

Академик АН УССР А. А. ГАЛКИН, Е. П. ДЕГТЯРЬ, С. Е. ЖЕВАГО,
А. И. ПОПОВИЧ

КВАНТОВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА В ГАЛЛИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Изучение электронной структуры металлов под высоким давлением позволяет проследить изменение основных характеристик энергетического спектра и допускает вычисление методом псевдопотенциала отклонений «пробных» моделей поверхности Ферми от реальных.

Непосредственное изучение влияния давления на размеры поверхности Ферми металлов возможно при исследовании различных осцилляционных квантовых явлений таких, как осцилляции магнитной восприимчивости, магнетосопротивления и т. п. Применение магнитоакустических методов исследования с использованием техники высоких давлений позволило наблюдать электронный переход в мышьяке ⁽¹⁾ и изменение отдельных энергетических зон в кадмии ⁽²⁾.

Поверхность Ферми галлия, последняя теоретическая модель которого предложена Ридом ⁽³⁾, хорошо согласуется с экспериментальными результатами ⁽⁴⁻⁶⁾, касающимися больших частей изоэнергетической поверхности. Малые участки поверхности Ферми, которые наблюдались в работе ⁽⁴⁾, учитываются моделью варьированием уровня энергии Ферми E_F .

Всестороннее сжатие есть термодинамический параметр, к которому наибольшую чувствительность имеют малые объемы, так как происходит движение границ энергетических зон и изменение уровня Ферми под давлением. Представляет интерес постановка эксперимента по ультразвуковому исследованию поверхности Ферми галлия под давлением.

В настоящей работе исследовались квантовые осцилляции поглощения звука в галлии в магнитном поле до 40 кэ в условиях гидростатического сжатия до 10 кбар. Измерения проводились на продольном звуке $f = 200$ Мгц в интервале температур $1,65 \div 4,2^\circ \text{K}$. Монокристаллические образцы диаметром 6 мм и толщиной 4 мм вырезались электроискровым способом из монокристалла галлия марки ГЛ-000 с исходной чистотой 99,9996%. Обработка торцов производилась методами, обычными для ультразвуковых исследований. Нормаль к поверхности образцов с точностью $0,5^\circ$ совпадала с осью a кристалла.

Гидростатическое давление до 10 кбар создавалось в камере, изготовленной из бериллиевой бронзы, с диаметром рабочего канала 8 мм. В качестве среды, передающей давление на образец, служила керосино-масляная смесь. Заметного уменьшения амплитуды осцилляций из-за негидростатичности смеси не наблюдалось до давлений 10 кбар. Давление в бомбе определялось индиевым сверхпроводящим манометром.

Для измерения коэффициента поглощения звука применялась импульсная ультразвуковая методика. Эксперимент проводился в условиях, когда волновой вектор звука q и магнитное поле H совпадали с направлением оси a кристалла. На рис. 1 показана зависимость коэффициента поглощения звука α от напряженности магнитного поля H для давлений $P = 1$ бар, 9 кбар при температуре $T = 1,65^\circ \text{K}$.

Осцилляционные кривые представляют суперпозицию квантовых осцилляций двух различных частот, значения которых при $P = 1$ бар равны $F_1 = (0,515 \pm 0,08) \cdot 10^6$ э и $F_2 = (0,89 \pm 0,01) \cdot 10^6$ э. Полученные частоты

ты хорошо согласуются с результатами работы ⁽⁴⁾ по исследованию эффекта де Гааза — ван-Альфена в галлии: $F_{IV} = 0,5 \cdot 10^6$ э и $F_V = 0,87 \cdot 10^6$ э.

Наблюдаемые значения частот осцилляций соответствует дырочной 6th и электронной 7^{te} зонам по линии ГТ зоны Бриллюэна и дают величины площадей сечений $0,00492 \text{ \AA}^{-2}$ и $0,0085 \text{ \AA}^{-2}$. Гидростатическое сжатие изменяет форму и размеры энергетических зон, что непосредственно наблюдается в изменении частоты квантовых осцилляций, представленных на рис. 1.

Относительное изменение $\Delta F/F_0$ от давления ($\Delta F = F_P - F_0$, F_P — частота при давлении, F_0 — без давления) показано на рис. 2. При увеличении давления до 9 кбар частота F_1 уменьшается на 25% и F_2 — на 10%, что приводит к уменьшению площади экстремальных сечений 6th и 7^{te} с ростом давления.

Характерные величины логарифмических производных площади сечения по давлению для дырочной и электронной зон равны $d \ln S_h / dP = -(0,06 \pm \pm 0,01) \text{ кбар}^{-1}$ и $d \ln S_e / dP = -(0,012 \pm \pm 0,003) \text{ кбар}^{-1}$ соответственно.

Экстраполяция кривой зависимости $\Delta F/F_0$ от P для зоны 6th к уровню $\Delta F/F_0 = -100\%$ дает величину критического давления $P_{кр} \approx 16 \text{ кбар}$, т. е. при $P = P_{кр}$ можно ожидать исчезновения сечения 6th, если сохранится величина и знак $d \ln S_h / dP$. Этот результат качественно согласуется с грубой оценкой $P_{кр}$ в приближении свободных электронов с учетом объемной сжимаемости. При всестороннем сжатии атомный объем Ω уменьшается, а объем Ферми-сферы растет. При давлении $\sim 20 \text{ кбар}$ уровень Ферми E_F поднимается на 2,5%, что повлечет исчезновение 6th зоны.

Для дырочной зоны 6th, используя температурную зависимость амплитуды квантовых осцилляций, определили зависимость m^*/m_0 от давления (m^* — эффективная циклотронная масса, m_0 — масса свободного электрона). Измерения амплитуды осцилля-

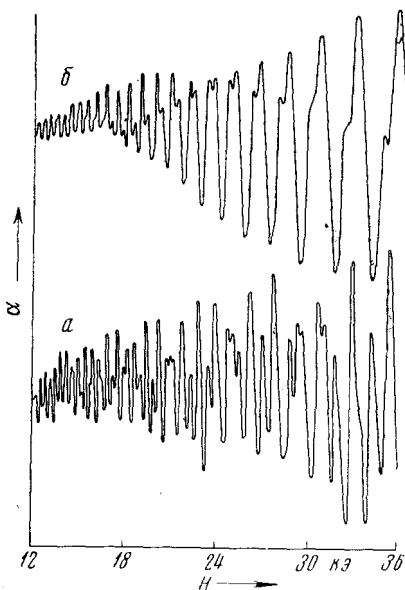


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения звука α от напряженности магнитного поля при $q, H \parallel a$ и давлениях $P = 1 \text{ бар}$ (а), 9 кбар (б)

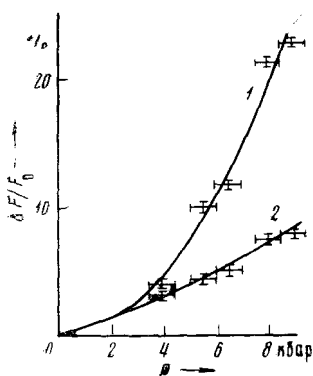


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость относительного изменения $\Delta F/F_0$ от давления для дырочной 6th (1) и электронной 7^{te} (2) зон

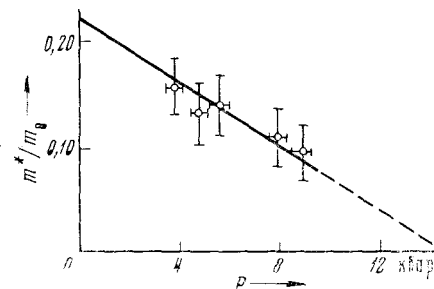


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость относительного изменения эффективной массы m^*/m_0 дырочной зоны 6th от давления

ций производились при температурах 1,65; 2,1; 3,3 и 4,2° К при фиксированном давлении. Эффективная масса определялась по наклону зависимости $\ln (A / T)$ от T (A — амплитуда осцилляций):

$$m^* = - \frac{\ln (A/T)}{T} \frac{e\hbar H}{2\pi^2 k c},$$

где k — постоянная Больцмана, $\hbar = h / (2\pi)$, h — постоянная Планка, e — заряд электрона, c — скорость света.

Точность определения m^* существенно ниже, чем по данным циклотронного резонанса. Ошибка m^* составляет 15—20% и зависит от точности определения амплитуды осцилляций A . Значение m^*/m_0 при давлении $P = 1$ бар составляет $0,22 \pm 0,03$. На рис. 3 приведена зависимость m^*/m_0 от P для дырочной зоны. По наклону аппроксимирующей зависимости прямой можно предположить, что эффективная масса носителей 6^{th} стремится к нулю при давлениях ~ 15 кбар.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Г. Бурме за помощь в приготовлении образцов.

Донецкий физико-технический институт
Академии наук УССР

Поступило
27 III 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Галкин, Е. П. Дегтярь и др., ДАН, 198, 563 (1971). ² А. А. Галкин, Е. П. Дегтярь и др., ФТТ, 14 (3), 919 (1972). ³ W. A. Reed, Phys. Rev., 188, 1184 (1969). ⁴ A. Goldstein, S. Foner, Phys. Rev., 146, 442 (1966). ⁵ П. А. Безуглый, А. А. Галкин, С. Е. Жеваго, ЖЭТФ, 47, 825 (1964); ФТТ, 7, 480 (1965). ⁶ I. A. Munarin, I. A. Marcus, P. E. Bloomfield, Phys. Rev., 172, 718 (1968).