

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТ ДЕ ГААЗА – ВАН АЛЬФЕНА И ОБМЕННОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ В ЖЕЛЕЗЕ

Л.И.Винокурова, А.Г.Гапотченко, Е.С.Ицкевич

Измерено влияние давления на частоты осцилляций; вычислено изменение положения энергетических зон и изменение намагниченности.

Ряд обстоятельных экспериментальных работ позволил установить основные части ферми-поверхности (ФП) ферромагнитного железа [1 – 3]. Основным методом определения ФП являлся эффект де Гааза – ван Альфена (ДГВА). Эти работы подтвердили основные результаты расчетов спектра, сделанных Вудом [4], Вако и Ямашитой [5] и уточненных Голдом с сотрудниками [1].

В зоне с меньшей величиной заполнения (спин "вниз"), пересекающиеся несколько ниже уровня ферми термы Δ'_2 , Δ_5 и Δ_2 (рис. 1) образуют часть ФП "валет", в шести "шейках" которого на осях ГН зоны Бриллюэна находятся "линзы" (см. рис. 6 из [1]), образованные термами Δ_2 и Δ'_2 и отделенные спин-орбитальным взаимодействием от шейки. По данным [1] линза представляет собой почти сферу, отклонение от сферичности менее 8%. Осцилляции ДГВА для линзы сравнительно легко измерить, ее строение хорошо изучено. Кроме того, сама природа линзы делает ее величину чувствительной к положению уровня Ферми.

В работе [6] была сделана попытка исследовать температурную зависимость площади сечения линзы в области 1 – 4 К с целью свя-

зать ее с изменением величины обменного ферромагнитного расщепления Δ_0 . Однако, относительное изменение частоты осцилляций ДГВА между 1 и 4К оказалось очень малым ($\Delta F/F = 10^{-5}$, т. е в пределах ошибки измерений).

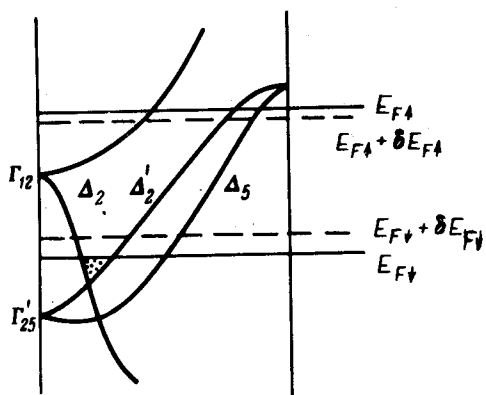


Рис. 1. Часть зонного спектра железа вдоль направления ГН. При изменении ферромагнитного расщепления происходит изменение величины сечения "линзы"

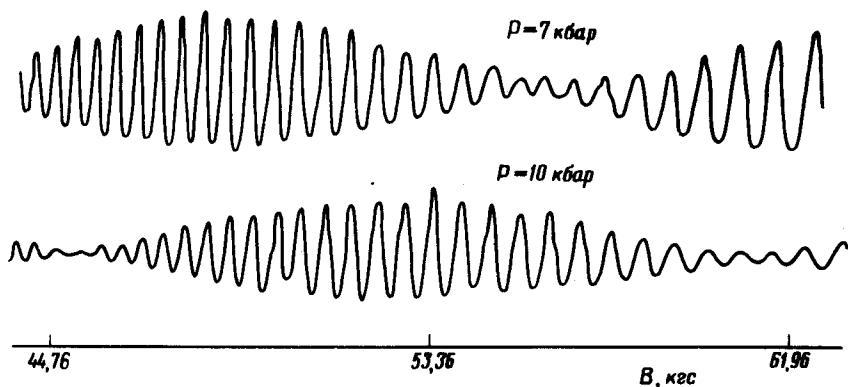


Рис. 2. Вид осцилляционных кривых при $H \parallel [110]$. Видно смещение под давлением узла биений и уменьшение числа осцилляций между узлами и пучностью при повышении давления

Мы исследовали влияние давления до 11 кбар на сечения линзы при направлениях магнитного поля вдоль кристаллографических осей [100], [110], [111]. Измерялись частоты осцилляций ДГВА в интервале полей до 80 кэ у двух сферических монокристаллов железа. Сжатие создавалось с помощью камеры фиксированного давления [7].

При $H \parallel [100]$ и [110], из-за некоторой несферичности линзы имеются два типа близких по площади сечений, дающих биения осцилляционных кривых, пример которых приведен на рис. 2. Результаты анализа экспериментального материала приведены на рис. 3. На этом рисунке даны зависимости $F(P)$ для направлений магнитного поля вдоль указанных кристаллографических осей. Методом наименьших квадратов вычислены величины $d \ln S / dP$; ошибка равна величине дисперсии.

$$\frac{d \ln S [100]}{dP} = (0,85 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \text{ кбар}^{-1}, \quad \frac{d \ln S [111]}{dP} = (0,80 \pm 0,05) \cdot 10^{-2},$$

$$\frac{d \ln S [110]}{dP} = (0,90 \pm 0,10) \cdot 10^{-2}. \text{ Бóльшая величина ошибки при } \vec{H} \parallel [100]$$

связана с подмешиванием осцилляций от шейки валета. Хотя из полученных результатов можно усмотреть тенденцию к увеличению вытянутости линзы, мы считаем, что в пределах ошибки давление не изменяет степень ее изотропности. Изотропность линзы и угловой зависимости $d \ln S / dP$ позволяет предположить, что давление не изменяет эффективную массу ($m_{\vec{p}=0}^* = 0,71 m_0$ [1]), т. е. наклона дисперсионных кривых, образующих линзу, относительно оси ГН.

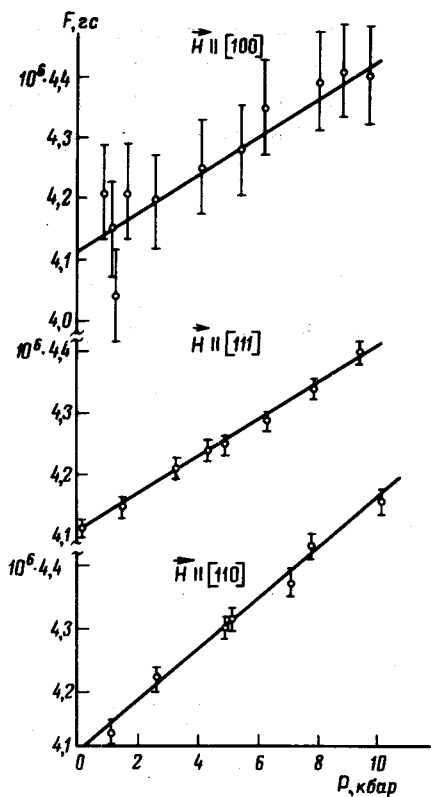


Рис. 3. Зависимости $F(P)$ при различных ориентациях магнитного поля

Если в ферромагнитном состоянии обменное расщепление одно и то же для каждой точки зоны Бриллюэна, то зонная структура может быть представлена с двумя отдельными ферми-уровнями — для спина электрона вверх (\uparrow) и спина вниз (\downarrow) и $\Delta_0 = E_{F\uparrow} - E_{F\downarrow}$.

Можно связать полученные данные с изменениями взаимного расположения ферми-уровней и дисперсионных кривых, образующих линзу и сравнить их с влиянием давления на намагниченность. Относительное изменение обменного расщепления $\sigma\Delta/\Delta_0$ при уменьшении расстояния между атомами можно связать с изменением ФП и, согласно теории Стонера, с изменением намагниченности $\delta M/M$. Несложные вычисления (см., например, [6]) дают связь между относительным изменением сечений линзы (считая ее изотропной) и расщеплением. Тогда $d \ln \Delta_0 / dP = -4,8 \cdot 10^{-2} d \ln S / dP = -3,8 \cdot 10^{-4} \text{ кбар}^{-1}$. Кондорский и Седов провели измерения атомного магнитного момента железа под давлением и полу-

чили при $T = 4,2\text{K}$ $d \ln M / dP = K_{\sigma} = d \ln \Delta / dP = -3,1 \cdot 10^{-4}$ кбар $^{-1}$ [8], что удовлетворительно согласуется с нашими данными.

Можно вычислить абсолютные смещения уровней $E_{F\downarrow}$ и $E_{F\uparrow}$, считая,

$$\text{что } d \ln E_{F\downarrow} / dP = d \ln S / dP \quad (d \ln m^* / dP = 0): \quad \delta E_{F\downarrow} = - \frac{N_{\uparrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \delta \Delta, \quad \delta E_{F\uparrow} = \\ = \frac{N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \delta \Delta, \text{ где } \delta \Delta \text{ определяется из формулы } \frac{\delta E}{F} = - \frac{m^*}{e \hbar F} \frac{N_{\uparrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \delta \Delta$$

а N_{\uparrow} и N_{\downarrow} — плотности состояний в соответствующих спиновых зонах на уровне Ферми. Подставляя нужные величины мы получили (при $P = 1$ кбар): $\delta E_{F\uparrow} = -2,3 \cdot 10^{-4}$ эв, $\delta E_{F\downarrow} = 5,3 \cdot 10^{-4}$ эв, $\delta \Delta = \delta E_{F\uparrow} - \delta E_{F\downarrow} = -7,6 \cdot 10^{-4}$ эв. Кроме того, предполагая параболичность части спектра, образующего линзу, можно оценить расстояние E'_{\downarrow} до дна зоны (точки пересечения дисперсионных кривых): $E'_{\downarrow} = \delta E_{F\downarrow} / (\delta F / F) = 9,5 \cdot 10^{-2}$ эв.

Интересно отметить, что в то время, как барические коэффициенты намагниченности железа и никеля близки ($-3,1$ и $-2,9 \cdot 10^{-4}$ кбар $^{-1}$ соответственно, [8]), эти же коэффициенты для измеренных сечений ФП отличаются более чем на порядок (для линзы у железа $\sim 8 \cdot 10^{-3}$, для дырочного кармана в X_2 у никеля $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ кбар $^{-1}$ [9; 10]). Такая разница в значительной степени обусловлена различием в плотности состояний квазичастиц на уровне ферми. Для железа $N_{\uparrow} = 5$, $N_{\downarrow} = 1,5$

[11], для никеля $N_{\uparrow} = 2,4$, $N_{\downarrow} = 21,1$ [12] (все N в единицах $\frac{\text{электрон}}{\text{атом} \cdot \text{ридберг}}$) и факторы $N_{\uparrow} / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$ равны 0,7 и 0,1 соответственно.

Институт физики высоких давлений

Поступила в редакцию
5 июля 1978 г.

Литература

- [1] A.V.Gold, L.Hodges, P.T.Panousis, D.R.Stone. Int. J.Magnetism, 2, 357, 1971; A.V.Gold. J.Low Temp. Phys., 16, №1/2, 3, 1974.
- [2] D.R.Baraff. Phys. Rev., B8, 3439, 1973.
- [3] M.A.Angadi, E.Fawcett, M.Rasolt. Can. J. Phys., 53, 284, 1975.
- [4] J.H.Wood. Phys. Rev., 126, 517, 1962.
- [5] S.Wakoh, J.Yamashita. J. Phys. Soc. Japan, 21, 1712, 1966.
- [6] G.Lonzarich, A.V.Gold. Can. J. Phys., 52, 694, 1974.
- [7] Е.С.Ицкевич. ПТЭ, №4, 143 1963.
- [8] Е.И.Кендорский, В.Л.Седов. ЖЭТФ, 38, 773, 1960.
- [9] J.R.Anderson, P.Heiman, J.F.Schirber, D.R.Stone. AIP Conf. Proc., 29, Magnetism and Magn. Mater. 1975, USA.
- [10] Л.И.Винскурова, А.Г.Гапотченко, Е.С.Ицкевич. Письма в ЖЭТФ, 26, 443, 1977.
- [11] R.J.Duff, T.P.Das. Phys. Rev., B3, 192, 1971.
- [12] E.I.Zornberg. Phys. Rev., B1, 244, 1970.