

ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНДО-СИСТЕМЫ CeAl_3 ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б.Б.Воронов, А.И.Коробов, В.В.Мощалков

В кондо-соединении CeAl_3 обнаружено резкое изменение нелинейных акустических свойств при низких температурах, связанное с образованием вблизи уровня Ферми гигантского резонанса Абрикосова – Сула.

В последнее время весьма интенсивно исследуются системы с тяжелыми фермионами¹. Большинство таких систем представляет собой немагнитные кондо-решетки (НКР), в которых на уровне Ферми имеется гигантский резонанс Абрикосова – Сула плотности электронных состояний. Ширина резонанса определяется температурой Кондо T_K , которая для типичных НКР лежит в пределах 1 – 10 К.

Такому узкому резонансу отвечают "тяжелые фермионы" – квази-частицы с эффективной массой $m_{\text{ТФ}}^*$ в $10^2 - 10^3$ раз превышающей характерные значения эффективных масс носителей в нормальных металлах¹. При низких температурах $T \lesssim T_K$, когда ширина температурного размытия фермиевского распределения меньше, чем ширина резонанса Абрикосова – Сула плотности состояний, все фермиевские электроны становятся "тяжелыми", поэтому низкотемпературные свойства НКР разительно отличаются от соответствующих свойств обычных металлов.

Так, фермиевская скорость $v_F^{\text{ТФ}}$ тяжелых фермионов составляет всего $\sim 10^5$ см/с, что по порядку величины совпадает со скоростью звука в металлах: $v_F^{\text{ТФ}} \sim v_s$, в то время как в нормальных (не Кондо) металлах $v_F/v_s \sim 10^3$. В такой ситуации, когда $v_F \sim v_s$, следует ожидать проявления целого ряда специфических акустических свойств НКР: значительное увеличение электронного поглощения продольных акустических волн, аномалии упругих свойств при $T \sim T_K$ и т. д. Особенности электрон-фононного взаимодействия в области $T \sim T_K$ должны оказывать существенное влияние и на нелинейные акустические свойства НКР: генерацию высших гармоник акустической волны, взаимодействие волн и т. д. Однако работ, посвященных исследованию нелинейных акустических свойств соединений с тяжелыми фермионами, по нашим сведениям, еще не было.

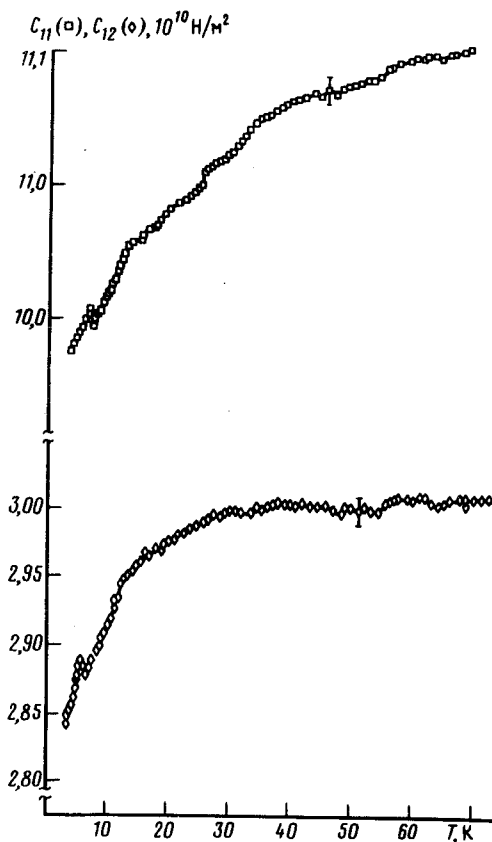


Рис. 1

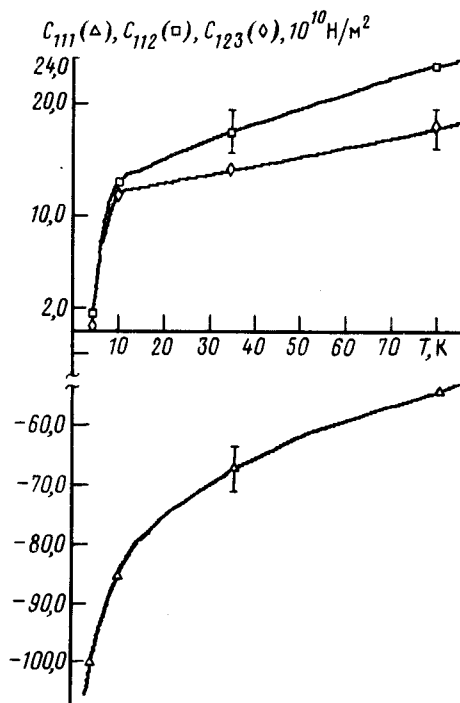


Рис. 2

Рис. 1. Температурные зависимости линейных модулей упругости кондо-соединения CeAl_3

Рис. 2. Температурные зависимости упругих модулей третьего порядка кондо-соединения CeAl_3

Целью настоящей работы является определение влияния перестройки энергетического спектра электронов, происходящей вблизи T_K , на нелинейные упругие свойства кондо-соединения CeAl_3 .

В работе для исследования использовался поликристаллический (размеры кристаллитов 10 – 30 мкм) образец CeAl_3 , имеющий при $T_K \approx 4 \text{ К}$ $m_{\text{тф}}^* / m_0 \sim 60$ (m_0 – масса свободного электрона), $v_F \sim 10^5 \text{ см/с}$. По температурным зависимостям скоростей продольной и сдвиговой акустических волн были рассчитаны зависимости линейных модулей упругости образца C_{11} и C_{12} , изменение которых в исследуемом диапазоне температур $T = 80 - 4,2 \text{ К}$, составляет 2% и 4% соответственно (рис. 1). Аномалии на зависимостях $C_{11}(T)$ и $C_{12}(T)$, обнаруженные в области $T \approx 6 \text{ К}$ соответствуют переходу примеси $\text{Ce}_3\text{Al}_{11}$, содержащейся в образце, в магнитоупорядоченное состояние. Ранее аналогичные аномалии наблюдались в температурной зависимости теплоемкости соединения CeAl_3 ¹.

Нелинейные акустические свойства образца исследовались двумя способами: по исследованию температурных зависимостей упругих модулей третьего порядка (УМТП) и с помощью спектральной методики, – по эффективности генерации второй гармоники продольных акустических волн, в диапазоне $T = 80 - 4,2 \text{ К}$.

Значения УМТП определялись по стандартной методике ² исследования относительных изменений фазовой скорости акустических волн в образце при приложении к нему одноосных статических механических напряжений.

Измерения проводились на частоте 30 МГц при температурах $T = 80, 35, 10$ и $4,2 \text{ К}$. Проведенные исследования позволили определить все независимые компоненты тензора УМТП изотропного материала CeAl_3 : $C_{111}, C_{112}, C_{123}$. Ошибка измерений не превышала 20%. Зависимости УМТП от температуры для кондо-системы CeAl_3 приведены на рис. 2. Экспериментальные точки на рис. 2 соединены с помощью кривых кубических сплайн-интерполяции.

По исследованию температурной зависимости амплитуды второй гармоники продольных акустических волн в образце был рассчитан нелинейный параметр среды с учетом поглощения звука на основной (30 МГц) и удвоенной частоте ³:

$$N = \frac{U_{2\omega}}{(kU_{\omega})^2} \frac{\alpha_{2\omega} - \alpha_{\omega}}{1 - \exp[-(\alpha_{2\omega} - \alpha_{\omega})l]}, \quad (1)$$

($U_{\omega}, U_{2\omega}, \alpha_{\omega}, \alpha_{2\omega}$ – амплитуды сигналов волны основной частоты и второй гармоники и коэффициенты поглощения волн основной и удвоенной частоты соответственно, k – волновое число волны основной частоты, l – длина образца).

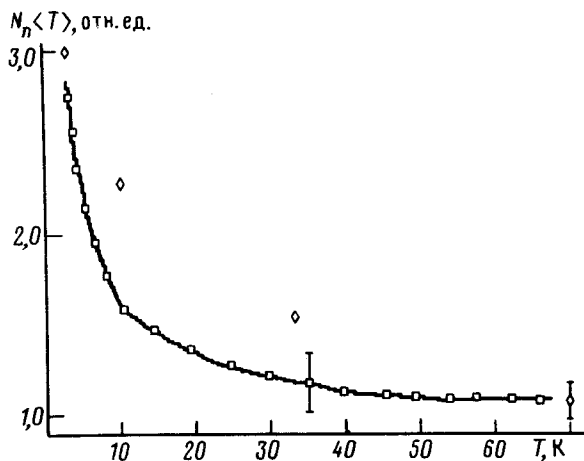


Рис. 3. Температурные зависимости относительного нелинейного параметра CeAl_3 ; (●) – расчет по формуле (1), (◆) – расчет по формуле (2)

Нелинейный параметр среды выражается также через УМТП ³:

$$N = 3 + (C_{111} / C_{11}). \quad (2)$$

Зависимости нормированного на величину при $T = 80 \text{ К}$ параметра нелинейности $N_n(T)$ НКР CeAl_3 , рассчитанные по формулам (1) – (2), находятся в хорошем согласии (рис. 3).

Возрастание относительного нелинейного параметра среды почти в 3 раза в окрестности T_K свидетельствует о значительном увеличении упругой нелинейности CeAl_3 при переходе в кондо-состояние. Естественно предположить, что основной вклад в усиление нелинейных свойств кондо-систем при низких температурах вносят тяжелые фермионы.

Интересная особенность нелинейных упругих свойств CeAl_3 проявляется в области $T \leq \leq 10$ К, когда ширина теплового размытия фермиевского распределения носителей становится сравнимой с шириной резонанса Абрикосова – Сула. При этом происходит резкое изменение (практически на порядок) недиагональных компонент тензора УМТП образца, в то время как температурное изменение значения модуля C_{111} носит достаточно плавный характер (рис. 2).

Интересно отметить, что обнаруженное в данной работе резкое возрастание упругой нелинейности НКР при переходе в кондо-состояние имеет качественное сходство с усилением нелинейных акустических свойств, отмеченном для сплава BiSb в области электронно-топологического перехода⁴, что, возможно, свидетельствует о едином характере влияния особенностей перестройки энергетического спектра носителей без изменения их концентрации на акустическую нелинейность металлов.

В заключение отметим, что исследование упругих (в особенности нелинейных) свойств НКР в области $T \sim T_K$ является чувствительным методом изучения их электронных свойств и позволяет получить дополнительную информацию о процессе образования тяжелых фермионов в металлах.

Литература

1. Моцалков В.В., Брандт Н.Б. УФН, 1986, 149, 585.
2. Brugger K. J. Appl. Phys., 1965, 36, 768.
3. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику, М.: Наука, 1966.
4. Буга С.Г., Воронов Б.Б., Зарембо Л.К., Коробов А.И. ФТТ, 1985, 27, 2291.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
17 февраля 1988 г.