

## КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ВИСМУТА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ФОНОНОВ

*Ю.А.Богод, Р.Г.Валеев*

В режиме генерации фононов обнаружены осцилляции поперечного ( $E \perp H$ ) магнетосопротивления висмута, экстремумы которых совмещаются с экстремумами осцилляций Шубникова – де Гааза (ШдГ). Амплитуда осцилляций в режиме генерации фононов имеет аномальную для эффекта ШдГ температурную зависимость – возрастает при переходе от гелиевых температур к водородным.

В настоящее время общепринято [1] связывать обнаруженный Есаки [2] при  $E = E_K \approx s H/c$  излом вольтамперной характеристики (ВАХ) висмута с генерацией фононов носителями заряда, дрейфующими со сверхзвуковой скоростью в направлении  $[E \perp H]$ . Совокупности значений  $E < E_K$  и  $E > E_K$  мы будем называть в дальнейшем, соответственно, линейной и нелинейной областью электрических полей. В данной работе измерения магнетосопротивления (МС) проводились в магнитных полях до 200 кэ. Методика измерений МС ( $R$ ) в линейной области подробно изложена в [5], особенности измерений МС в нелинейном режиме ( $R'$ ) сообщались в [4, 6]. Укажем лишь, что величина измерительного тока в данном исследовании при  $E < E_K$  не превышала  $5 \cdot 10^{-2}$  а, а при  $E > E_K$  импульс тока имел почти прямоугольную форму.

Ниже представлены экспериментальные результаты, полученные на монокристалле сечением  $1 \times 1, 2 \text{ мм}^2$  (способ приготовления образца описан в [4]) для двух направлений магнитного поля в плоскости  $C_2 C_3$ . Продольная ось образца параллельна биссекторному направлению  $C_1$ , расстояние между потенциальными контактами 3,5 мм.

<sup>1</sup>) Приближенный характер равенства экспериментально был установлен авторами настоящей работы и Онокиенко [3, 4].

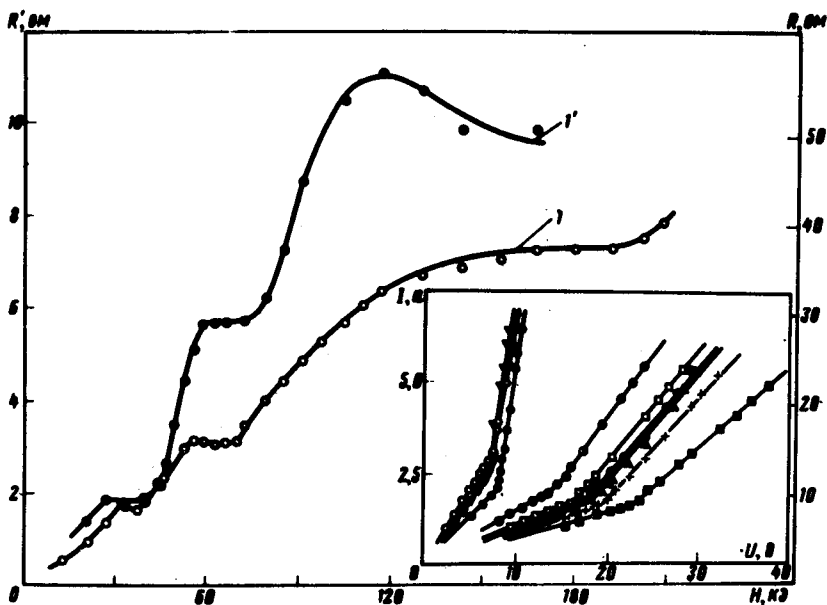


Рис. 1. МС висмута в линейной (кривая 1,  $T = 4,2\text{K}$ ) и нелинейной (кривая 1',  $T = 20,4\text{K}$ ;  $I = 6 \cdot a$ ) области электрических полей,  $\angle H, C_s = 16^\circ$ . На вставке — ВАХ при  $20,4\text{K}$ , в полях (кэ): 27 (○); 33 (◁); 40 (●); 52,5 (●); 59 (□); 66 (●); 72 (▷); 79 (×); 91 (■)

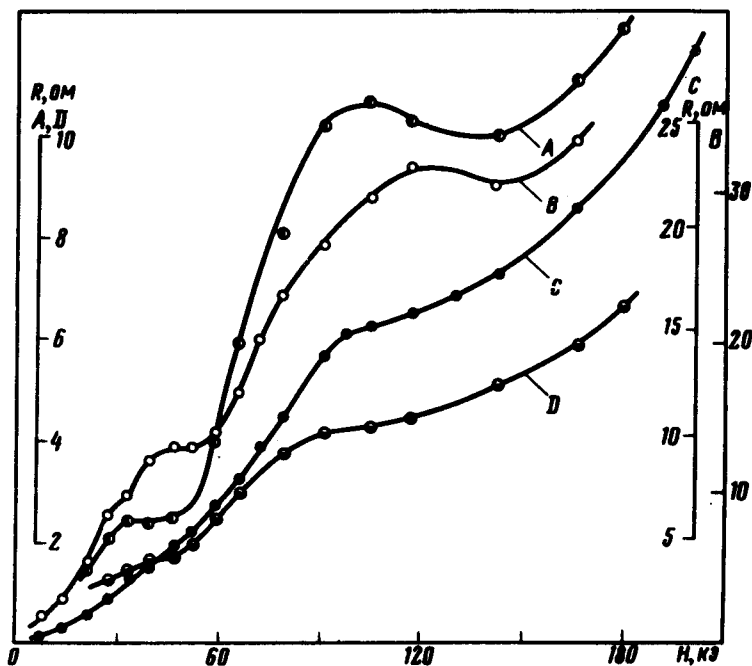


Рис. 2. Осцилляции МС в случае  $\angle H, C_s = 8^\circ$ . Кривые B и C получены при  $E < E_K$ ,  $T = 4,2$  и  $20,4\text{K}$ , соответственно. Кривые D и A построены при  $E > E_K$ ,  $I \approx 5 \cdot a$ : D —  $T = 4,2\text{K}$ , A —  $T = 20,4\text{K}$

Как видно на рис. 1, все особенности зависимости  $R(H)$  т.е. осцилляции ШдГ – полученной при 4,2 К, воспроизводятся в нелинейной области. Подчеркнем, что кривая  $R'(H)$  соответствует  $T = 20,4$  К. На вставке показаны ВАХ образца при 20,4 К (для магнитных полей в окрестности 30 и 60 кэ), из которых, в частности, следует, что наряду с дифференциальным МС  $\rho' = \frac{\partial U}{\partial I}(H)$  при  $E > E_K$  величина  $E_K/H$  также не является монотонной функцией магнитного поля. Осциллирующий характер  $E_K/H = f(H)$  будет обсуждаться в отдельной статье. Сопоставление кривых, изображенных на рис. 2, показывает, что в отличие от линейной области (кривые В и С), в нелинейном режиме увеличение температуры от 4 до 20 К сопровождается ростом амплитуды осцилляций (D, A). Осцилляции  $\rho'(H)$  имеют ту же закономерность (рис. 3), причем наибольшая амплитуда реализуется при 14 К.

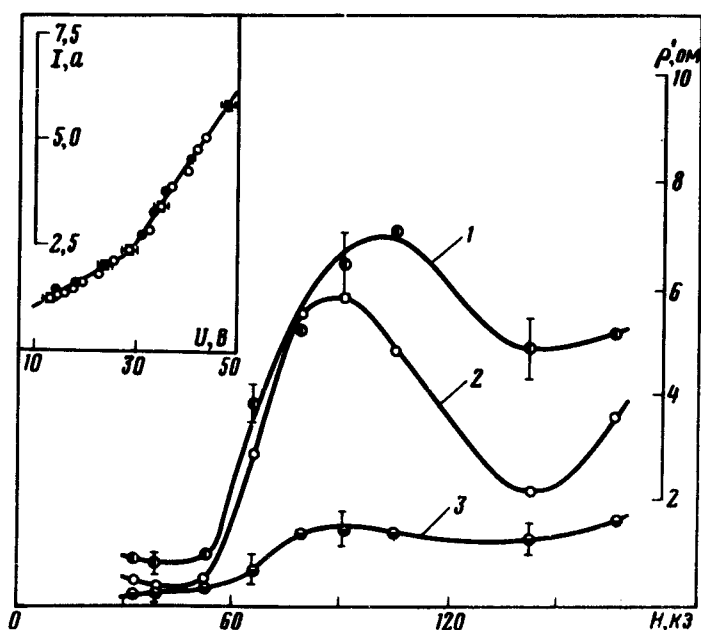


Рис. 3. Осцилляции дифференциального сопротивления в нелинейном режиме,  $\angle H, C_3 = 8^\circ$ : 1, 2, 3 соответствуют  $T = 20,4; 14$  и  $4,2$  К. На вставке – ВАХ при  $H = 79$  кэ,  $T = 20,4$  К:

● – первая серия опытов; ○ – вторая серия опытов

В этой связи хотелось бы обратить внимание на следующее обстоятельство. Поскольку погрешность осциллограмм составляет обычно около 10%, ошибки при определении  $\rho'$  могут достигать весьма больших значений.) Однако хорошая воспроизводимость результатов от одной серии измерений к другой (см. вставку на рис. 3) позволяет считать основным источником погрешностей неточность отсчета сигнала, связанную с толщиной луча осциллографа. Таким образом, полученные экспериментальные результаты достаточно надежны.

Совмещение экстремумов осцилляций ШдГ с экстремумами функций  $R'(H)$  и  $\rho'(H)$  позволяет с большой степенью достоверности отождествить осцилляции МС в нелинейной области с эффектом ШдГ. Не исключено, что отмеченное Есаки [2] немонотонное изменение  $\frac{\partial U}{\partial I}(H)$

при  $E > E_K$ ,  $T = 2$  К, и наблюдаемые нами в нелинейном режиме осцилляции имеют одну и ту же природу — более определенных выводов на основании данных работ [2], к сожалению, сделать нельзя. К данному типу осцилляций безусловно относятся немонотонности  $R'(H)$  и  $\rho'(H)$ , о наблюдении которых при 4,2 и 20,4 К сообщали недавно авторы и Онокиенко [4].

Если допустить, что, как и в линейном режиме, амплитуда осцилляций МС в случае  $E > E_K$  пропорциональна  $\left\{ \exp \frac{2\pi^2 k}{\hbar\omega} \left( T + \frac{\hbar}{\pi k\tau} \right) \right\}$ , столкновительное уширение уровней Ландау при 4К должно превышать соответствующую величину в водородной области. В пользу этого предположения свидетельствует также и увеличение (при данном  $H$ ) МС  $R'$  и  $\rho'$  при переходе от 4,2 к 20,4 К (см. рис. 3 и работы [3, 4]), в противоположность случаю  $E < E_K$ . Все это позволяет, в частности, поставить вопрос о соотношении суммарного числа "звуковых" (неравновесных) и "тепловых" (равновесных) фононов при гелиевых и водородных температурах. Отметим также, что полученные результаты указывают на возможность изучения квантовых эффектов в широком температурном диапазоне, существенно увеличивая тем самым ценность данного метода исследования.

Физико-технический институт  
низких температур  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
6 мая 1975 г.

### Литература

- [1] В.И.Пустовойт. УФН, 97, 257, 1969.
- [2] L.Esaki. Phys. Rev. Lett., 8, 4, 1962.
- [3] Yu.A.Bogod, R.G.Valeev, G.P.Onokienko. Physica Status Solidi (a), 15, k163, 1973.
- [4] Ю.А.Богод, Р.Г.Валеев, Г.П.Онокиенко. ФНТ, 1, 247, 1975.
- [5] Ю.А.Богод. Кандидатская диссертация, ФТИНТ, 1969.
- [6] Ю.А.Богод, Р.Г.Валеев, Г.П.Онокиенко. ФНТ, 1, 120, 1975.