

Письма в ЖЭТФ, том 17, вып. 9, стр. 491 – 494.

5 мая 1973 г.

ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС НА НЕЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОРБИТАХ

А. П. Володин, В. С. Эдельман, М. С. Хайкин

Обнаружено новое явление – циклотронный резонанс на неэкстремальных орbitах, происходящий на границе спектра циклотронных частот, искусственно создаваемой путем отсекания толщиной образца орбит электронов, принадлежащих сечениям поверхности Ферми, больших некоторого граничного. Явление, наблюденное на висмуте при частоте ~ 9 Гц и температуре $0,35^{\circ}\text{K}$, открывает возможность исследования свойств электронов, принадлежащих неэкстремальным сечениям поверхности Ферми.¹

Все методы исследования динамики определенных групп электронов проводимости металлов, основанные на использовании циклотронного резонанса (ЦР), квантовых осцилляций, размерных эффектов и др., дают сведения только об электронах, принадлежащих экстремальным сече-

ниям поверхности Ферми (ПФ). В случае выпуклой ПФ (рис. 1, а) это – центральное сечение и опорная точка, которым соответствуют экстремальные значения эффективной массы m^* и циклотронной частоты $\Omega = eH/m^* c$ (рис. 1, б). Единственная известная принципиальная возможность изучения свойств электронов, принадлежащих промежуточным сечениям ПФ, заключается в использовании квантового ЦР [1], который должен происходить на дискретных промежуточных частотах, возникающих вследствие разбиения спектра $\Omega(p_y)$ квантовыми уровнями Ландау. Однако крайне жесткие условия разрешения делают невозможным обнаружение квантового ЦР на образцах достижимого в настоящее время качества.

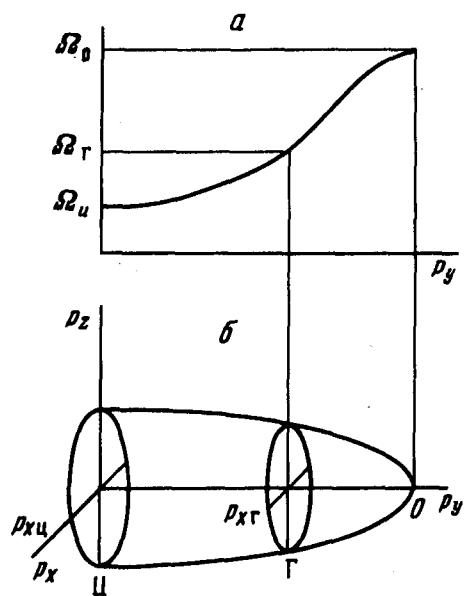


Рис. 1

В этом сообщении описаны сущность и первые опыты по наблюдению нового эффекта – ЦР на неэкстремальных орбитах, позволяющего изучать электроны, принадлежащие промежуточным сечениям ПФ.

Рассмотрим движение электронов в плоской металлической пластине толщины d_z , помещенной в магнитное поле $H = H_y$, параллельное ее поверхности (x, y). Диаметры траекторий электронов равны $D_z = 2p_x c/eH$, где $2p_x$ – диаметры соответствующих сечений ПФ. Если для центрального сечения $D_{z_Ц} > d_z$, то имеет место явление отсекания ЦР [2] и движение без столкновения с поверхностью металла возможно только для электронов, принадлежащих сечениям части ПФ от опорной точки О до граничного сечения Г (рис. 1, а), определяемого равенством $D_{z_Г} = d_z$. Таким образом в спектре $\Omega(p_y)$ создается искусственная граница $\Omega_\Gamma(p_{y_Г})$ (рис. 1, б), на которой возможен классический ЦР. Амплитуда этого ЦР на неэкстремальной орбите должна быть меньше, чем ЦР на центральном сечении, вследствие относительной малости плотности состояний. Принимая во внимание существование зеркального ЦР [3], следует отметить, что наблюдение ЦР на неэкстремальной орбите требует значительного превышения объемного времени релаксации электронов над поверхностным.

Прямым результатом изучения ЦР на неэкстремальных орбитах является определение зависимости $m^*(p_x)$. Наличие параллельной \mathbf{H} компоненты фермиевской скорости v_H у электронов нецентральных сечений приведет к допплеровскому расщеплению (или сдвигу) резонансов при наклонении поля \mathbf{H} относительно поверхности образца; измерение этого эффекта при известной ПФ позволит найти распределение высокочастотного поля в металле [4].

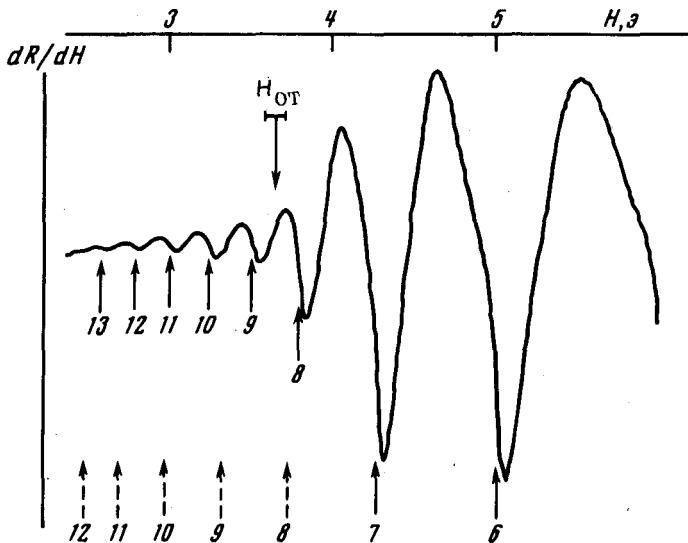


Рис. 2. Запись спектра ЦР на монокристалле висмута толщиной 190 мк, $\mathbf{H} \parallel C_2 \perp E$, $k \parallel C_3$, $f = 9,14 \text{ Гц}$. Числы под кривой указывают порядок наблюдаемого ЦР. $H_{\text{от}}$ — поле отсекания ЦР, вычисленное по импульсу электронов центрального сечения ПФ [7]. В нижней части рисунка приведены расчетные положения серий линий ЦР на центральном сечении ПФ

Эксперименты по наблюдению ЦР на неэкстремальных орбитах выполнены на тонких плоских монокристаллах висмута, выращенных в квадровой форме [5]. На рис. 2 приведена запись опыта с образцом толщиной $d_z = 190 \text{ мк}$, тригональная ось которого параллельна нормали к его поверхности. Частота измерительного поля $f = \omega / 2\pi = 9,14 \text{ Гц}$, температура образца $0,35 \text{ К}$. Качество образца характеризуется параметром $\omega\tau = 85 \div 90$ (τ — время релаксации). Записываемый сигнал dR/dH получается благодаря зависимости от H амплитуды генерации автогенератора на частоту ω , содержащего резонатор с образцом в цепи обратной связи [6].

При поле H большем поля отсекания $H > H_{\text{от}} = 2p_{x,\Gamma} c / e d_z$ наблюдаются ЦР порядка $n = 1 \div 8$ на центральном сечении ПФ, периодичные в функции от H^{-1} . При $H < H_{\text{от}}$ наблюдаются ЦР на неэкстремальном граничном сечении (Γ , рис. 1, a), положение которого на ПФ определяется соотношением $p_{x,\Gamma} = eHd_z / 2c$, при условии

$$\omega/n = \Omega_\Gamma = eH/c m^*(p_{x,\Gamma}),$$

где порядок резонанса $n > 8$. Неэкстремальные ЦР примерно на порядок слабее экстремальных и их положение в поле не связано с какой-

либо периодичностью. Опыты с изменением частоты ω и с наклоном поля H дают результаты, полностью согласующиеся с описанными особенностями явления.

Измерения показали, что эффективная масса на электронной ПФ висмута при поле, параллельном большой оси эллипсоида, увеличивается на $8 \pm 1\%$ при уменьшении p_x от $p_{x\text{ц}}$ до $0,75 \cdot p_{x\text{ц}}$.

Обнаруженный в данной работе циклотронный резонанс на неэкстремальных орбитах вполне может наблюдаться на ряде металлов. Этот эффект дает возможность исследовать свойства тех групп электронов, для экспериментального изучения которых до сих пор не существовало никаких средств.

П.Л.Калице авторы благодарны за внимание к работе, И.Я.Краснополину, В.М.Пудалову и С.М.Черемисину – за ее обсуждение.

Институт физических проблем

Поступила в редакцию

Академии наук СССР

29 марта 1973 г.

Литература

- [1] И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 40, 1235, 1961.
 - [2] М.С.Хайкин. ЖЭТФ, 41, 1773, 1961.
 - [3] М.С.Хайкин, В.С.Эдельман. ЖЭТФ, 47, 877, 1964.
 - [4] Р.Т.Мина, М.С.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, 1, 40, 1965.
 - [5] М.С.Хайкин, С.М.Черемисин, В.С.Эдельман. ПТЭ, №4, 225, 1970.
 - [6] М.С.Хайкин. ПТЭ, №3, 95, 1961.
 - [7] В.С.Эдельман. ЖЭТФ, 64, 1734, 1973.
-