

## ПОВЕРХНОСТЬ ФЕРМИ ИТТРИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

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

Э.Т.Кулатов, Н.И.Куликов

Методом де Гааза – ван Альфена измерено изменение под давлением некоторых сечений ферми-поверхности иттрия. Рассчитанные с помощью этих измерений параметры зонной структуры иттрия используются для обсуждения геликоидального магнитного упорядочения тяжелых редкоземельных металлов (ТРЗМ) в свете теории Дзялошинского [1].

Исследование эффекта де Гааза – ван Альфена (ДГВА) у иттрия под давлением, кроме данных по изменению параметров ферми-поверхности ( $\Pi\Phi$ ) позволяет сделать с помощью расчетов зонной структуры некоторые качественные заключения о связи параметра геликоидальной магнитной структуры в антиферромагнитной фазе тяжелых редкоземельных металлов (ТРЗМ), например  $Tb$  и  $Dy$ , с электронным спектром.

Дзялошинский показал, что устойчивость спиральных магнитных структур ТРЗМ связана с близостью волнового вектора такой структуры  $Q$  к вектору  $\Delta k$  между почти параллельными участками различных частей  $\Pi\Phi$  в парамагнитной фазе или другими особенностями топологии  $\Pi\Phi$  [1]. В работах [2 – 5] было показано, что величина  $\Delta k_{LM}$ , связывающая параллельные участки электронной и дырочной частей  $\Pi\Phi$  вдоль линии  $LM$  (рис. 1, а), полученная в зонных расчетах, хорошо согласуется с экспериментально измеренным методом дифракции нейтронов вектором  $Q$  ТРЗМ [6].

Парамагнитная фаза ТРЗМ является высокотемпературной и поэтому невозможно экспериментально (например, по ДГВА-эффекту) ис-

следовать указанную особенность парамагнитной ПФ. 4d-металл иттрий обладает такой же структурой валентных  $sd$ -зон, что и ТРЗМ, ПФ которых называют иттрие-подобными. ПФ иттрия под давлением, получение данных о  $\Delta k_{LM}(p)$  и сравнение с соответствующей зависимостью вектора  $\mathbf{Q}(p)$  магнитоупорядоченных ТРЗМ предоставляют уникальную возможность использования давления как параметра для исследования корреляции  $\mathbf{Q}$  и  $\Delta k$ .

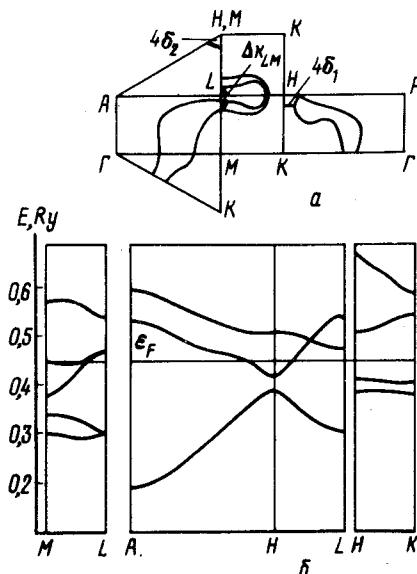


Рис. 1. Поверхность Ферми иттрия при нормальном давлении (1, а) из работы [3]. Показаны сечения  $4\delta_1$  и  $4\delta_2$ , наблюдавшиеся в настоящем эксперименте, а также величина  $\Delta k_{LM}$  (см. в тексте).. Энергетические зоны ГПУ иттрия вдоль некоторых направлений высокой симметрии при нормальном давлении, рассчитанные методом модельного гамильтонiana (1, б)

Мы провели измерения эффекта ДГВА в интервале давлений от 0 до 11 кбар на монокристалле Y ( $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 460$ ) при ориентациях магнитного поля вдоль оси [0001] и в базисной плоскости. Модуляционным методом в магнитных полях до 80 кЭ при  $T = 1,5$  К [7] были обнаружены осцилляции большой амплитуды с биениями (рис. 2). Значения частот ДГВА при нулевом давлении, а также относительные величины амплитуд, находятся в согласии с результатами работы [8], в которой были проведены обширные ДГВА измерения на монокристалле Y,  $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 700$ ,  $T = 0,45$  К. Мэтокс и Янг [8] наблюдали 12 ДГВА-частот, относящихся почти ко всем участкам ПФ.

Идентификация зарегистрированных нами частот согласно [8] следующая: 1) основная частота  $F(4\delta_1)$  с большой амплитудой возникает от минимального почти кругового сечения сложной электронной ПФ 4-той зоны вблизи точки H зоны Бриллюэна (рис. 1, а) и равна 3,25 МГц; 2) частота  $F(4\delta_2) = 3,9$  МГц получена из биений и относится к сечению той же поверхности, но лежащему прямо в плоскости AHL (рис. 1, а). Барические производные (БП) для этих участков ПФ, вычисленные методом наименьших квадратов, в пределах ошибки совпадают

и равны:

$$d\ln F(4\delta_{1,2})/dp = (5,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ кбар}^{-1}.$$

Нам не удалось увидеть осцилляций при направлениях поля в базисной плоскости даже при нулевом давлении.

Из температурной зависимости амплитуды частоты  $4\delta_1$ , измеренной в этом же интервале давлений, вычислены эффективные массы  $m^*(4\delta_1)$ , которые при нулевом давлении составляют  $(0,37 \pm 0,03) \cdot m_e$  и в пределах ошибки не зависят от давления, т. е.  $d\ln m^*(4\delta_1)/dp = 0$ . Зависимость амплитуды осцилляций ДГВА от магнитного поля при постоянной температуре  $T = 1,5$  К позволила определить температуру Дингла  $T^D$  и ее барическую производную для сечения  $4\delta_1$ :

$$T^D = (1,0 \pm 0,2) \text{ К и } \frac{d\ln T^D(4\delta_1)}{dp} = 0.$$

Следует упомянуть неизменность  $T^D$  при снятии давления.

Обращает на себя внимание значительная величина БП сечений  $4\delta_1$  и  $4\delta_2$ . Даже если отбросить величину  $2/3 \cdot K_T = 1,673 \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$  (сжимаемость  $K_T = (2,51 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$  [9]), связанную с простым масштабным увеличением ПФ под давлением, остается значение, равное  $4 \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$ , полностью обусловленное изменением кристаллического потенциала при сжатии решетки.

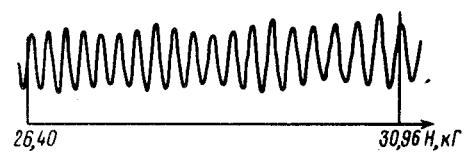


Рис. 2. ДГВА осцилляции в иттрии при  $H \parallel [0001]$ ,  $T = 1,5$  К и  $P = 10,2$  кбар. Основная гармоника связана с сечением  $4\delta_1$ ; биения возникают из-за подмешивания близкой к  $F(4\delta_1)$  частоты, связанной с сечением  $4\delta_2$ .

Используя полученные экспериментальные результаты, мы попытались оценить изменение под давлением  $\Delta k_{LM}$  на линии симметрии  $LM$ . С этой целью мы провели самосогласованный расчет зонной структуры  $Y$  в 168 точках  $1/24$  неприводимой части зоны Бриллюэна при нулевом давлении, использовав метод модельного гамильтониана [10]. Энергия Ферми  $\epsilon_F$  получена из кривой плотности состояний и соответствует заполнению зоны проводимости до 3 эл/атом. Плотность состояний на уровне Ферми оказалась равной 27 эл/(атом. ридберг).

На рис. 1,б изображена зонная структура ГПУ иттрия вдоль некоторых наиболее интересных для сравнения с результатами эксперимента, направлений высокой симметрии. При нормальном давлении рассчитанная площадь сечений  $S^T(4\delta_2)$  составила  $10,6$  МГс ( $S^{\text{ЭКС}}(4\delta_2) = 4$  МГс), а величина  $\Delta k_{LM} = 0,58 \pi/c$ , что удовлетворительно согласуется с измеренным в [6] волновым вектором геликоидальной спиновой волны  $Q = 0,54 \pi/c$  для магнитоупорядоченного сплава  $Y$  с  $Gd$ .

Хотя изменение потенциала под давлением дает весьма существенный вклад в БП сечений  $4\delta_1$  и  $4\delta_2$ , экспериментально обнаруженная независимость от давления эффективной массы этой зоны вблизи  $H$ -точки, т. е. неизменность ее формы, дает возможность использовать приближение жесткой зоны для вычисления смещения уровня Ферми под давлением из экспериментального значения БП сечения  $4\delta_2$  соглас-

но формуле

$$d \ln S^{\text{ЭКС}} / dp = \frac{d \ln S^T}{d \epsilon_F} \frac{d \epsilon_F}{dp} \quad (d \epsilon_F / dp > 0).$$

В результате нами получено, что при сжатии  $\Delta k_{LM}$  уменьшается до значения  $0,36 \pi/c$  при 30 кбараах и БП этого вектора равна  $d \ln \Delta k_{LM} / dp = -13 \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$ .

Флемминг и Лью [11] провели теоретическое исследование влияния давления на параметры магнитного упорядочения типа простой спирали в Tb и Dy, основанное на расчете парамагнитных зонных структур при нормальном и высоком (20 кбар) давлении. Было показано, что для Tb и Dy ( $d \ln Q / dp$ )<sub>теор</sub> =  $-10 \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$ . В то же время экспериментально определенное значение  $d \ln Q / dp$  для Tb равно  $-18 \cdot 10^{-3}$  кбар $^{-1}$  [12]. Эти данные удовлетворительно согласуются с полученным нами значением  $d \ln \Delta k_{LM} / dp$ .

Еще одним подтверждением уменьшения Q при сжатии являются данные по сплавлению нескольких атомных процентов легких РЗМ (Pr и Nd) с Tb (при таком сплавлении  $c/a$  увеличивается, что подобно сжатию чистого металла) [13].

Таким образом нами найдена определенная корреляция между зависимостями от давления величины  $\Delta k_{LM}$ , связывающей соответствующие участки ПФ иттрия, и волнового вектора геликоидальной магнитной структуры Q для иттрие-подобных ТРЗМ в согласии с теорией [1].

Институт  
физики высоких давлений

Поступила в редакцию  
6 октября 1981 г.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

После переработки  
22 октября 1981 г.

### Литература

- [1] Дзялошинский И.Е. ЖЭТФ, 1964, 47, 336.
- [2] Loucks T.L. Phys. Rev. 1966, 144, 504.
- [3] Mackintosh A.R., Andersen O.K. "Electrons at the Fermi Surface" ed. M. Springford (Cambridge University Press), 1980.
- [4] Keeton S.C., Loucks T.L. Phys. Rev., 1968, 168, 672.
- [5] Jackson C. Phys. Rev., 1969, 178, 949.
- [6] Koehler W.L. J. Appl. Phys., 1965, 36, 1080.
- [7] Винокурова Л.И., Гапотченко А.Г., Ицкевич Е.С. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 443.
- [8] Maitocks P.G., Young R.C. J. Phys. F: Metal Phys., 1978, 8, 1417.
- [9] Smith J.F., Gjevre C.L. J. Appl. Phys., 1960, 31, 645.
- [10] Куликов Н.И. Изв. высш. уч. зав., сер. Черн. метал., 1975, №7, 128.
- [11] Fleming G.S., Liu S.H. Phys. Rev., 1970. B2, 164.
- [12] Umebayashi H., Shirane G., Frazer B.C., Daniels W.B. Phys. Rev., 1968, 165, 688.
- [13] Curry R.G., Taylor K.N.R. Physica B + C, 1977, 86 – 88, part 1, 63.