

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ КОЛЛЕКТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ФОКУСИРОВКЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ВИСМУТЕ

В.С.Цой

В работе обнаружены короткопериодные осцилляции коллекторного напряжения при поперечной фокусировке электронов в висмуте, обусловленные, возможно, квантованием движения скачущих по поверхности электронов. Период осцилляций составляет $0,1 - 0,2$ э, тогда как поле фокусировки ~ 5 э.

В экспериментах [1] по наблюдению фокусировки электронов поперечным однородным магнитным полем ($\mathcal{E}\Phi$) в висмуте было обнаружено, что на коллекторе наблюдаются всплески напряжения в магнитных полях, кратных H_0 (при H_0 диаметр электронной траектории равен расстоянию между контактами), обусловленные зеркальным отражением электронов поверхностью образца. В [1] также было обнаружено, что первая линия $\mathcal{E}\Phi$ имеет тонкую структуру (ТС) (на рис. 2 из [1] хорошо разрешен дополнительный максимум в поле $\sim 4,5$ э, в то время как $H_0 = 6$ э). В данном сообщении приведены результаты изучения ТС, проведенные на установке с большим разрешением, чем использованная в [1].

Эксперимент проводился по схеме для наблюдения $\mathcal{E}\Phi$ [1]. На поверхность висмутовой монокристаллической пластины толщиной 2 мм на расстоянии L ($0,15 \div 0,3$ мм) друг от друга устанавливались два острия — эмиттер и коллектор. Через эмиттер пропускался ток, измерялась зависимость напряжения U на коллекторе от величины магнитного поля H . Измерения проводились на переменном токе. Диапазон рабочих частот $20 - 1000$ ич. Чувствительность установки по напряжению не хуже 10^{-11} в. В установке была предусмотрена возможность измерения производной $\partial U / \partial H$. При записи U через эмиттер пропускался переменный синусоидальный ток $I_{\mathcal{E}\Phi}^{\sim}$, при записи $\partial U / \partial H$ через эмиттер пропускался постоянный ток $I_{\mathcal{E}\Phi}^{\equiv}$, а магнитное поле H модулировалось по амплитуде. Измерения проводились на серии образцов, у которых ось C_2 лежала в плоскости образца, а ось C_3 составляла с нормалью к поверхности образца α угол ϕ ($\phi = 0; 30^\circ$). Линия контактов была направлена вдоль C_2 , что позволяло наблюдать поперечную фокусировку электронов центрального сечения одного из "эллипсоидов". На всех образцах наблюдалась $\mathcal{E}\Phi$ в кратных полях. Коэффициент зеркального отражения фокусируемых электронов, определенный из отношения амплитуд соседних линий $\mathcal{E}\Phi$ [1], у всех исследуемых образцов был не менее 0,5. Наряду с фокусировкой в кратных полях, как правило, на всех образцах наблюдалась ТС первой линии $\mathcal{E}\Phi$. На рис. 1 видны характерные особенности ТС, проявляющиеся в появлении дополнительных максимумов на кривой $U(H)$. Записи производной $\partial U / \partial H$ (кривые 2, 3 рис. 1) отчетливо показывают, что U осциллирует и расстояние между максимумами $\partial U / \partial H$ составляет несколько десятых эрстеда, тогда как $H_0 = 5,0$ э. Рельефность ТС, число максимумов, их положение на шкале H более чувствительны к качеству поверхности образца и к ориентации линии контактов относительно кристаллографических осей образца, чем $\mathcal{E}\Phi$. Характерными особенностями наблюдения

ТС являются узкая линия ЭФ и малые эмиттерные токи. При увеличении эмиттерного тока максимумы ТС смещаются и размываются. Когда $J_{\text{э}}^{\text{э}}$ течет из эмиттера в образец, при увеличении $J_{\text{э}}^{\text{э}}$ максимумы ТС смещаются в область меньших полей. При другом направлении тока максимумы ТС смещаются в область больших полей. Смещения различных максимумов ТС отличны. Отклонение \mathbf{H} от оси "эллипсоида" на угол ψ приводило к смещению максимумов в область больших полей пропорционально $\sec \psi$. ТС наблюдается лишь в полях $\leq H_0$ и в отличие от линий ЭФ не проявляется в кратных полях. Температурная зависимость амплитуд максимумов ТС различна (ср. кривые 2, 3 рис. 1, записанные соответственно при 1,8 и 4,2 К).

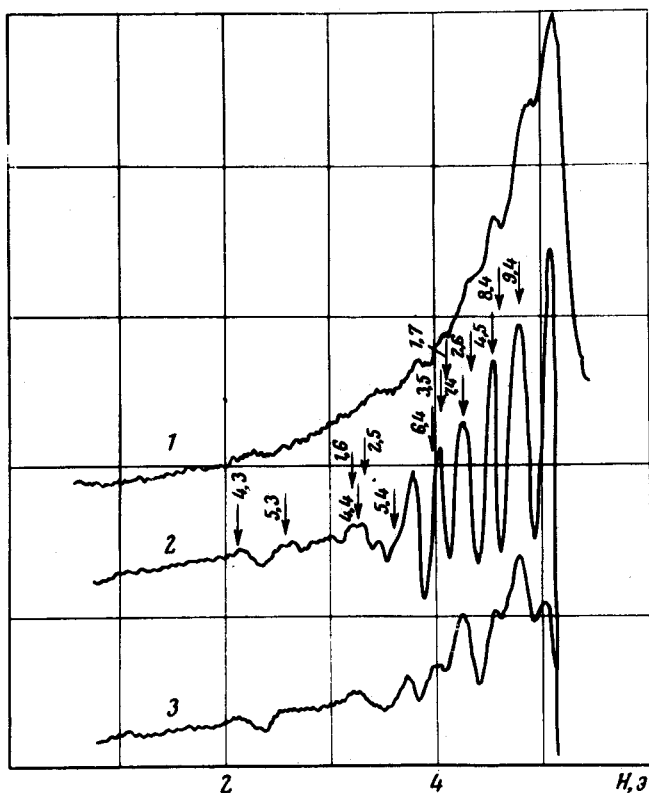


Рис. 1. $\phi = 30^\circ$, $L = 0,23$ мм $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$, \mathbf{C}_2 . Кривая 1 - $J_{\text{э}}^{\text{э}} = 0,2$ ма, $T = 1,8$ К. Кривые 2, 3 - $J_{\text{э}}^{\text{э}} = 1$ ма, амплитуда модуляционного поля равна $0,04$ э

Одной из причин ТС короткопериодных осцилляций коллекторного напряжения может быть квантование траекторий скачущих электронов (КТЭС). Учет в слабом магнитном поле квантового характера движения скачущего по поверхности электрона при зеркальном отражении от нее (траектория такого типа показана на рис. 2, дуга ACB) позволил объяснить [2] наблюдавшиеся ранее осцилляции Хайкина [3]. Вследствие КТЭС разрешены (см., например, [4]) траектории ACB (рис. 2) с определенными значениями AB , такими что магнитный поток Φ , пронизывающий площадь сегмента ACB , равен $\Phi_0 (n + 1/4)$, где квантовое число $n = 1, 2 \dots$, Φ_0 - квант потока [2, 4]. На рис. 2 приведены вычисленные значения AB для поверхности Ферми, представляющей эллиптический цилиндр с полуосями $P_1 = 5,4 \cdot 10^{-22}$ г.см/сек и $P_2 = 7,9 \cdot 10^{-22}$ г.см/сек. P_1, P_2 - размеры центрального сечения электронного "эллипсоида" вис-

мута [4]). На рис. для кривых указаны значения $n = 1 \div 10$ и отмечены величины AB , укладывающиеся целое m число раз между контактами в случае геометрии эксперимента, результаты которого представлены на рис. 1. ($L = mAB$, $m = 2 \div 8$). Эффективные электроны, вылетевшие из эмиттера и попадающие в коллектор, можно классифицировать по траекториям, определяемым двумя числами (n, m), n — квантовое число, m — число скачков. Принципиальная возможность существования квантового размерного эффекта при ЭФ отмечена в [5] и обусловлена тем, что электроны летящие по траектории (n, m) могут попасть в коллектор лишь при определенных значениях $H = H_{n, m}$, что и должно приводить к осцилляциям $U(H)$. Очевидно относительно большие размеры контактов должны затруднять разрешение всплесков U , обусловленных электронами с большими n . С другой стороны при малых n электрон влетает в коллектор под малым углом и чрезвычайно чувствителен к микроструктуре коллектора и дефектам поверхности около коллектора, безусловно возникающим при установке остриев, что снижает эффективность электронов с малыми n . Вследствие увеличения вероятности диффузного отражения из-за увеличения числа столкновений с поверхностью мала эффективность электронов с большими m . Реальная поверхность имеет различные случайные локальные дефекты, которые могут по разному влиять на электроны с различными (n, m) и даже исключать серии с определенными m .

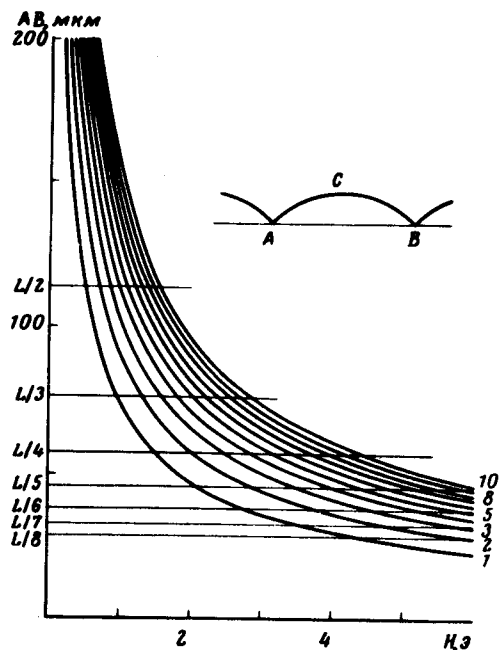


Рис. 2

На рис. 1 стрелками с номерами отмечены поля $H_{n, m}$, определяемые пересечениями кривых $AB(H, n)$ с прямыми L/m , находящимися в окрестности $\pm 0,1$ э от максимума $\partial U / \partial H$ (с учетом отклонения H от направления большей полуоси электронного "эллипсоида"). Из рис. 1 видно, что предложенный механизм позволяет удовлетворительным образом объяснить особенности ТС. В окрестности максимумов $\partial U / \partial H$ в интервале полей 2 — 5 э попало большинство $H_{n, m}$ (см. рис. 2) с $m = 4, 5, 6, 7, n \leq$

≤ 10 (кроме 2,4; 10,4; 1,5; 5,5; 6,5; 3,6; 2,7). Учет КТСЭ позволяет также объяснить: 1) отсутствие ТС в кратных полях; 2) смещение ТС при увеличении и изменении направления J_3^{\pm} . При увеличении J_3^{\pm} становится заметным вклад поля эмиттерного тока J_3^{\pm} в магнитный поток, пронизывающий электронную траекторию, и траектории, по-видимому, подстраиваются таким образом, чтобы сохранился без изменения пронизывающий ее поток Φ , что и должно приводить к смещению ТС подобному наблюдаемому экспериментально; 3) смещение ТС при отклонении \mathbf{H} от направления бóльшей полуоси электронного "эллипсоида" на угол ψ .

Не исключено, что ряд особенностей ТС обусловлен интерференцией или дифракцией электронов. При значениях параметров — $L \sim 10^{-2}$ см, размер эмиттера (коллектора) $\sim 10^{-4}$ см, длина волны электрона $\sim 10^{-5}$ см — должны проявиться волновые свойства электронов.

Автор благодарен М.С.Хайкину, В.Ф.Гантмахеру, В.К.Ткаченко за обсуждение результатов.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 февраля 1977 г.

Литература

- [1] В.С.Цой. Письма в ЖЭТФ, 19, 114, 1974.
 - [2] Т.В.Нее, Р.Е.Пранге. Phys. Lett., 25A, 582, 1967.
 - [3] М.С.Хайкин. ЖЭТФ, 39, 212, 1960.
 - [4] М.С.Хайкин. УФН, 96, 409, 1968.
 - [5] В.С.Цой. ЖЭТФ, 68, 1849, 1975.
-