

Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 76 – 79

20 июля 1970 г.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ И ШИРИНЫ ЛИНИИ ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В СВИНЦЕ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

*И.Я.Краснополи, М.С.Хайкин*

Электрон-фононное взаимодействие в металлах приводит к увеличению эффективной массы электронов проводимости  $m^*$  на поверхности Ферми [1]:

$$m^* = m_b (1 + \lambda),$$

здесь  $m_b$  – эффективная масса, обусловленная зонной структурой, а  $\lambda$  – коэффициент, характеризующий электрон-фононное взаимодействие. В [2] произведен расчет зависимости  $\lambda(T)$  для Рб и Нг.

Согласно этому расчету, изменение  $\lambda$  должно приводить к увеличению  $m^*$  на несколько процентов при увеличении температуры от 0 до  $\sim 4^\circ\text{K}$ .

В данной работе методом циклотронного резонанса (ЦР) проведено экспериментальное исследование зависимости эффективной массы от температуры в свинце — металле с сильным электрон-фононным взаимодействием [1, 2].

Образец — монокристалл РЬ в форме диска с ориентацией нормали вдоль  $[011]$  выращен из расплава в разборной кварцевой форме [3]<sup>1)</sup>. Свободно лежащий на кварцевой подложке образец помещался в полосковой резонатор, настроенный на частоту  $\sim 19,2 \text{ ГГц}$ , включенный в цепь обратной связи автогенератора на ЛФВ [4]. Измерялась либо низкочастотная составляющая (на частоте модуляции магнитного поля  $1^2 \text{ Гц}$ ) амплитуды генерации вблизи порога, либо девиация частоты генератора [4].

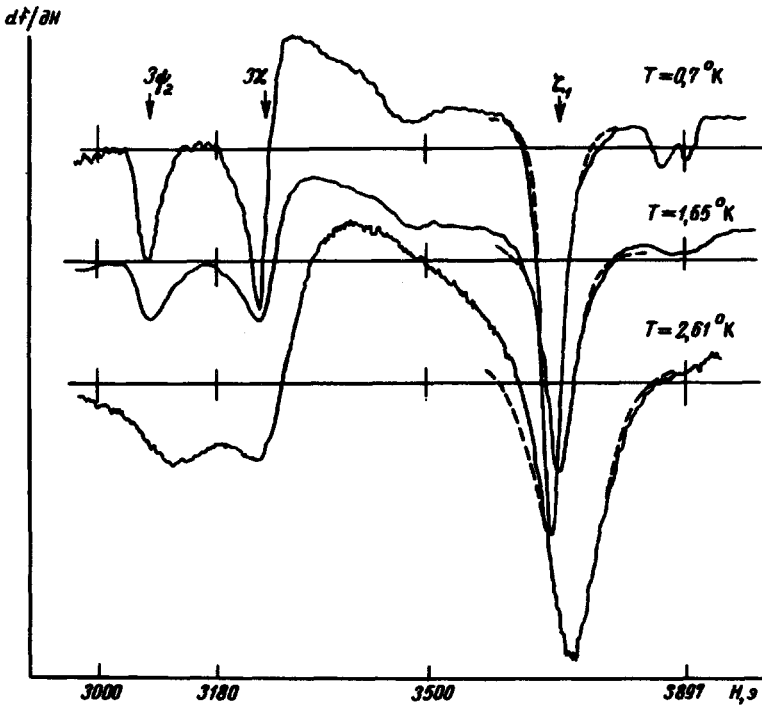


Рис. 1. Записи спектров ЦР методом частотной модуляции. Пунктир — расчетная орма линии для  $\beta = -0,3$ ; вертикальные штрихи — метки ЦР

Резонатор с образцом находился в криостате, охлаждаемом жидким  $\text{He}^3$ . Температура образца за время записи каждого спектра изменялась менее, чем на  $0,1^\circ\text{K}$ . Магнитное поле  $H$ , создававшееся электромагнитом, прикладывалось вдоль оси  $[0\bar{1}1]$ . Поле устанавливалось параллельно поверхности образца с точностью  $\sim 5^\circ$  по максимуму амплитуды ЦР  $\psi_2$  (обозначения соответствуют [6, 7]). Напряженность магнитного поля измерялась датчиком Холла, калибровка производилась ядерным магнитометром с проточной водой [5] при каждой записи исследовавшегося участка спектра ЦР. Точность измерения магнитного поля ограничивалась его модуляцией и составляла  $\sim 0,1\%$ .

<sup>1)</sup> Образец был выращен Р.Т.мина

На рис. 1 приведена запись спектров ИПР, полученных методом частотной модуляции [4]. На записи присутствуют три сильных резонанса: третий порядок резонансов  $\psi_2$  на нецентральной дробной орбите и  $\chi$  — на неплоской орбите, проходящей по трубкам в третьей зоне, и первый порядок резонанса  $\zeta_1$  на центральном сечении трубки. При увеличении температуры линии ИПР уширяются вследствие уменьшения времени релаксации и смещаются в область более сильного поля, что соответствует увеличению эффективной массы.

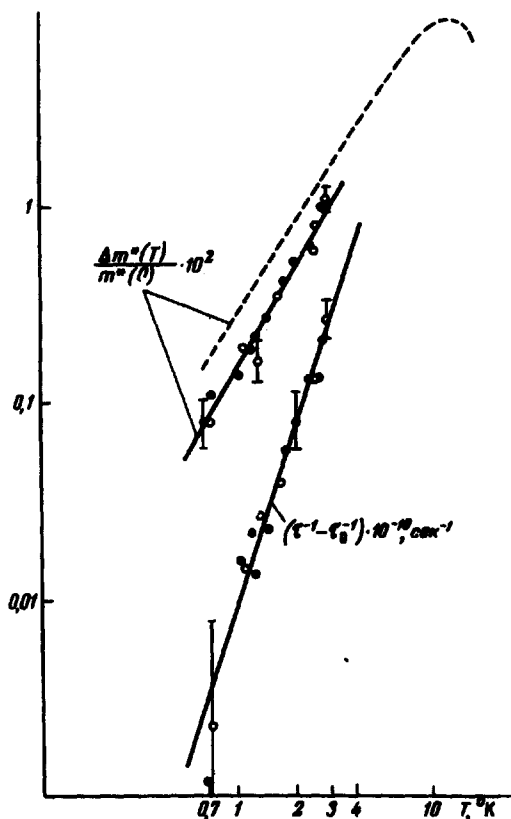


Рис. 2. Зависимость  $\Delta m^*(T)/m^*(0)$  и  $\tau^{-1}(T)$  для массы  $\zeta_1$ . ○ — по измерениям  $\partial X/\partial H + \beta \partial R/\partial H$ , ● — по измерениям  $\partial R/\partial H + \beta \partial X/\partial H$ . Пунктир — теоретическая зависимость  $\Delta m^*(T)/m^*(0)$ , пересчитанная из [2]

Обработка результатов производилась для наиболее интенсивного резонанса  $\zeta_1$ , так как линии резонансов  $\psi_2$  и  $\chi$  перекрываются при  $T \gtrsim 2^\circ \text{K}$  из-за уменьшения времени релаксации  $\tau$ . Резонансное значение поля  $H_1$  и значение  $\omega\tau$  находились сравнением экспериментальной формы линии с рассчитанной согласно [8] для случая, соответствующего минимуму эффективной массы. Так как добротность полоскового резонатора не высока ( $\sim 10^3$ ), то в эксперименте не удастся регистрировать только  $\partial X/\partial H$  или  $\partial R/\partial H$  [9], поэтому при обработке результатов подбиралась комбинация  $\partial X/\partial H + \beta \partial R/\partial H$  или  $\partial R/\partial H + \beta \partial X/\partial H$ , описывающая экспериментально наблюдаемую линию. Параметр  $\beta$  выбирался один раз для серии записей, если в процессе измерений не изменялась настройка схемы, значения  $\beta \approx 0,2 + 0,3$  указывают на то, что примесь другой компоненты была невелика.

Относительное изменение эффективной массы  $\zeta_1$  с температурой, определенное по сдвигу резонансного значения поля  $H_1$  (для случая рис. 1 значению  $H_1$  отвечает минимум на резонансной кривой, что ясно уже из симметричной формы линии), представлено на рис. 2. Это изменение массы малочувствительно к выбору параметра  $\beta$ : если принять  $\beta = 0$ , то полученные точки не выйдут

за пределы ошибок, указанных на рис. 2 (при этом расчетная форма линии будет существенно отличаться от наблюдаемой). На том же рисунке пунктиром нанесена теоретическая зависимость  $\Delta m^*(T)/m^*(0)$ , полученная из графика  $\lambda(T)/\lambda(0)$ , приведенного в [2]. Относительный рост эффективной массы (ее абсолютное значение  $m^*_\zeta = (0,538 \pm 0,001) m_0$  по нашим измерениям при  $T = 0,7^\circ\text{K}$ ) приблизи-

тельно в 1,5 раза меньше предсказанного в [2], однако наклоны теоретической и экспериментальной кривой почти совпадают ( $\Delta m^*(T)/m^*(0)_{\text{эксп}} \sim T^{1,7 \pm 0,2}$ ). Расхождение, возможно, связано с тем, что в [2] рассчитывалось значение  $\lambda$ , усредненное по всей поверхности Ферми. В то же время сравнение измеренных в [6] масс с рассчитанными по модели 4-ОПВ [10] указывает на анизотропию этой величины ( $\lambda = 1 + 1,4$ ).

Экспериментально полученная зависимость  $\tau(T)$  (рис. 2) описывается формулой:

$$\tau^{-1} - \tau_0^{-1} = (1 \pm 0,1) \cdot 10^8 T^3 \pm 0,4 \text{ сек}^{-1},$$

$$\tau_0 = (1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-9} \text{ сек},$$

что указывает на фононный механизм релаксации электронов, участвующих в резонансе.

В [11] также наблюдалась зависимость циклотронной эффективной массы в Рь от температуры:  $\Delta m^* \sim T^2$  и при изменении температуры от 1,5 до 6,5°K  $\Delta m^*/m^* = 5,7 \pm 0,7\%$ .

И.Л.Капица авторы благодарны за внимание к работе, Р.Т.Мине и В.С.Эдельману — за помощь в постановке эксперимента и обсуждение результатов, Дж.Ф. и Дж.Э.Коху, В.М.Лудалову и С.М.Черемисину — за полезные обсуждения, Г.С.Чернышову — за техническую помощь. Мы признательны А.Б.Голду, привлечшему наше внимание к данной проблеме.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 июня 1970 г.

#### Литература

- [1] P.V.Allen, M.L.Cohen. Phys. Rev., 187, 525, 1969.
- [2] G.Grimvall. Phys. Kondens. Materie, 9, 283, 1969.
- [3] М.С.Хайкин. УФН, 96, 408, 1968.
- [4] М.С.Хайкин. ПТЭ, 3, 95, 1961.
- [5] В.А.Юдин. ПТЭ, 6, 188, 1967.
- [6] Р.Т.Мина, М.С.Хайкин. ЛЭТФ, 45, 1304, 1963.
- [7] К.Ш.Агабабян, Р.Т.Мина, В.С.Погосян. ЖЭТФ, 54, 721, 1968.
- [8] R.G.Chambers. Proc. Phys. Soc., 86, 305, 1965.
- [9] В.С.Эдельман, С.М.Черемисин. Письма в ЖЭТФ, 11, 373, 1970.
- [10] J.R.Anderson, A.V.Gold. Phys. Rev., 139 A, 1459, 1965.
- [11] P.Goy. Phys. Lett., A, 1970, to be published; These d'Etat, Universite de Paris, 1970.