

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТА ШУБНИКОВА де ГААЗА В ГРАФИТЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО 8 кбар

Е.С.Ицкевич, Л.М.Фишер

Электронный спектр графита обычно описывается моделью Слончевско-го-Вейсса (СВ). В этой модели зависимость энергии от квазиимпульса выражается через параметры, характеризующие взаимодействия электронов проводимости, на основании общих принципов [1]. Зона Бриллюэна для графита представляет собой шестиугольную призму со стороной основания $2\pi/a_0$ и высотой $2\pi/c_0$ ($a_0 = 2,46 \text{ \AA}$, $c_0 = 4,70 \text{ \AA}$). Поверхность Ферми графита занимает малую часть зоны Бриллюэна и расположена вдоль вертикальных ребер зоны. Закон дисперсии по СВ можно упрощенно записать следующим образом:

$$E_{\pm} = 2\gamma_2 \cos^2 \phi \pm \hbar^2 \kappa^2 / 2m^*(\phi), \quad (1)$$

$$m^*(\phi) = \frac{4}{3} (\hbar/a_0)^2 (\gamma_1/\gamma_0^2) \cos \phi, \quad (2)$$

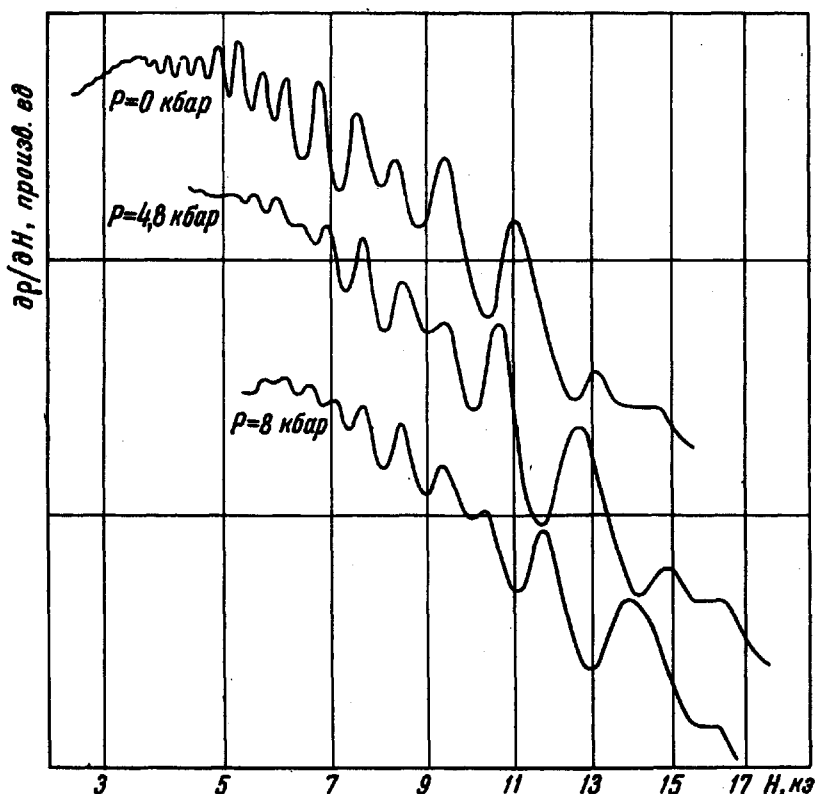
где $\phi = k_z c_0 / 2$, κ — отсчитывается от ребра зоны Бриллюэна, γ_0 — энергия взаимодействия электронов проводимости в плоскости слоя, γ_1 — энергия взаимодействия электронов проводимости соседних слоев, γ_2 — та же энергия через слой, знаки + и — соответствуют электронам и дыркам.

Отсюда, учитывая, что энергия Ферми $\epsilon_F = 4/3 \gamma_2$, легко получить величину экстремального сечения дырочной части поверхности Ферми графита параллельного плоскости (0001)

$$S_{\text{extr}}^D = (4/3)^2 \pi / \alpha_0^2 (\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2) = 0,923 \gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2 \text{ \AA}^{-2}. \quad (3)$$

Выражение для аналогичного сечения электронной поверхности отличается только величиной коэффициента при $\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2$. В ряде работ последних лет модель СВ нашла свое экспериментальное подтверждение [2-3].

Для того, чтобы определить деформацию электронного спектра графита при изменении расстояния между слоями необходимо измерить зависимость от давления всех параметров входящих в уравнение (1). Из рентгеновских измерений сжимаемости графита до 16 кбар [4], известно, что изменение α_0 под давлением ничтожно, по сравнению с изменением межслоевого расстояния s_0 . Поэтому можно предположить, что γ_0 не зависит от давления в интересующем нас интервале давлений.



Для определения $\gamma_1(P)$ необходимо измерить зависимость от давления эффективной массы m^* (см. (2)), а по зависимости от давления какого-либо осцилляционного эффекта можно получить $\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0 = f(P)$.

В работе Архипова, Кечина, Лихтера и Поспелова (АКЛП) [5] было показано, что при температурах выше комнатной m^* у графита определяет-

ся зависимостью электросопротивления в плоскости (0001) от магнитного поля H_{\parallel} (0001). В частности для того же экстремального сечения, что и в (3)

$$m^* = 4/3 (\pi/\sigma_0)^2 \gamma_1/\gamma_0^2 = \frac{\hbar^2 c_0 \pi^2}{(8 \ln 2) e c} [T^2 \rho_0^2 (\frac{\Delta \rho_H}{\rho_0 H^2})_{H \rightarrow 0}]^{-1/2}. \quad (4)$$

В работе АКЛП была определена зависимость $\gamma_1/\gamma_0^2 = f(P)$ до 8,8 кбар по измерению магнитосопротивления чешуек естественного графита в поле до 5 кэ при температурах от 20 до 90°С.

Мы проделали измерения эффекта Шубникова де Гааза с целью получения величины площади экстремального сечения поверхности Ферми графита параллельного плоскости (0001) при различных давлениях. Измерения проводились на монокристаллах искусственного графита имевших вид пластинок размером 12×2,5×0,2 мм параллельных плоскости (0001). Эффект Шубникова де Гааза под давлением измерялся в бомбе фиксированного давления [6] модуляционным методом, примененным нами впервые на висмуте [7]. Мы измерили квантовые осцилляции производной $d\rho/dH$ в полях до 16 кэ при температуре 1,5°К.* Направление H_{\parallel} (0001) определялось по угловой зависимости $d\rho/dH(\phi)$ при постоянном поле.

На рисунке показаны кривые записи осцилляций электросопротивления в магнитном поле H_{\parallel} (0001), под давлением $p = 0; 4,8$ и $8,0$ кбар. Давление определялось по сверхпроводящему оловянному манометру. Мы измерили эти осцилляции и при других углах между направлением H и осью (0001) (до 50° между ними). При $p = 0$, полученные данные хорошо согласуются с результатами работ [2-3].

Из полученных осцилляций легко определяются периоды, относящиеся к дырочной части поверхности Ферми и значения периодов $\Delta(1/H)$: $1,51 \cdot 10^{-5}$; $1,27 \cdot 10^{-5}$ и $1,15 \cdot 10^{-5}$ э⁻¹ при $p = 0; 4,8$ и $8,0$ кбар соответственно. Таким образом, как это следует и из априорных рассуждений, при уменьшении расстояния между слоями объем поверхности Ферми увеличивается. С помощью (3) мы рассчитали $\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2$ при $p = 0$ и $8,0$ кбар: $(\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2)_0 = 6,8 \cdot 10^{-4}$; $(\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2)_{8 \text{ кбар}} = 9,0 \cdot 10^{-4}$; $(\gamma_1 \gamma_2)_{8 \text{ кбар}} / (\gamma_1 \gamma_2)_0 = 1,32$.

Согласно АКЛП $(\gamma_1/\gamma_0^2)_{8 \text{ кбар}} = 4,00 \cdot 10^{-2}$ эв при $(\gamma_1/\gamma_0^2)_0 = 3,46 \cdot 10^{-2}$ эв⁻¹ (из данных Мак Клюра). Тогда из наших измерений следует $(\gamma_2)_0 = 0,0196$ эв (в согласии с литературными данными) и $(\gamma_2)_{8 \text{ кбар}} = 0,0225$ эв; $(\epsilon_{\Phi})_0 = 0,026$ эв; $(\epsilon_{\Phi})_{8 \text{ кбар}} = 0,030$ эв.

В работе АКЛП был проведен расчет $\gamma_1 \gamma_2 / \gamma_0^2(p)$ в предположении, что $[(\gamma_1 \gamma_2)p / (\gamma_1 \gamma_2)_0] \approx (\gamma^*)^2 \exp\{-3[c(p) - c_0] / \sigma^*\}$; $(\gamma_1 = \gamma^* \exp[-c(p)]: \sigma^*]$ и σ^* определялось из $\gamma_1^0(p) / \gamma_0^2$. Было найдено $[(\gamma_1 \gamma_2)_{8 \text{ кбар}} / (\gamma_1 \gamma_2)_0] = 1,47$. Согласие достаточно удовлетворительное, учитывая погрешности теории, различие измеренных величин и возможные ошибки экспериментов.

В заключение авторы приносят свою глубокую благодарность Л.Ф.Верещагину за внимание к работе.

Институт физики высоких давлений
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
12 декабря 1966 г.

Литература

- [1] I.S.Slonczewski, P.R.Weiss. Phys. Rev., **109**, 272, 1958.
- [2] D.E.Soule, J.W.McClure. Phys. Rev., **134**, A453, 1964.
- [3] S.G.Williamson, S.Foner, M.S.Dresselhaus. Phys. Rev., **140**, A1429, 1965.
- [4] С.С.Кабалкина, Л.Ф.Верещагин. ДАН СССР, **131**, 300, 1960.
- [5] Р.Г.Архипов, В.В.Кечин, А.И.Лихтер, Ю.А.Поспелов. ЖЭТФ, **44**, 1964, 1963.
- [6] Е.С.Ицкевич. ПТЭ, № 4, 148, 1963.
- [7] Е.С.Ицкевич, И.П.Кречегова, Л.М.Фишер. ЖЭТФ, **52**, 66, 1967.
- [8] I.E.Schirber, I.E.Anderson, W.I.O'Sullivan, D.E.Soule, Bull. Am.Phys. Soc., **11**, 222, 1966.

* В [8] есть указание об измерении эффекта де Гааза-Ван Альфена в графите под давлением до 2,5 кбар.

ОПТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В РАСТВОРАХ СЛОЖНЫХ МОЛЕКУЛ

Б.И.Степанов, А.Н.Рубинов, В.А.Мостовников

Влияние колебательной структуры рабочих уровней на свойства генерации рассмотрено в работах [1-4]. В [4,5] проведен подробный расчет, доказывающий возможность получения генерации в рамках двух электронно-колебательных уровней, характерных для широкого класса красителей и других сложных молекул.* Для накачки таких соединений в работе [7] предлагалось использовать излучение рубинового лазера, работающего в режиме гигантских импульсов. В этой работе проведено изучение оптических характеристик фталоцианинов различных металлов, что позволило определить конкретные экспериментальные условия, необходимые для получения их генерации.