

ЗАВИСИМОСТЬ СИГНАЛОВ СПИНОВОГО ЭХА ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ ВОЗБУЖДАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

В.А.Жихарев, Н.В.Новоселов, Э.Г.Харахашьян,
Ф.Г.Черкасов, А.Я.Витол¹⁾

Экспериментально обнаружена предсказанная ранее аномальная зависимость сигналов эха электронов от амплитуды радиочастотного поля в массивном металле.

Хорошо известно, что величина сигнала спинового эха в диэлектрических парамагнетиках является периодической функцией амплитуды переменного поля H_1 возбуждающих импульсов (см., например, [1]). Для основного эха эта зависимость имеет вид:

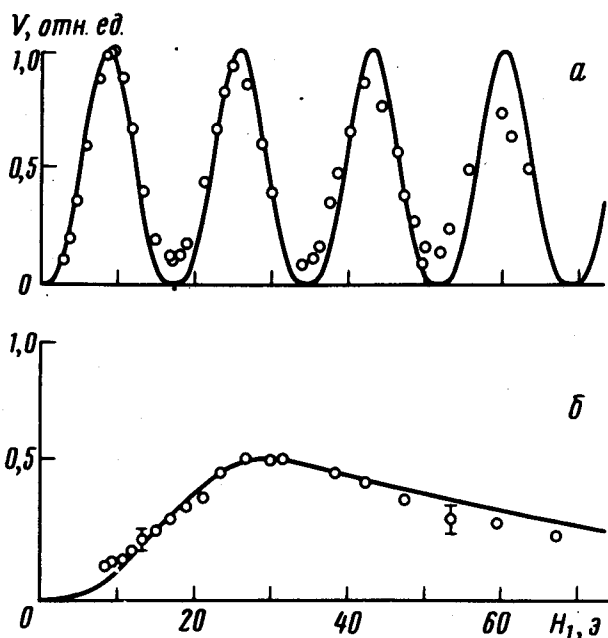
$$V(H_1) = \frac{1}{2} \mu_0 \sin \gamma H_1' t_1 \sin^2 \frac{\gamma H_1'' t_2}{2}, \quad (1)$$

где H_1' , t_1 и H_1'' , t_2 — амплитуда поля и длительность первого и второго импульсов соответственно, γ — гиромагнитное отношение парамагнитного центра, μ_0 — равновесная намагниченность электрона. Своеобразие переходных процессов в спин-системе электронов проводимости связано с наличием скин-эффекта в металлах и с высокой подвижностью парамагнитных центров. Недавно в работе [2] была построена теория спинового эха и свободной индукции электронов в массивных металлах. В частности, было показано, что для спинового эха на электронах проводимости (СЭЭП) периодическая зависимость (1), характерная для диэлектриков, справедлива лишь для металлических образцов с малыми размерами $d \lesssim \delta$ (где δ — глубина скин-слоя). В случае же "массивных" образцов, когда $d^2 \gg 2Dt_i$ (где D — коэффициент диффузии электронов, t_i — длительность возбуждающего импульса) зависимость величины сигнала СЭЭП от амплитуды переменного магнитного поля описывается непериодической функцией с одним максимумом (см. рисунок):

$$V(H_1) = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{D}{\gamma^2 H_1' H_1'' d^2 \delta^2} \left[\exp \left\{ -\frac{\gamma^2 H_1'^2 \delta^2}{D} t_1 \right\} - 1 \right] \times \\ \times \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\gamma H_1'' \delta}{\sqrt{D}} \sqrt{t_2} + i \Phi \left(i \frac{\gamma H_1'' \delta}{\sqrt{D}} \sqrt{t_2} \right) \exp \left\{ -\frac{\gamma^2 H_1''^2 \delta^2}{D} t_2 \right\} \right], \quad (2)$$

где $\Phi(x)$ — интеграл ошибок.

¹⁾Сотрудник института физики Академии наук Латвийской ССР.



Зависимость величины сигнала СЭЭП V от амплитуды переменного поля H_1 : a — о — экспериментальные данные для образца $d = (1 + 2) \cdot 10^{-4}$ см, — — теоретическая зависимость, соответствующая модулю выражения (1); b — о — экспериментальные данные для образца $d = (15 + 20) \cdot 10^{-4}$ см, — — теоретическая зависимость, соответствующая (2).

В настоящей работе на образцах металлического лития проведены экспериментальные исследования СЭЭП при переменной мощности СВЧ-импульсов. Измерения выполнены на трехсантиметровом релаксметре типа [3] с максимальной мощностью в импульсе до 5 квт. Для возбуждения эха использовалась серия двух импульсов с длительностями 20 и 40 нсек. Измерения проводились на двух образцах, которые представляли собой сфероидальные частицы металла, взвешенные в герметическом контейнере из LiF. Средний диаметр частиц в одном образце составлял $\sim 1 \div 2$ мкм, в другом $\sim 15 \div 20$ мкм. Это соответствует отмеченным выше случаям "малых" и "массивных" образцов. Действительно, для условий нашего эксперимента и при величине коэффициента диффузии электронов в литии $D \approx 15$ см²/сек [4], характерными размерами являются $\delta \approx 1,6$ м и $\sqrt{2Dt_i} \approx 10$ м. Образец с малыми размерами частиц был получен облучением чистого монокристалла LiF — тепловыми нейтронами в реакторе (доза облучения $\sim 10^{19}$ нейтрон/см²), образец с крупными частицами получен методом высокотемпературного электролиза в твердой фазе [4, 5]. После радиолиза и электролиза кристаллы LiF, с образовавшимися в них металлическими включениями подвергались термическому отжигу для гомогенизации формы и увеличения размера частиц лития. Применение подобной техники приготовления обусловлено необходимостью получения металлических образцов весьма высокой чистоты, на которых удается уверенно наблюдать сигналы СЭЭП. Экспериментальные результаты, полученные из

измерений зависимости величины эхо-сигнала от амплитуды переменного магнитного поля для обоих образцов суммированы на рисунке. Здесь же представлены теоретические зависимости, соответствующие выражениям (1)¹⁾ и (2).

Как видно из рисунка *a* для образца с $d \sim \delta$ отчетливо наблюдается периодическая зависимость сигнала СЭЭП от H_1 (небольшое падение амплитуды осцилляций V с ростом H_1 связано с изменением степени согласования СВЧ-тракта релаксометра при различных уровнях мощности). При этом величина периода в пределах ошибок эксперимента совпадает с теоретической.

Данные измерений на образце с $d \gtrsim \sqrt{2Dt_2}$ приведены на рис. *b*. Теоретическая кривая, соответствующая выражению (2) построена при значениях $D \approx 15 \text{ см}^2/\text{сек}$ и $\delta = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Представленные на рис. *b* результаты свидетельствуют о количественном согласии между теорией и экспериментом и, таким образом, подтверждают существование аномальной зависимости сигналов СЭЭП от амплитуды СВЧ-поля в массивном металле.

Казанский физико-технический
институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6 декабря 1975 г.

Литература

- [1] А.Абрагам. Ядерный магнетизм, ИИЛ, 1963.
- [2] В.А.Жихарев, А.Р.Кессель. ЖЭТФ, 67, 1758, 1974.
- [3] А.Г.Семенов, В.Е.Хмелинский. ПТЭ, 5, 197, 1967.
- [4] F.G.Cherkasov, E.G.Kharakhash'yan, V.F.Yudanov. Phys.Lett., 50A, 399, 1975.
- [5] I.V.Kurchatov, K.D.Sinelnikov, A.K.Valter, O.N.Trapeznikova. Phys. Zs. Sow., 1, 337, 1932.

¹⁾Учитывая тот факт, что нами использовался релаксометр, работающий по некогерентной схеме детектирования, приведенная на рисунке *a* теоретическая зависимость, в действительности, соответствует модулю выражения (1).