'' [4] при концентрации электронов $n < 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и временем релаксации, связанным с электрон-фононным взаимодействием [3] при $n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.В.Шмарцеву за предложенную тему и внимание к работе, А.Г.Аронову за большую помощь, оказанную им при анализе результатов эксперимента и С.Б.Демичевой за помощь в расчетах.

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

Поступила в редакцию
4 августа 1981 г.

Литература

- [1] *Altshuler B.L., Khmel'nitskii D.E., Larkin A.L. Lee P.A. Phys. Rev., 1980, B22, 5142.*
 - [2] *Kawabata A. J. Phys. Soc. Japan, 1980, 49, 621.*
 - [3] *Altshuler B.L., Aronov A.G., Khmel'nitskii D.E., Larkin A.L. ЛИЯФ АН СССР, препринт №651, апрель, 1981.*
 - [4] *Ларкин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 239.*
 - [5] *Полянская Т.А., Сайдашев И.И. ФТП, 1975, 9, 153.*
 - [6] *Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 514.*
-