

КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПРОВОДИМОСТИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ВИСМУТА

С.С.Мурзин, В.Т.Долгополов

Экспериментально исследованы квантовые осцилляции производной $\partial R/\partial E_n$, где R – сопротивление образца, а E_n – нормальное к поверхности висмута внешнее электрическое поле. Обнаружены осцилляции двух различных периодов, один из которых совпадает с периодом осцилляций Шубникова – де Гааза у электронов в объеме образца, а второй на $2,8 \pm 0,3\%$ меньше.

В ряде теоретических работ (см., например, ^{1, 2}) показано, что в проводниках на расстоянии порядка λ_F от поверхности (где λ_F – длина волны электронов на уровне Ферми) электронная плотность отлична от своего значения в объеме. (В висмуте $\lambda_F \approx 100 \div 1000 \text{ \AA}$). Возникающий в результате заряд приводит к собственному изгибу потенциала у поверхности. В настоящей работе наличие такого изгиба потенциала обнаружено экспериментально при изучении квантовых осцилляций проводимости у поверхности.

Для изучения проводимости у поверхности висмута использован эффект поля: зависимость сопротивления образца R от нормальной к поверхности компоненты внешнего электрического поля E_n . С этой целью одна из плоскостей образца, имевшего форму диска, диаметром 10 мм, была покрыта слоем диэлектрика (SiO), поверх которого напылена металлическая пленка (Al) в виде круга 5 мм в диаметре. К конденсатору, образованному образцом и металлическим электродом было приложено напряжение $U = U_0 + U_1 \cos \omega t$. Поле $E_n \propto U$. На боковой поверхности образца в диаметрально противоположных точках были сделаны два контакта, через которые по образцу пропускали постоянный ток I и с которых снимали измеряемое напряжение (см. вставку на рис. 1).

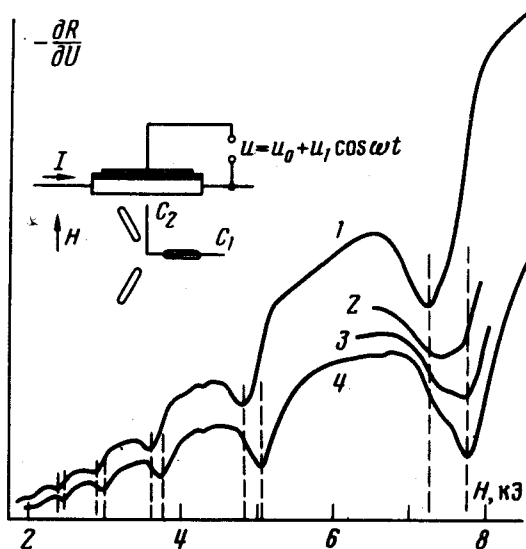


Рис. 1

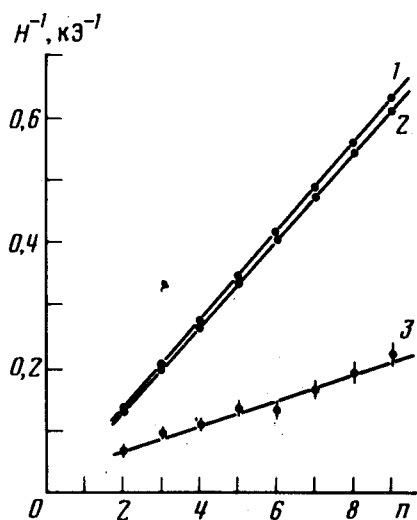


Рис. 2

Рис. 1. Осцилляции $\frac{\partial R}{\partial U}(H)$. $H \parallel N \parallel C_2$, $T = 1,6 \text{ К}$. Кривая 1 – $U_0 = 65,3 \text{ В}$; 2 – $U_0 = -18,8 \text{ В}$; 3 – $U_0 = -37,4 \text{ В}$; 4 – $U_0 = 65,3 \text{ В}$. На вставке схема измерений и электронные эллипсоиды ферми-поверхности висмута

Рис. 2. Зависимости положения минимумов осцилляций в обратном поле H^{-1} от номера минимума. Точки на прямых: 1 – для объемных осцилляций; 2 – для осцилляции $-\partial R/\partial U$ при $U_0 = -65,3 \text{ В}$; 3 – разность 1 и 2, умноженная на 10

Напряжение на образце помимо постоянной составляющей содержало переменную часть

$$V_{\sim} = I \frac{\partial R}{\partial U} U_1 \cos \omega t + \alpha R \omega C U_1 \sin \omega t.$$

Здесь C — емкость конденсатора Bi-SiO-Al , $\alpha \sim 1$, $R\omega C \ll 1$. Второе слагаемое обусловлено переменным током, протекающим по образцу через емкость C . Фазовым детектированием выделялся сигнал, пропорциональный $\partial R/\partial U$. Поскольку E_n экранируется в висмуте на глубине $\lambda_D \sim 100 \text{ \AA}$, то $\partial R/\partial U \propto \partial R/\partial E_n$ в значительной мере определяется электронными свойствами образца вблизи поверхности. Эксперимент состоял в измерении зависимостей $\partial R/\partial U$ от магнитного поля H при различных значениях U_0 .

Измерения выполнены на двух образцах, с толщинами 0,4 и 1 мм, выращенных в полированной кварцевой форме. Оба образца имели одинаковую ориентацию кристаллографических осей $C_2 \parallel N$, где N — нормаль к плоскости диска. Параллельно нормали в большей части измерений было ориентировано и внешнее магнитное поле.

Частота модуляции $\omega/2\pi$ составляла 17 Гц. Отношение толщины d пленки SiO к ее диэлектрической проницаемости ϵ , определенное по емкости C , было равно $d/\epsilon = 860 \text{ \AA}$.

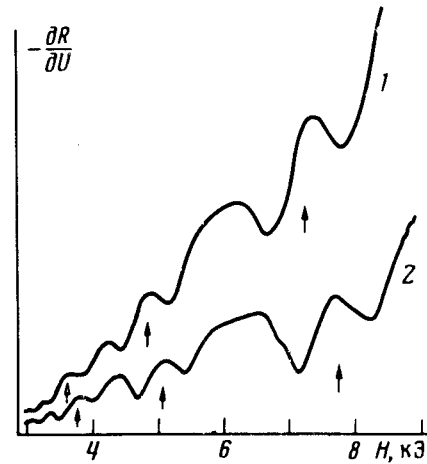


Рис. 3. Осцилляции $\frac{\partial R}{\partial U}(H)$ в наклонном магнитном поле, $\langle N, C_2 = 8^\circ$, $T = 1, 6 \text{ К}$. Кривая 1 — $U_0 = 65,3 \text{ В}$; 2 — $U_0 = -65,3 \text{ В}$

Экспериментальные результаты, полученные на обоих образцах, совпадали. Эффект поля был слабым: $(1/R)(\partial R/\partial U) \sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ В}^{-1}$. На зависимостях $\partial R/\partial U$ от H имеются осцилляции двух различных периодов (см. рис. 1). При положительном напряжении U_0 (электроны притянуты к поверхности, см. кривую 1 на рис. 1), положение минимумов осциллирующей части $\partial R/\partial U$ совпадает с положением минимумов осцилляций Шубникова — де Гааза в объеме образца. Эти осцилляции обусловлены двумя электронными эллипсоидами ферми-поверхности, наклоненными на 30° относительно нормали к поверхности образца. При отрицательных напряжениях (см. кривую 2 на рис. 1) минимумы осцилляций сдвинуты вправо. Эти осцилляции также периодичны в обратном поле (см. рис. 2), но период их на $2,8 \pm 0,3\%$ меньше, чем у объемных. Переход от осцилляции одного типа к другому происходит не путем плавного смещения минимумов при изменении U_0 , а за счет постепенного проявления минимумов нового периода (кривые 2, 3 на рис. 1). Осцилляции нового периода видны уже при небольших положительных значениях U_0 . По мере понижения U_0 их амплитуда растет. Период этих осцилляций, по крайней мере, когда они доминируют ($U_0 = -40 \div -80 \text{ В}$) практически не зависит от U_0 . При изменении угла между N и H осцилляции нового периода ведут себя совершенно аналогично осцилляциям, обусловленным электронами в толще металла (рис. 3): при наклоне магнитного поля в плоскости $C_1 C_2$ минимумы, соответствующие малым квантовым номерам, расщепляются, причем относительная величина расщепления одинакова для обоих периодов.

Наличие меньшего, по сравнению с объемным, периода квантовых осцилляций означают, что уровни Ландау у поверхности сдвинуты по энергии вниз, а вблизи поверхности имеется потенциальная яма для электронов. Неизменность периода осцилляций при сильно изменяющейся амплитуде указывает на то, что осцилляции нового периода связаны с собственным потенциальным рельефом у поверхности, а не с теми изгибами зон, которые могут возникнуть за счет внешнего электрического поля или из-за зарядов на границе Bi — SiO₂.

В принципе, возможны два варианта. Во-первых, новый период квантовых осцилляций может быть связан с наличием у поверхности двумерного электронного газа, локализованного в приповерхностной потенциальной яме, ширина которой не превышает $\max(\lambda_F, \lambda_D) \approx 1000 \text{ \AA}$. Однако в этом случае наклон внешнего магнитного поля должен различным образом сказываться на объемных осцилляциях и осцилляциях нового периода³, пока $\lambda_F < r$. (Здесь r — радиус электронной орбиты). Последнее неравенство заведомо было выполнено в эксперименте, поэтому опыты с наклоном магнитного поля исключают рассматриваемую возможность.

Во-вторых, при $\mathbf{H} \parallel C_2 \parallel \mathbf{N}$ плоскости орбит в координатном пространстве у электронов экстремальных сечений ферми-поверхности для двух из электронных эллипсоидов наклонены к поверхности образца. Следовательно, по мере приближения центра орбиты к поверхности образца часть электронной траектории оказывается проходящей через потенциальную яму. Это приведет к понижению энергии уровня Ландау у поверхности. По-видимому, такие поверхностные состояния с пониженным значением энергии уровня Ландау ответственны за появление осцилляций нового периода. Малое отличие нового периода от объемного связано с тем, что размер орбиты $\sim r$ гораздо больше ширины ямы $\sim \lambda_F$.

Авторы выражают глубокую благодарность за обсуждения В.Ф.Гантмахеру, Ф.Коху, Э.И.Рашба.

Литература

1. Константинов О.Ф. Шик А.Я. ЖЭТФ, 1970, 58, 1662.
2. Lang N.D., Kohn W. Phys. Rev., B, 1970, 1, 4555.
3. Недорезов С.С. ЖЭТФ, 1969, 57, 907.