

## О МЕХАНИЗМЕ РЕЛАКСАЦИИ ФАЗЫ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОНА В GaAs n-ТИПА

О.В.Емельяненко, Т.С.Лагунова, Т.А.Полянская

По зависимостям проводимости от магнитного поля при гелиевых температурах оценено время релаксации фазы и показано, что оно определяется электрон-фононными столкновениями и временем жизни одночастичных возбуждений в условиях малой длины свободного пробега.

В ряде экспериментальных работ <sup>1</sup> показано, что теория квантовых поправок к проводимости <sup>2-5</sup>, объясняющая явление отрицательного магнитосопротивления (ОМС) в полупроводниках в области металлической проводимости, хорошо согласуется с экспериментом. Это позволяет использовать теорию для определения параметров, описывающих поведение электронного газа. В частности, для простейшего случая не взаимодействующих электронов и стандартной зоны проводимости, как в n-GaAs, время релаксации фазы волновой функции электрона  $\tau_\varphi$  определяет изменение проводимости в магнитном поле следующим образом <sup>2</sup>:

$$\Delta\sigma_L(H) = a_L \frac{G_0}{2l_L} \sqrt{x_L} f_3(x_L), \quad (1)$$

где  $G_0 = e^2/2\pi^2\hbar$ ,  $x_L = (2l_L/l_H)^2$ ,  $l_L = \sqrt{D\tau_\varphi}$ ,  $f_3(x_L) \equiv F(\delta^{-1})$  – функция, приведенная в работе <sup>2</sup>,  $l_H = \hbar c/eH$  – магнитная длина,  $D$  – коэффициент диффузии,  $a_L = 1$ . В работах <sup>3,4</sup> показано, что  $a_L$  может быть меньше единицы на величину  $\beta(\lambda)$ , где  $\lambda$  – константа взаимодействия электронов,  $\beta(\lambda)$  – функция, рассчитанная в работе <sup>4</sup>. Все остальные величины в (1) известны или определяются из эксперимента.

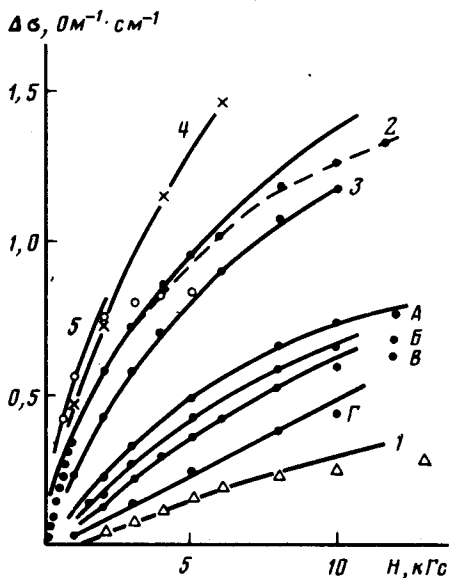


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость магнитопроводимости  $\Delta\sigma$  от магнитного поля  $H$ : значки – эксперимент для образцов с концентрацией  $n$  ( $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ): 1 – 1,7; 2 – 17; 3 – 27; 4 – 30; 5 – 83; А – Г – 3,7; температура  $T$  (К): 1 – 5 – 4,2; А – 2,1; Б – 3; В – 4,2; Г – 7,5. Сплошные линии – расчет  $\Delta\sigma_L(H)$  (1), штриховая линия –  $\Delta\sigma_L(H) - \Delta\sigma_I(H)$

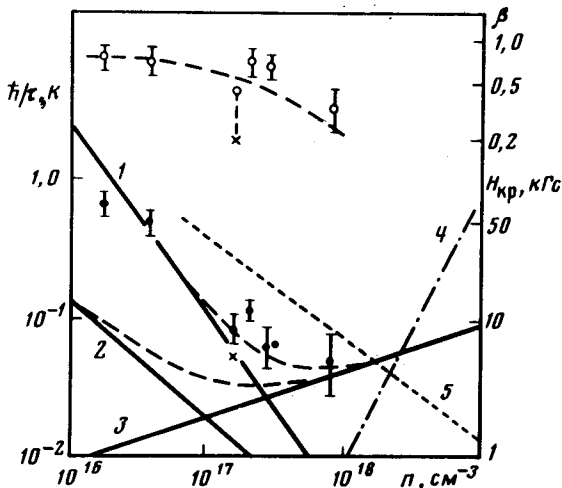


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость  $\hbar/\tau$  (К),  $\beta$  и  $H_{кр}$  (кГс) от концентрации электронов. Точки – эксперимент. Расчет 1 –  $\hbar/\tau_{ee}^{(2)}$ , 2 –  $\hbar/\tau_{ee}^{(1)}$ , 3 –  $\hbar/\tau_{ph}$ , 4 –  $\hbar/\tau_{S0}$ , 5 –  $H_{кр}$ . Штриховые линии: 1а –  $\hbar/\tau_{ee}^{(2)} + \hbar/\tau_{ph}$ , 2а –  $\hbar/\tau_{ee}^{(1)} + \hbar/\tau_{ph}$

На рис. 1 приведены зависимости экспериментально измеренной магнитопроводимости  $\Delta\sigma_y(H) = \rho^{-1}(H) - \rho^{-1}(0)$  ( $\rho$  — удельное сопротивление образца) от магнитного поля  $H$  в  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $(1,7 - 83) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в сравнении с теоретическими зависимостями, построенными по (1) с параметрами  $\beta$  и  $\tau_\varphi$ , дающими лучшее согласие с экспериментом. Соответствующие значения  $\beta$  и  $\tau_\varphi$  для разных образцов приведены на рис. 2 и рис. 3 в зависимости от концентрации электронов  $n$  и температуры  $T$ . Величина  $\beta$  изменяется в среднем от 0,7 до 0,3 с возрастанием концентрации (рис. 2). Найденные значения  $\tau_\varphi$  сравнивались со временем затухания одноэлектронных возбуждений  $\tau_{ee}^{(1)}$  и  $\tau_{ee}^{(2)}$  и с частотой электрон-фононных столкновений  $\hbar/\tau_{ak}$ . Для оценки  $\tau_{ak}$  в GaAs воспользовались численным коэффициентом, рассчитанным в работе <sup>7</sup>. Зависимости  $\hbar/\tau_{ee}^{(1)} + \hbar/\tau_{ak}$  и  $\hbar/\tau_{ee}^{(2)} + \hbar/\tau_{ak}$  от концентрации электронов приведены на рис. 2. (при расчете  $\tau_{ee}^{(2)}$  было использовано среднее значение подвижности для исследованных образцов  $\mu = 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ). Экспериментальные значения  $\hbar/\tau_\varphi$  очень хорошо согласуются со значениями  $\hbar/\tau_{ee}^{(2)} + \hbar/\tau_{ak}$ . На рис. 3 приведена зависимость  $\hbar/\tau_\varphi$  от температуры для образца с концентрацией  $n = 3,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (кривые А — Г на рис. 1), которая близка к зависимости  $T^{3/2}$ , предсказываемой теорией <sup>6</sup> для  $\hbar/\tau_{ee}^{(2)}$ .

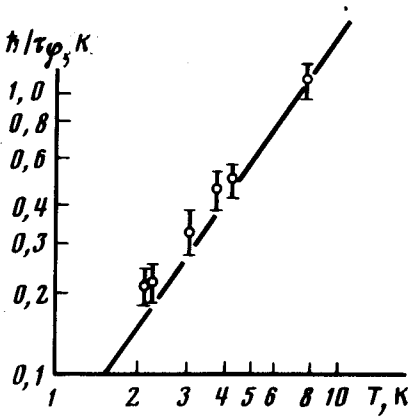


Рис. 3. Зависимость  $\hbar/\tau_\varphi$  (К) от температуры  $T$  (К). Точки — эксперимент, линия — расчет  $\hbar/\tau_{ee}$

Таким образом, время релаксации фазы в GaAs определяется временем энергетической релаксации  $\tau_{ee}^{(2)}$  при  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и электрон-фононными столкновениями при  $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Сделаем несколько замечаний. 1) Применимость теории <sup>2-5</sup> ограничивается условием  $k_F l > 1$ , где  $k_F$  — волновой вектор электрона с энергией  $\mathcal{E}_F$ ,  $l$  — длина свободного пробега. Несмотря на это, значения  $\tau_\varphi$  и  $\beta$  для образца 1 с  $k_F l \approx 0,5$  не находятся в противоречии с остальными результатами (рис. 2). 2) Другое условие теории требует соблюдения неравенства  $l_H < l^2$  и ограничивает возможность сравнения  $\Delta\sigma_y(H)$  с зависимостью (1) до значений

$$H < H_{кр} \text{ (кГс)} = 10^5/k_F l \mu \text{ (см}^2/\text{В}\cdot\text{с)}. \quad (2)$$

Для образца 5 ( $\mu = 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ )  $H_{кр} = 4,5 \text{ кГс}$ , возможно, с этим связано насыщение зависимости  $\Delta\sigma_y(H)$  для этого образца (рис. 1). Пунктирная линия на рис. 2 соответствует зависимости  $H_{кр}$  от концентрации электронов при  $\mu = 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . 3) В работе <sup>3</sup> показано, что в  $n$ -GaAs зависимость (1) изменяет характер (появляется участок  $\Delta\sigma < 0$  в слабом магнитном поле), если

$$\tau_{S0} \leq \tau_\varphi, \quad (3)$$

где  $\tau_{S0}$  — время релаксации спина электрона при взаимодействии с орбитальным моментом. Если предположить, что расхождение экспериментальных и расчетных значений  $\Delta\sigma$  при  $H < 0,5 \text{ кГс}$  для образца 2 с  $n = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1) связано с этим явлением, то для согласования теории с экспериментом, включая эту область полей, нужно допустить что  $\hbar/\tau_{S0} = 2\hbar/\tau_\varphi$  и взять новые значения  $\tau_\varphi$  и  $\beta$ , которые показаны крестиками на рис. 2. На том

же рисунке приведена зависимость  $\hbar/\tau_{S0}$  от концентрации электронов, рассчитанная по теории 8<sup>1)</sup>. Из рисунка видно, что неравенство  $\tau_{S0} \leq \tau_{\varphi} \approx \tau_{ak}$  имеет место при  $n \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В этом случае условия (2) и (3) перекрываются и зависимость типа (1) становится неприменимой. (Возможно, в образце 2 зависимость  $\Delta\sigma_3(H)$  при  $H < 0,5 \text{ кГс}$  связана с контактными явлениями<sup>9)</sup>. 4) В работах<sup>3,5</sup> показано, что взаимодействие электронов приводит к дополнительным поправкам к магнитопроводимости:  $\Delta\sigma_I(H)$  – связанной с оттапливанием электронов и  $\Delta\sigma_S(H)$  – со спиновым взаимодействием электронов. Поправка  $\Delta\sigma_S$ <sup>5</sup> составляет менее 1% от величины  $\Delta\sigma_3$  для всех образцов при  $H \approx 10 \text{ кГс}$  и ее можно не учитывать. Учет  $\Delta\sigma_I(H)$  (штриховая линия на рис. 1) позволяет улучшить согласие между теорией и экспериментом. Значение  $\hbar/\tau_{\varphi}$  и  $\beta$  при этом существенно не изменяются. Константа взаимодействия, необходимая при расчете  $\Delta\sigma_I$ , оценивалась по формуле (14а) из работы<sup>3</sup> и затравочной константе взаимодействия  $\bar{\lambda} = 1$  (такая оценка  $\lambda$  существенно неверна только в том случае, если  $\bar{\lambda} < 1$ ).

Авторы глубоко благодарны А.Г.Аронову и Б.Л.Альтшулеру за многократное обсуждение затронутых в работе вопросов, Ю.В.Шмарцеву и А.А.Рогачеву за поддержку и интерес к работе и А.Н.Титкову за консультацию по вопросу о спин-орбитальном расщеплении в *n*-GaAs.

#### Литература

1. Полянская Т.А., Сайдашев И.И. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 378; Ионов А.Н., Шлимак И.С. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 160. Ионов А.Н. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 378.
2. Kawabata A. J. Phys. Soc. Jap., 1980, 49, 621.
3. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Хмельницкий Д.Е., Ларкин А.И. ЖЭТФ, 1981, 81, 768.
4. Ларкин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 239.
5. Rosenbaum T. F., Milligen R. F., Thomas G. A., Lee P. A., Ramakrishnan T. V., Bhatt R. N. Phys. Rev. Lett., 1981, 47, 1758.
6. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 514.
7. Katoda T., Sugano T. J. Electrochem. Soc., 1974, 121, 1066.
8. Дьяконов М.И., Перель В.И. ФТТ, 1971, 13, 3581.
9. Полянская Т.А., Сайдашев И.И. ФТП, 1975, 9, 153; Li P. L., Paton B. E. J. Phys., 1977, E10, 1222.

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

Поступила в редакцию  
3 августа 1982 г.