

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕЖДУЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЕДИ

В. П. Силин, О. М. Толкачев

УДК 538.569

Рассматривается возможность определения параметров междуэлектронного взаимодействия в меди на основании теоретической интерпретации экспериментальных данных по осцилляциям поверхностного импеданса в области частот, близких к частотам переходов между уровнями скользящих электронов.

В нашей работе /1/ развита теория циклотронного резонанса на скользящих орбитах в электронной жидкости металлов и полуметаллов с произвольной поверхностью Ферми, использованная нами позднее в работах /2,3,4/ для интерпретации экспериментальных данных, полученных на висмуте. В работе /5/ опубликованы экспериментальные данные по осцилляциям поверхностного импеданса меди, связанным с переходами между уровнями скользящих электронов. Измерения в /5/ проведены в СВЧ диапазоне на частоте $\omega/2\pi = 35,9$ ГГц. Наличие таких данных о резонансных значениях магнитных полей, полученных с точностью, лучшей 1%, указывает на необходимость теоретического анализа возможности определения величины междуэлектронного взаимодействия в меди. Эта необходимость связана также тем, что поверхность Ферми меди хорошо изучена (см., например, /6,7,8/). С точностью до 0,2% она описывается формулой (1) из работы /9/.

В работе /5/ приведены экспериментально определенные значения резонансного магнитного поля B_{21} , отвечающего переходу между поверхностными уровнями с квантовыми числами 1 и 2, при различных ориентациях постоянного магнитного поля в относительно кристаллографических осей образца. В соответствии с /1/, мы ниже считаем координатную ось y , направленной перпендикулярно по-

верхности образца вглубь металла, параллельное поверхности образца магнитное поле B , направленным вдоль оси z , а ось x - параллельной поверхности металла.

Согласно нашей теории /1/, междуэлектронное взаимодействие приводит к сдвигу резонансного значения магнитного поля B_{21} от значения B_{21}^0 , вычисленного по теории, не учитывающей ферми-жидкостного взаимодействия электронов. Относительная величина такого сдвига равна:

$$\left(\frac{B_{21}^0}{B_{21}}\right)^{2/3} - 1 = - \frac{\omega_{21}}{\omega_{21}^0} \frac{2^{11/3} 3^{1/3} \pi^4}{a_2 - a_1} \frac{\alpha^2 \hbar^2 \Omega_{21}^2}{(eB_{21}/c\Omega)^2 v_x^2 (\partial v_y / \partial p_y)}. \quad (I)$$

Здесь e - заряд электрона, c - скорость света, ω_{21} и $\omega_{21}^0 = \partial^2 \omega_{21} / \partial p_x^2$ - значения частоты перехода между квантовыми уровнями поверхностных электронов с номерами 2 и 1 и ее второй производной по проекции импульса p_x , вычисленные в точке, отвечающей экстремуму $\omega_{21}(p_x)$, α - постоянная взаимодействия (см./1/), Ω - циклотронная частота, v_x и $\partial v_y / \partial p_y$ - компонента скорости и производная скорости на поверхности Ферми, J_{21} - матричный элемент, равный, согласно /3/, $J_{21} = 0,160$, a_2 и a_1 - корни функции Эйри ($a_2 - a_1 = 1,7498$). Вычисленное без учета взаимодействия электронов значение B_{21}^0 , согласно /3/, равно:

$$B_{21}^0 = 0,61097 \frac{(\hbar\omega)^{3/2} c}{\hbar |e| v_x (\partial v_y / \partial p_y)^{1/2}}.$$

Переходя к обсуждению возможности интерпретации экспериментальных данных работы /5/, мы обратимся к наиболее простому случаю, когда магнитное поле B лежит в кристаллографической плоскости (100) и параллельно кристаллографической оси [100]. В этом случае найденное в /5/ резонансное значение магнитного поля равно $B_{21} = 22,7 (1 \pm 0,007)$ Э.

Используя формулу (I) из работы /9/ мы получаем значение скорости v_x на поверхности Ферми:

$$v_x = 0,1870 (1 \pm 0,009) 10^{19} \text{ см/эрг.с.} \quad (2)$$

Здесь учтена погрешность 0,2% в определении радиуса-вектора поверхности Ферми в модели Халса /9/. Константу C_0^0 находим, сравнивая (2) с экспериментально определенным значением скорости v_x на поверхности Ферми. Такое определение C_0^0 необходимо для нахождения входящей в определение B_{21}^0 величины $\partial v_y / \partial p_y$ (пропорциональной C_0^0), которая в экспериментах /9 - 12/ непосредственно не определялась. В экспериментальных данных по определению v_x имеется определенный разброс. Например, в работе /9/ приводится найденное из анализа данных по эффекту де Гааза-ван Альфена значение $v_x = 1,04(1 \pm 0,05)10^8$ см/с. Использование такого значения дает для C_0^0 величину $C_0^0 = 5,56(1 \pm 0,06)10^{-12}$ эрг, а $\partial v_y / \partial p_y = 2,58(1 \pm 0,06) \cdot 10^{27}$ г⁻¹. В более поздних работах /10, 11/, нацеленных непосредственно на определение значений фермиевских энергии и скорости из анализа данных по циклотронному резонансу на объемных электронах и эффекту де Гааза-ван Альфена, приведено значение скорости $v_x = 1,111(1 \pm 0,017)10^8$ см/с. Использование такой величины v_x приводит к значению $C_0^0 = 5,941(1 \pm 0,026)10^{-12}$ эрг и $\partial v_y / \partial p_y = 2,752(1 \pm 0,026)10^{27}$ г⁻¹. Согласно экспериментальным данным /12/ $v_x = 1,08(1 \pm 0,01)10^8$ см/с, $C_0^0 = 5,78(1 \pm 0,02)10^{-12}$ эрг и $\partial v_y / \partial p_y = 2,68(1 \pm 0,02)10^{27}$ г⁻¹.

Воспользовавшись полученными результатами и учитывая, что в /5/ $\omega/2\pi = 35,9$ ГГц, находим для магнитного поля B_{21}^0 и отношения B_{21}^0/B_{21} следующие выражения

$$B_{21}^0 = \begin{cases} 24,60(1 \pm 0,09) \text{ Э (по данным /9/),} \\ 22,81(1 \pm 0,04) \text{ Э (по данным /10, 11/),} \\ 23,33(1 \pm 0,03) \text{ Э (по данным /12/),} \end{cases} \quad (3)$$

$$\left(\frac{B_{21}^0}{B_{21}}\right)^{2/3} - 1 = \begin{cases} 0,050 \pm 0,060 \text{ (по данным /9/),} \\ 0,003 \pm 0,027 \text{ (по данным /10, 11/),} \\ 0,018 \pm 0,020 \text{ (по данным /12/).} \end{cases} \quad (4)$$

Если полученные для "сферической" части поверхности Ферми меди значения (3) и (4) использовать для определения величины константы ферми-жидкостного взаимодействия α по формуле:

$$\alpha^2 = -\frac{\omega_{21}''}{\omega_{21}} (a_2 - a_1) \frac{(eB/c\Omega)^2 v_x^2 (\partial v_y / \partial p_y)}{(2\pi)^4 \hbar^4 \omega_{21}^2} \left[\left(\frac{B_{21}^0}{B_{21}}\right)^{2/3} - 1 \right], \quad (5)$$

следующей из (I), то удается оценить верхнюю границу для величины константы ферми-жидостного взаимодействия

$$0 \leq \alpha_{Cu} \leq \begin{cases} 0,72 \cdot 10^{21} \text{ с/г} \cdot \text{см} & (\text{по данным /9/}), \\ 0,41 \cdot 10^{21} \text{ с/г} \cdot \text{см} & (\text{по данным /10, 11/}), \\ 0,45 \cdot 10^{21} \text{ с/г} \cdot \text{см} & (\text{по данным /12/}). \end{cases} \quad (6)$$

Верхняя граница величины α фактически определяется в данном случае величиной ошибки измерений $(V_{21}^0/V_{21})^{2/3} - 1$. Улучшение одной только точности измерения v_x не приведет к определению нижней границы α в силу того, что ошибка 0,2% в определении радиуса-вектора в модели Халса все еще велика для определения в отдельности верхней и нижней границ α в меди. Для решения такой задачи необходимо увеличить точность определения радиуса-вектора поверхности Ферми, как минимум в три раза. С другой стороны, было бы также желательным поднять частоту ω , использованную в экспериментах /5/ на один-два порядка (перейти в ИК диапазон), а также получить данные о положениях резонансных пиков импеданса с номерами, отличающимися от $n = 2$, $n = 1$. Такая информация даст возможность отказаться от привлечения данных о величине фермиевской скорости (или энергии) и определять значения α непосредственно из данных по резонансам на магнитных поверхностных уровнях (ср. /3, 4/).

Мы признательны И. Ф. Волошину, В. А. Гаспарову и Л. М. Фишеру, обратившим наше внимание на данные /12/.

Поступила в редакцию

3 октября 1980 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. П. Силин, О. М. Толкачев, ЖЭТФ, 74, 2138 (1978).
2. В. П. Силин, О. М. Толкачев, ФТТ, 21, 1300 (1979).
3. В. П. Силин, О. М. Толкачев, ФТТ, 22, 374 (1980).
4. И. Принхалтер, В. П. Силин, О. М. Толкачев, Препринт ФИАН № 4; 1980 г.
5. R. W. Dorezema, J. F. Koch, Phys. Rev., B5, 3866 (1972).
6. F. Garcia-Moliner, Phil. Mag., 2, 207 (1958).
7. А. Крэкнелл, К. Уонг, Поверхность Ферми, Атомиздат, М., 1978 г.

8. D. J. Roaf, Phil. Trans. Roy. Soc., A255, 135 (1962).
9. M. H. Halse, Phil. Trans. Roy. Soc., A265, 507 (1969).
10. M. Lee, Phys. Rev., B2, 250 (1970).
11. M. Lee, Phys. Rev., 187, 901 (1969).
12. B. Langler et. al., Phys. Rev., B15, 5493 (1977).