

НАБЛЮДЕНИЕ "ГОРЯЧИХ" ЭЛЕКТРОНОВ В ВИСМУТЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОНТАКТОВ

И.П.Крылов, Ю.В.Шарвин

Экспериментально обнаружен эффект перегрева электронного газа относительно кристаллической решетки при инъекции носителей в висмут с помощью микроконтактов. Температура электронов измерялась по амплитуде квантовых осцилляций сопротивления микроконтактов. Экспериментальные результаты находятся в согласии с расчетом, проведенным с помощью условия теплового баланса для электронов, поглощающих энергию электрического поля в образце и отдающих ее решетке за счет испускания фононов.

Мы наблюдали перегрев системы носителей заряда относительно кристаллической решетки при инъекции электронов в висмут с помощью микроконтактов. Наличие перегрева устанавливалось по уменьшению амплитуды осцилляций Шубникова – де Гааза для сопротивления микроконтактов.

Эксперименты были проведены с монокристаллом чистого висмута, имевшим форму прямоугольного параллелепипеда размерами $2 \times 2 \times 3$ мкм³. Тригональная C_3 и бинарная C_2 оси кристалла были перпендикулярны прямоугольным граням параллелепипеда. На гранях, перпендикулярных оси C_3 , было установлено по одному микроконтакту, так что линия, соединявшая контакты лежала в плоскости C_2C_3 и составляла с осью C_3 угол $\approx 15^\circ$. Микроконтакты изготовлялись из медной проволоки диаметром 20 мкм, приваренной к образцу электрическим разрядом. Вдали от микроконтактов к образцу был припаян токоподвод диаметром 0,1 мм. Постоянное напряжение на микроконтактах измерялось милливольтметром Ф-116 и регистрировалось на самописце в зависимости от магнитного поля H . Вектор H можно было поворачивать в плоскости C_2C_3 на любой угол ϕ относительно линии, соединявшей микроконтакты. Положение $\phi = 0$ устанавливалось по минимуму напряжения между контактами U при $H = 20$ кэ.

Напряжение U зависело от величины и направления магнитного поля. При $H = 0$ величина сопротивления $R_0 = U/I \approx 1$ ом, а при $H \approx 20$ кэ и $\phi = 0$ увеличивалась на $\approx 10\%$. При $\phi \gtrsim 30^\circ$ зависимость $U(H)$ определялась поперечным магнетосопротивлением образца, и величина $R_H = [U(H) - U(0)]/I$ достигала 5 ом при $\phi \gtrsim 5^\circ$ и $H \approx 20$ кэ. На рис.1 показана зависящая от магнитного поля часть напряжения между микроконтактами при малом $\phi = 16^\circ$. При больших углах наклона ϕ монотонная часть $R_H \sim H^2$.

Наблюдаемые осцилляции напряжения U , очевидно, представляют собой осцилляции типа Шубникова – де Гааза. Изменяя ориентацию H относительно оси C_3 можно было наблюдать осцилляции, соответствующие

щие различным частям ферми-поверхности. Осцилляции, наблюдавшиеся вблизи $\phi = 0$, подобные показанным на рис. 1, обусловлены центральным сечением дырочного эллипсоида, вытянутого вдоль оси C_3 . Период осцилляций в обратном поле, его анизотропия и величина эффективной массы m^* , оцененная по температурной зависимости амплитуды осцилляций совпадают с известными данными [1].

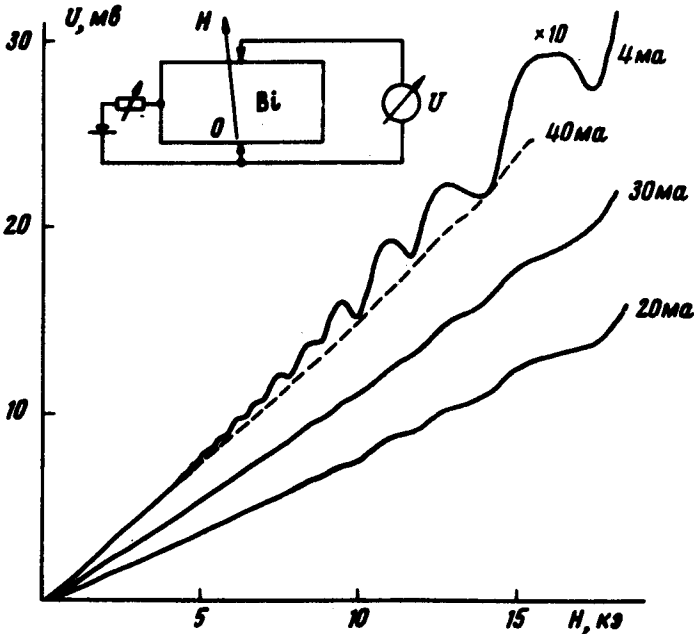


Рис. 1. Зависимость $U(H)$ при различных значениях измерительного тока I . Для записи кривой при $I = 4 \text{ ма}$ чувствительность установки увеличена в 10 раз. Пунктиром показана часть кривой при $I = 40 \text{ ма}$, не совпадающая с кривой при $I = 4 \text{ ма}$. Температура образца $T = 1,5 \text{ К}$. Угол $\phi = 16^\circ$

При измерительных токах $I \lesssim 1 \text{ ма}$ амплитуда осцилляций сопротивления, в пределах точности измерений, не зависит от величины тока. Для токов $I > 5 \text{ ма}$ осциллирующая слагающая сопротивления, как видно на рис. 1, заметно уменьшается. Уменьшение амплитуды квантовых осцилляций может быть объяснено перегревом электронов, поглощающих энергию электрического поля.

Предположим, что в системе электронов в результате различных процессов рассеяния устанавливается некоторое распределение по импульсам, которое близко к равновесному фермиевскому распределению с температурой T^* , сдвинутому в пространстве импульсов в соответствии с дрейфом носителей в электрическом и магнитном полях. Это предположение позволяет рассчитать плотность мощности w , передаваемую от системы электронов к решетке температуры $T < T^*$, за счет испускания акустических фононов. Используя методику расчета из ра-

боты [2] применительно к случаю висмута при гелиевых температурах, получим

$$w = \alpha (T^{*3} - T^3). \quad (1)$$

Коэффициент α определяется размерами ферми-поверхности, величиной эффективной массы носителей и частотой их столкновений с фононами. Согласно данным [1, 3, 4] получим значение $\alpha = 7,6 \cdot 10^7$ эрг/см³К³сек.

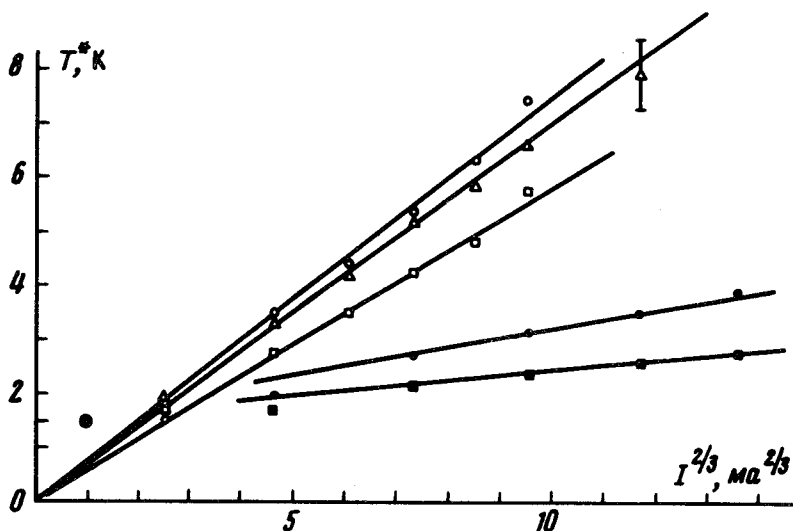


Рис. 2. Величина T^* , соответствующая измеряемому отношению амплитуд осцилляций $A(I)/A(1 \text{ ма})$. При $I = 1 \text{ ма}$ считается, что амплитуда осцилляций определяется температурой решетки $T = 1,5 \text{ К}$. Различная форма значков соответствует различным значениям магнитного поля: кружки — $H = 17,4 \text{ кэ}$, треугольники — $H = 14 \text{ кэ}$, квадраты — $H = 10 \text{ кэ}$. Светлые значки соответствуют измерениям напряжения между микроконтактами при $\phi = 16^\circ$. Залитые значки — измерениям напряжения между одним из контактов и периферийной точкой образца при $\phi = 0$.

Выделим в образце канал микроконтакта длины $L = 2 \text{ мм}$ и диаметра $d = 10^{-2} \text{ мм}$, в котором расстояние r до линии, проходящей через контакт параллельно H (линия OH на рис. 1), удовлетворяет условию $r \leq d/2$. Внутри канала электроны поглощают мощность $Q \approx I^2 R_0$ и передают ее решетке. Условие теплового баланса, написанное с помощью формулы (1), дает величину $T^* \approx 7 \text{ К}$ при $I = 30 \text{ ма}$. При $r \approx d$ на основе измеренной величины $R_H(\phi)$ можно получить оценку $T^* \approx 6 \text{ К}$ при $I = 30 \text{ ма}$ и $H = 17,4 \text{ кэ}$. При $d/2 < r \ll L$ эквипотенциальные поверхности в глубине образца при $H \geq 10 \text{ кэ}$ представляют собой коаксиальные цилиндры с осью OH , монотонная часть напряжения следует закону $[U(\phi) - U(0)] \sim \ln \phi$, величина $w \sim r^{-2}$ и температура электронного газа быстро приближается к температуре решетки при удалении от горячего канала микроконтакта.

Экспериментально величина T^* для некоторого тока I определялась из отношения амплитуд осцилляций сопротивления $A(I)/A(1\text{ ма})$ согласно формуле Лифшица – Косевича при известном значении m^* [5]. Результаты измерения температуры электронов в горячем канале микроконтакта представлены на рис. 2. Видно, что формула (1) правильно описывает экспериментальные результаты. Измерения величины T^* при $I = 10\text{ ма}$ и температуре решетки, повышающейся до 4,2К, в пределах погрешностей также совпадают с расчетом. При больших значениях ϕ измеряемая величина $\overline{T^*}$ есть результат сложного усреднения по области образца между контактами. Данные по зависимости относительной амплитуды осцилляций от угла ϕ представлены на рис. 3. Видно, что

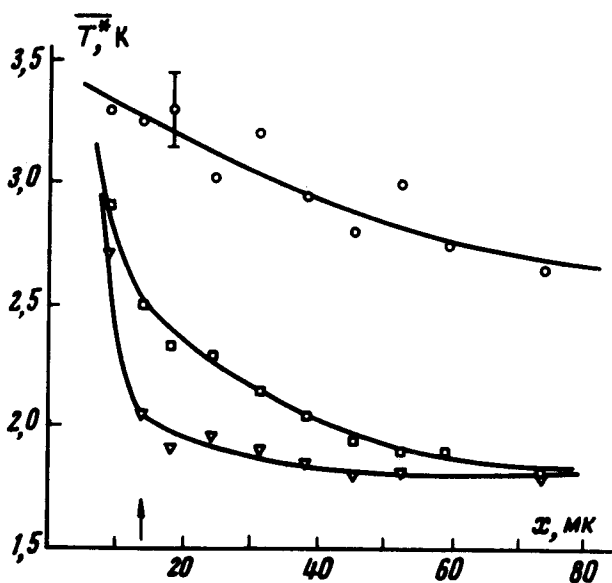


Рис. 3. Данные по зависимости $A(10\text{ ма})/A(1\text{ ма})$ от угла поворота ϕ , представленные в виде функции $T^*(x)$, где величина $x = L\phi$. Стрелкой отмечено значение $x = d$. Разные значки соответствуют разным величинам H в соответствии с рис. 2. (новый значок $\nabla - H = 7,8\text{ кэ}$), $T = 1,5\text{ К}$

при $H = 17,4\text{ кэ}$, в соответствии с расчетом, величина T^* незначительно меняется при пересечении границы горячего канала. Напротив, в более слабых полях температура падает при $r > d/2$. Согласно формуле (1) для $H = 7,8\text{ кэ}$ при $r \approx d$ и $I = 10\text{ ма}$ величина $T^* \approx 2\text{ К}$, что совпадает с результатами измерений. Если измерять напряжение между одним микроконтактом и периферийной точкой образца, то наблюдаемые осцилляции определяются усреднением по всему объему образца и эффект перегрева электронного газа проявляет себя гораздо слабее. Кроме того, как ясно из рис. 2, соотношение $T^{*3} \sim I^2$ уже непосредственно не применимо.

Оценим теперь перегрев решетки за счет поглощения мощности из системы электронов. Выделяемая в канале микроконтакта мощность $Q = 10^{-3}$ вт создает перепад температур между осью $ОН$ и удаленной точкой образца $\Delta T \approx 10^{-3}$ К. Для этой оценки использованы данные работы [6] по коэффициенту теплопроводности висмута $\kappa \approx 5$ вт/см К. Заметим, что при этом длина пробега фононов $l \gtrsim 1$ мкм. Перепад температур на границе висмут – жидкий гелий согласно данным [7] при $T = 1,5$ К и $Q = 10^{-3}$ вт для нашего образца составляет $\Delta T_{гр} \lesssim 10^{-2}$ К. Приведенные оценки показывают, что обнаруженное уменьшение амплитуды осцилляций связано не с нагревом решетки, а с перегревом системы электронов.

В заключение отметим, что мы измеряли температуру лишь одной группы носителей. Однако, численные оценки показывают, что полное число носителей в канале микроконтакта и число электронов, инжектируемых из контакта за характерное время остывания системы носителей $t_0 \approx 10^{-7}$ сек по порядку величины сравнимы между собой. Таким образом, в канале микроконтакта все носители являются "горячими".

Авторы выражают благодарность В.С.Эдельману за предоставленные образцы висмута и полезные советы, А.Ф.Андрееву за подробное обсуждение результатов.

Институт
физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
29 декабря 1975 г.

Литература

- [1] Л.А.Фальковский. УФН, 94, 3, 1968.
- [2] М.И.Каганов, И.М.Лифшиц, Л.В.Танатаров. ЖЭТФ, 31, 232, 1956.
- [3] V. F. Gantmakher. Reports on progress in Phys., 37, 317, 1974.
- [4] А.М. Friedman. Phys. Rev., 159, 553, 1967.
- [5] И.М.Лифшиц, М.Я.Азбель, М.И.Каганов. Электронная теория металлов, М., 1971 г.
- [6] В.Н.Копылов, Л.П.Межов-Деглин. ФТТ, 15, 13, 1973.
- [7] J. D. Cheeke, V. Hebral, J. Richard, R. Turkington. Phys. Lett., 46A, 81, 1973.