

Письма в ЖЭТФ, том 15, вып. 3; стр. 156 – 159 5 февраля 1972 г.

**НАБЛЮДЕНИЕ СПИНОВОГО ЭХА
НА ЭЛЕКТРОНАХ ПРОВОДИМОСТИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЛИТИИ**

*Э. Г. Харахашьян, Ф. Г. Черкасов, Я. А. Витол,
А. Р. Кессель, В. Ф. Юданов*

Изучение переходных процессов и особенно явлений типа спинового эха дает богатую информацию о кинетических свойствах и внутренних взаимодействиях спиновых систем. Насколько нам известно, спиновое эхо на электронах проводимости (ЭП) в металлах до сих пор не

удавалось наблюдать. Два действующих навстречу друг другу фактора препятствуют регистрации эффекта: чрезвычайно короткие времена спиновой релаксации в металлах (обычно $\tau \sim 10^{-8}$ сек) и высокие скорости диффузии ЭП (коэффициент диффузии ЭП в массивном металле $D \approx 50$ см²/сек).

В настоящей работе сообщается о первом наблюдении спинового эха, обязанного ЭП металлического лития. Необходимые экспериментальные условия удалось реализовать на мелких сферических частицах лития, образовавшихся в монокристаллах LiF в результате облучения их нейтронами и последующей специальной термической обработки [1]. Оценка среднего диаметра частиц, проведенная по асимметрии стационарной линии парамагнитного резонанса на электронах проводимости [2], для нашего образца дала $d \approx 1$ мкм.

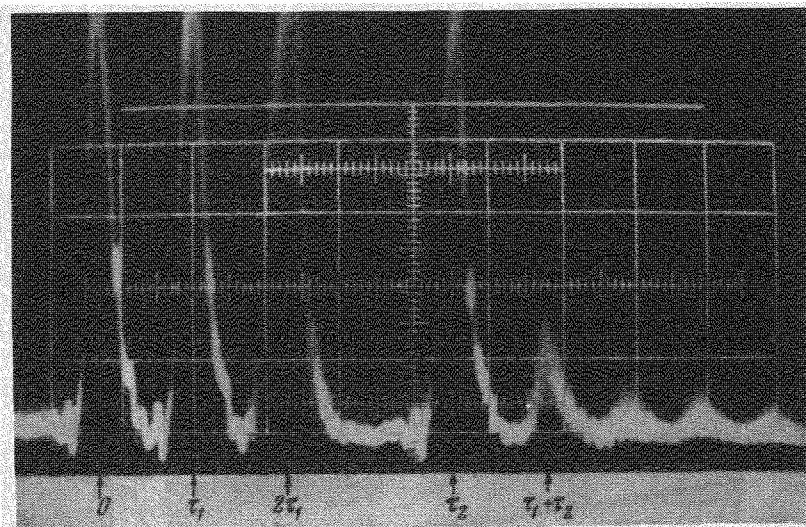


Рис. 1. Осциллограмма сигналов основного ($2\tau_1$) и стимулированного ($\tau_1 + \tau_2$) спиновых эхо ЭП в литии при комнатной температуре. Временной масштаб: 1 дел. — 0,2 мксек

Подобный метод получения частиц металла в щелочногалоидных монокристаллах обеспечивает высокую чистоту образцов, и как следствие, самые длинные времена спиновой релаксации ЭП, которые удается наблюдать в металлах; а малый размер частиц ограничивает скорость диффузии. Действительно, эффективный коэффициент диффузии можно оценить как $D_{\text{эфф}} \approx D(d/\ell)^2$, где ℓ — расстояние, на которое продиффундирует ЭП в массивном металле за время τ_1 между импульсами. В наших экспериментах $\tau_1 \approx 5 \cdot 10^{-7}$ сек, поэтому $D_{\text{эфф}}/D \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$.

Измерения были проведены на импульсном релаксметре 3-сантиметрового диапазона [3] при комнатных температурах. Типичная картина отклика спин-системы ЭП на три одинаковых СВЧ импульса длительностью $4 \cdot 10^{-8}$ сек, приложенных в моменты времени $t = 0, \tau_1$ и τ_2 , приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, при $t = 2\tau_1$ формиру-

ется сигнал основного эха, а при $t = \tau_1 + \tau_2$ возникает сигнал стимулированного эха, за которым следует три вторичных эха.

Размеры частиц лития меньше глубины скин-слоя δ на рабочей частоте измерений ($\delta = 1,6$ мкм), поэтому можно считать, что переменное поле однородно в образце. Тогда амплитуды основного и стимулированного эха, как и в диэлектрике, будут пропорциональны величинам [4]:

$$v_1(t = 2\tau_1) = \exp \left\{ - \frac{2\tau_1}{T_2} - \frac{5}{3} k\tau_1^3 \right\},$$

$$v_2(t = \tau_1 + \tau_2) = \exp \left\{ - \frac{\tau_1 + \tau_2}{T_2} - (\tau_2 - \tau_1) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) - k\tau_1 \times \right. \\ \left. \times \left[\tau_2^2 + \tau_2\tau_1 - \frac{\tau_1^2}{3} \right] \right\},$$

где T_1 и T_2 – времена релаксации продольной и поперечной компонент спиновой намагниченности, $k = (\gamma G)^2 D_{\text{эфф}}$, γ – гиромагнитное отношение ЭП, G – градиент постоянного магнитного поля (в наших экспериментах $G \sim 70$ э/см). Определение величин $v_1(\tau_1)$ и $v_2(\tau_2)$ позволяет, в принципе, найти параметры T_1 , T_2 и k .

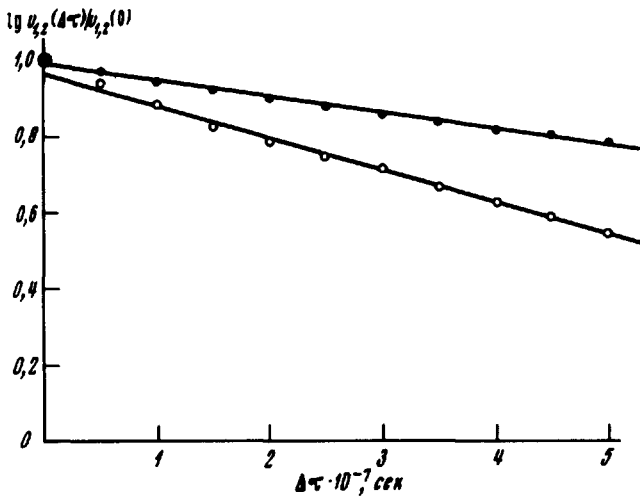


Рис. 2. Зависимость амплитуды основного v_1 и стимулированного v_2 спиновых эхо от изменения $\Delta\tau$ интервалов τ_1 и τ_2 соответственно: o – $v_1(\tau_1)$; • – $v_2(\tau_2)$

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость амплитуд основного и стимулированного эха от интервалов τ_1 и τ_2 соответственно. В пределах ошибок измерений экспериментальные точки ло-

жатыся на прямые, что свидетельствует об отсутствии заметного вклада диффузионных процессов в затухание сигналов эха. Это подтверждает высказанное выше соображение об эффективном ограничении диффузии малыми размерами частиц металла. Пренебрегая диффузионными членами в выражениях для $v_1(\tau_1)$ и $v_2(\tau_2)$ из приведенных на рис. 2 экспериментальных зависимостей находим: $T_1 = (1,06 \pm 0,15) \text{ мксек}$ и $T_2 = (1,03 \pm 0,10) \text{ мксек}$. Вместе с $T_2^* = (1,13 \pm 0,10) \text{ мксек}$, полученным из измерений ширины стационарной линии поглощения (пиковая ширина резонансной линии нашего образца $\delta H = 58 \pm 5 \text{ мГс}$), эти данные свидетельствуют о том, что в пределах ошибок $T_1 = T_2 = T_2^*$ и, таким образом, являются прямым экспериментальным подтверждением справедливости важного положения теории [5] о равенстве времен релаксации продольной и поперечных компонент спиновой намагниченности ЭП.

Заметим, в заключение, что для массивных металлов диффузия ЭП приводит к чрезвычайно быстрому затуханию сигналов эха. Вероятно, по этой причине в работе [6] наблюдались только сигналы свободной индукции, следующие непосредственно после СВЧ импульсов и не удалось измерить сигналов эха в массивных образцах лития и натрия. Вместе с тем, проведение в дальнейшем исследований спинового эха ЭП на образцах промежуточных размеров $d \approx 5 - 10 \text{ мкм}$ даст прямой метод измерения скорости диффузии ЭП.

Казанский
физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 января 1972 г.

Литература

- [1] M.Lambert, P.Berge, Ch. Mazieres, A.Guinier. Compt. rend., 249, 2054, 1959; Y.W.Kim, R.Kaplan, P.J.Bray. Phys. Rev., 117, 740, 1960.
- [2] A.R.Kessel, E.G.Kharakhashyan, G.B.Teitelbaum, I.G.Zamaleev. Magnetic resonance and related phenomena; Proc. of the XVI-th congress AMPERE. Bucharest, 1970, p.1125.
- [3] А.Г.Семенов, В.Е. Хмелинский. ПТЭ, №5, 197, 1967.
- [4] А.Лёше. Ядерная индукция, М., ИИЛ, 1963.
- [5] В.В.Андреев, В.Н.Герасименко. ЖЭТФ, 35, 1209, 1958.
- [6] D.R.Taylor, R.P.Gillen, P.H.Schmidt. Phys. Rev., 180, 427, 1969.