

ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ СПИН-РЕШЕТОЧНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАЛЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ

Ю.И.Таланов, Ф.Г.Черкасов, С.Ф.Чернов, Э.Г.Харахашьян

Представлены результаты первых экспериментальных исследований спин-решеточной релаксации электронов в малых металлических частицах (Li, Na, K, Mg, Ag) методом спинового эха. Обнаружено, что процессы спиновой релаксации в частицах сильно заторможены по сравнению с массивными металлами.

Дискретность уровней энергии электронов проводимости (ЭП) в малых металлических частицах, возникающая в результате пространственного ограничения орбитального движения электронов, приводит к существенному отличию электронных и магнитных свойств таких частиц от свойств массивного металла ^{1, 2}. Проявление квантования электронных уровней в малых частицах различных металлов было экспериментально обнаружено в измерениях теплоемкости, статической магнитной восприимчивости, электронного (стационарного) и ядерного магнитного резонанса (см. обзоры ³). В настоящей работе для изучения свойств спин-системы ЭП в малых металлических частицах впервые применен метод электронного спинового эха (ЭСЭ). Полученные результаты показывают, что в условиях квантования электронных уровней и дискретности фононного спектра наблюдается сильное торможение спин-решеточной релаксации электронов.

Измерения ЭСЭ проводились на релаксометре с рабочей частотой $\sim 9,4$ ГГц и временным разрешением $5 \cdot 10^{-7}$ с в диапазоне температур от 2 до 120 К. Исследование поведения спин-системы осуществлялось по затуханию стимулированного эха ⁴ и методом последовательных серий ⁵. Изучались образцы малых металлических частиц, полученные двумя способами. Первый способ заключался в совместном осаждении испаряемого металла (Li, Na, K, Mg) и газа матрицы (CO₂) на подложку, охлаждаемую жидким азотом. Размеры частиц были распределены в широком диапазоне, от отдельных атомов до ~ 200 Å. Для уменьшения числа одиночных атомов и малоатомных кластеров образцы подвергались термической обработке в течение часа при температуре 190 К в инертной атмосфере. Во втором способе в результате химической реакции азотнокислого серебра с таннином и поташем в среде желатины получались коллоидные частицы серебра в желатиновой матрице. По электронно-микроскопическим данным частицы имели разброс по размерам в пределах $30 \div 50$ Å.

На рис. 1 представлены результаты измерений зависимости амплитуды стимулированного эха от времени между вторым и третьим зондирующими импульсами в частицах Li, Na, K, Mg и Ag. На рис. 2 показано изменение амплитуды первичного эха при увеличении периода повторения серии импульсов (метод последовательных серий) в частицах серебра, измеренное при разных температурах.

Из приведенных графиков видно, что кинетика спиновой релаксации в исследованных образцах носит существенно неэкспоненциальный характер. При этом релаксация спин-системы происходит на масштабах времен, значительно превышающих времена спин-решеточной релаксации ЭП в массивных металлах. Например, при температуре 20 К в массивных образцах калия $T_1 \sim 10^{-8}$ с ⁶, в серебре $T_1 \sim 10^{-9}$ с ⁷. Отметим, что спад амплитуды стимулированного эха (рис. 1) происходит значительно быстрее, чем изменение амплитуды эха в методе последовательных серий (рис. 2). Это объясняется, по-видимому, вкладом процессов спектральной диффузии в затухание стимулированного эха.

Оценки среднего расстояния между электронными уровнями Δ_e и минимальной энергии фонона Δ_ϕ для частиц серебра, размером 30 Å, дают

$$\Delta_e \sim E_F/N \sim 100 \text{ К}, \quad \Delta_\phi \sim \Theta_D/N^{1/3} \sim 30 \text{ К},$$

где E_F – энергия Ферми, Θ_D – температура Дебая, N – число атомов в частице. Когда $T \ll \Delta_e$, спин-решеточная релаксация должна быть полностью заблокирована. Однако, по-

сколькx частицы металла находятся в контакте с матрицей, релаксация может быть обусловлена взаимодействием ЭП с заряженными или парамагнитными центрами, находящимися в матрице или на поверхности частиц, либо поверхностным взаимодействием металлических частиц с тепловыми колебаниями матрицы. Неэкспоненциальный характер временных зависимостей измеренных сигналов объясняется как разбросом частиц по размерам (и, соответственно, по Δ_e и T_1), так и статистическим распределением энергетических уровней в частицах одного размера^{1, 2}.

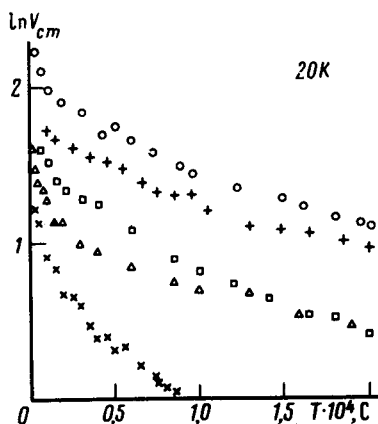


Рис. 1

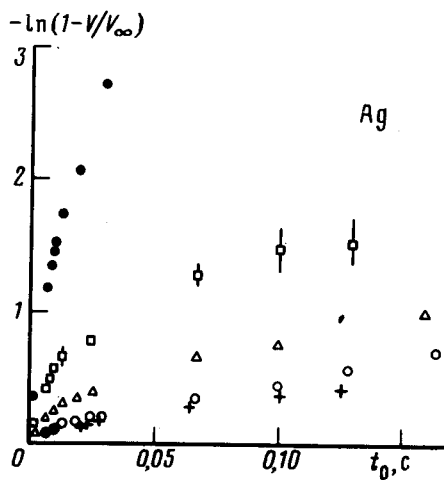


Рис. 2

Рис. 1. Спад амплитуды стимулированного эха в частицах Li(о), Na (□), К (+), Mg (×) и Ag(Δ)

Рис. 2. Зависимость приведенной амплитуды первичного эха V/V_{∞} от периода повторения серии зондирующих импульсов в частицах серебра при температурах: 35 К(о), 20 К(□), 10 К(Δ), 4,2 К(о), 2,0 К(+). ($V = V(t_0)$, $V_{\infty} = V(t_0 = \infty)$)

Авторы благодарят Р.Г.Мустафина за помощь в измерениях, И.А.Гарифуллина, В.А.Жихарева — за полезные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Kubo R. J. Phys. Soc. Japan, 1962, 17, 975; Kubo R. J. Phys. (France), 1977, 38, Suppl. №7, C2-69.
2. Горьков Л.П., Элиашберг Г.М. ЖЭТФ, 1965, 48, 1407.
3. Perenboom J.A., Wyder P., Meier F. Phys. Repts., 1981, 78, 174; Петров Ю.И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982.
4. Hahn E.L. Phys. Rev., 1950, 80, 580.
5. Mims W.B. Rev. Sci. Instr., 1965, 36, 1472.
6. Walsh W.M., Rupp L.W., Schmidt P.H. Phys. Rev., 1966, 142, 414.
7. Lubzens D., Shanabarger M.R., Schultz S. Phys. Rev. Lett., 1972, 29, 1387.