

# О ПРИЧИНЕ БИЕНИЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЭФФЕКТА де ГААЗА – ван АЛЬФЕНА В МЕТАЛЛАХ ТИПА ВИСМУТА

*А.М.Ермолаев, М.И.Катапов*

В экспериментах Брандта и Любутиной [1] по наблюдению эффекта де Гааза – ван Альфена у висмута с примесями было обнаружено, что в ряде случаев наблюдаются четко выраженные биения.

Цель этой заметки – дать возможное объяснение картины биений на основе анализа электронного энергетического спектра  $V_i$  с примесями, помещенного в магнитное поле.

Основные закономерности наблюдаемого эффекта таковы:

1. Биения наблюдаются в случае малой концентрации примесей донорного типа (например,  $Te$  или  $Se$  в решетке  $V_i$ ).

2. Частота биений зависит от рода примесных атомов, но всегда пропорциональна частоте основной гармоники осцилляций.

Отметим еще, что в цитированной работе биения наблюдались в той части осцилляционной зависимости магнитного момента от поля, которая обусловлена электронной частью поверхности Ферми висмута.

Перечисленные особенности можно понять, если учесть деформацию электронного энергетического спектра металла в магнитном поле под влиянием примесей.

Если электрон проходит вблизи положительно заряженного примесного атома, то возможно появление не только локального состояния, обнаруженного Ю.Бычковым [2], но и квазилокального (о квазилокальных уровнях см. [3, 4]). В последнем случае квантовые состояния электрона соответствуют движению частицы вблизи примесного атома с редкими переходами к одному из соседних атомов примеси. Квантование электронных орбит в магнитном поле приводит к совокупности квазилокальных уровней, чередующихся с уровнями Ландау.

Уравнение для локальных и квазилокальных уровней, как известно [4], имеет вид

$$1 + U_0 F(E) = 0, \quad (1)$$

где  $F(E)$  – реальная часть гриновской функции электрона в идеальном металле при наличии магнитного поля,  $U_0$  пропорционально длине рассеяния. При выводе этого уравнения закон дисперсии электрона предполагается квадратичным, а рассеивающий потенциал примеси  $\delta$  – об-разным. Концентрация примеси, хаотически распределенной по кристаллической решетке, естественно, предполагается малой.

Подробный вывод и анализ уравнения (1) будет предметом отдельной статьи одного из авторов. Если графически решить уравнение (1) и вспомнить, что плотность невозмущенных примесями состояний убывает при подходе к уровням Ландау со стороны меньших энергий, то приходим к выводу, что при сколь угодно малом положительном  $U_0$  (положительно заряженные примеси) в спектре электрона возникают квазилокальные уровни, перемежающиеся с уровнями Ландау. Количество квазилокальных уровней между соседними уровнями Ландау существенно зависит от вида рассеивающего потенциала, однако главную роль всегда будет играть ближайший к уровню Ландау (со стороны меньших

энергий) квазилокальный уровень, так как он имеет наименьшее размытие. Поэтому, по сути дела, все рассмотрение не зависит от вида рассеивающего потенциала. Подчеркнем только, что квазилокальный уровень тем уже, чем ближе он расположен к уровню Ландау и, следовательно, с этой точки зрения "выгодно" малое значение параметра  $U_0$ . С ростом  $U_0$  квазилокальный уровень размывается.

Положение квазилокального уровня определяется формулой [5]

$$E_n = \hbar \omega_c \left( n + \frac{1}{2} \right) - \Delta,$$

$$\Delta = \frac{m^3 \omega_c^2}{8 \pi^2 \hbar^4} U_0^2 \quad (\Delta \ll \hbar \omega_c)$$

( $m$  — эффективная масса электрона,  $\omega_c = eH/mc$  — циклотронная частота).

Дискретная совокупность уровней, расстояния которых до соответствующих уровней Ландау нелинейно зависят от магнитного поля, дает дополнительный осциллирующий вклад в магнитный момент. Частота  $\Omega$  этих осцилляций (амплитуда которых пропорциональна концентрации примеси) находится из условия

$$\epsilon_F = \hbar \omega_c \left( n + \frac{1}{2} \right) - \Delta,$$

где  $\epsilon_F$  — энергия Ферми. Отсюда

$$\Omega = \Omega_0 \left( 1 + \frac{\Delta}{\epsilon_F} \right).$$

Здесь  $\Omega_0 = c S_{\text{ext}} / e h$  — частота основной гармоники [5].

Таким образом, квазилокальные уровни приводят к дополнительным осцилляциям, частота которых не много отличается от  $\Omega_0$ , так как  $\Delta \ll \epsilon_F$ . В результате сложения этих колебаний с основными получаются биения, причем частота биений

$$\delta \Omega = \frac{\Delta}{\epsilon_F} \Omega_0$$

пропорциональна частоте осцилляций. Амплитуда биений пропорциональна объемной концентрации примеси  $x$  и по порядку величины равна  $x \rho^3$ , где  $\rho = \sqrt{c \hbar / e H}$  — минимальная магнитная длина. С ростом концентрации примесей амплитуда осцилляций убывает. Вся картина делается менее четкой. Одновременно должны расширяться квазилокальные уровни (линейная теория этого не улавливает) и, конечно, разрешить биения уже невозможно.

Из уравнения (1) ясно, что  $\Delta$ , а значит и частота биений, зависит от  $U_0$ , т.е. от рода примесей. В частности, с ростом  $U_0$  частота биений растет. Экспериментальные исследования биений позволяют судить о характере взаимодействия электронов с примесями.

Из сказанного ясно, что описанная здесь картина биений существенно связана со знаком  $U_0$ . Система квазилокальных уровней возникает только при  $U_0 > 0$ , что соответствует притяжению электронов примесными атомами. В экспериментах Брандта и Любутиной [1] биения наблюдались при внесении в висмут Те и Се, которые, согласно существующим представлениям [1, 6], ведут себя как доноры, т.е. заряжаются положительно в решетке висмута.

Окончательное подтверждение высказанной здесь гипотезы может быть получено путем наблюдения биений на дырочной части зависимости момента от поля при внесении акцепторных примесей. Последнее замечание принадлежит Н.Б.Брандту, которому мы выражаем благодарность за полезные дискуссии.

Харьковский  
Государственный университет  
им.А.М.Горького

Поступило в редакцию  
12 октября 1967 г.

### Литература

- [1] Н.Б.Брандт, Л.Г.Любутина. ЖЭТФ, 52, 686, 1967.
- [2] Ю.А.Бычков. ЖЭТФ, 39, 689, 1960.
- [3] Ю.Каган, Я.Иосилевский. ЖЭТФ, 42, 259, 1962; R.Brout, W.Visscher. Phys. Rev. Lett., 9, 54, 1962.
- [4] I.M.Lifshitz, A.M.Kosevich. Repts Progr. Phys., 29, 217, 1966.
- [5] И.М.Лифшиц, А.М.Косевич. ДАН СССР, 96, 963, 1954.
- [6] Н.Е.Алексеевский, Т.И.Костина. ЖЭТФ, 41, 1722, 1961.

Технический редактор Р.Д.Чермашенцева

---

Т15515. Подписано к печати 22/XI-1967 г. Тираж 1260 экз. Зак. 535/1412  
Формат бумаги 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ.л. 3,875+1 вкл. Бум.л.1,937.Уч.-изд.л.5,425

---

Офсетное производство 3-й типографии издательства "Наука"  
Москва, Армянский пер., 2