

## СПИНОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАССЕЯНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

И.Г.Замалеев, Э.Г.Харахашьян

Методом стационарного парамагнитного резонанса на пленках лития измерена величина вероятности переориентации спина электрона  $\epsilon$  на границе образца с сильным спиновым рассеивателем (инвар, ниобий). Обнаружен новый тип поверхностной релаксации с характерными размерной и температурной зависимостями, когда скорость релаксации определяется не величиной  $\epsilon$ , а скоростью диффузии электрона.

Теория формы линии парамагнитного резонанса на электронах проводимости (ПРЭП) с учетом неупругого рассеяния спинов на поверхности образца была построена Дайсоном [1] (в дальнейшем теорию уточнил Уолкер [2]). В общем случае она приводит к весьма громоздкому выражению для формы резонансной линии, которой нельзя сопоставить единое время поверхностной релаксации  $T_s$ . Лишь в асимптотическом смысле малости математического параметра теории Дайсона  $Q = \frac{3\epsilon d}{4(1-\epsilon)\lambda} \ll 1$  удается получить простое аналитическое выражение

$$T_s^{-1} = \epsilon v_F d^{-1}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — усредненная по углам вероятность переориентации спина в одном акте столкновения с поверхностью,  $v_F$  — скорость Ферми,  $\lambda$  — длина свободного пробега электрона,  $d$  — толщина образца. Выражение (1) справедливо при условии слабой поверхностной релаксации и обычно используется для извлечения  $\epsilon$  из наблюдаемой ширины линии. Представляет, однако, несомненный интерес исследовать противоположный асимптотический случай  $Q \gg 1$ , что соответствует сильному влиянию поверхности на физические свойства образца (к этому случаю может, например, относиться ситуация со слабомагнитным металлом, находящимся в гальваническом контакте с ферромагнетиком, когда возможна поляризация электронов проводимости слабомагнитного металла за счет естественной или вынужденной диффузии носителей из ферромагнитной подложки [3, 4]).

Целью настоящей работы является изложение предварительных результатов экспериментального изучения этого вопроса методом ПРЭП на пленках лития с сильными спиновыми рассеивателями на границе: "магнитным" (инвар) и "спин-орбитальным" (ниобий). Выбор данных металлов обусловлен тем, что в Li легко наблюдаются узкие сигналы спинового резонанса с температурно-независимой шириной линии, а Fe, Ni, Nb не растворимы в Li. Пленки лития с подслоем инвара или ниобия готовились последовательным испарением в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  торр. В каждом акте откачки напылялось пять образцов с разными толщинами слоев лития но с идентичным подслоем рассеивателя ( $< 50 \text{ \AA}$ ), а также контроль

ные образцы без рассеивателя, что позволило выделить поверхностный вклад в релаксацию. Толщина слоев лития контролировалась кварцевым измерителем толщины непосредственно в процессе напыления, толщина подслоя инвара (ниобия) оценивалась с помощью интерференционного микроскопа. Интервал исследованных толщин слоев лития составлял  $d = 0,7 + 4,7 \text{ мкм}$ . Измерения сигналов ПРЭП проводились на трехсантиметровом радиоспектрометре в интервале температур  $100 + 400 \text{ К}$ .

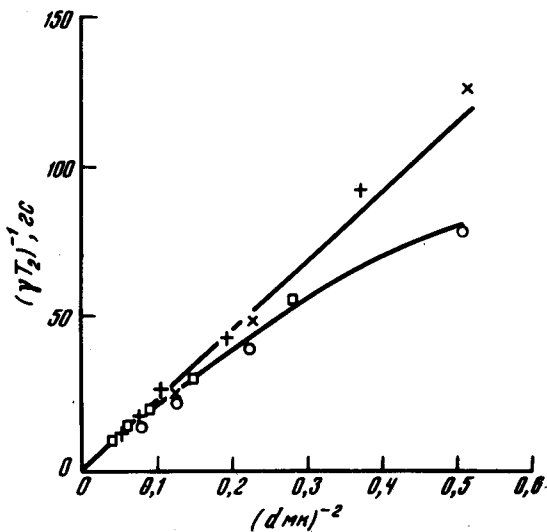


Рис. 1. Размерная зависимость ширины линии ПРЭП. Образцы с подслоями: а — инвара — +, ×, б — ниобия — о, □ (для разных актов напыления)

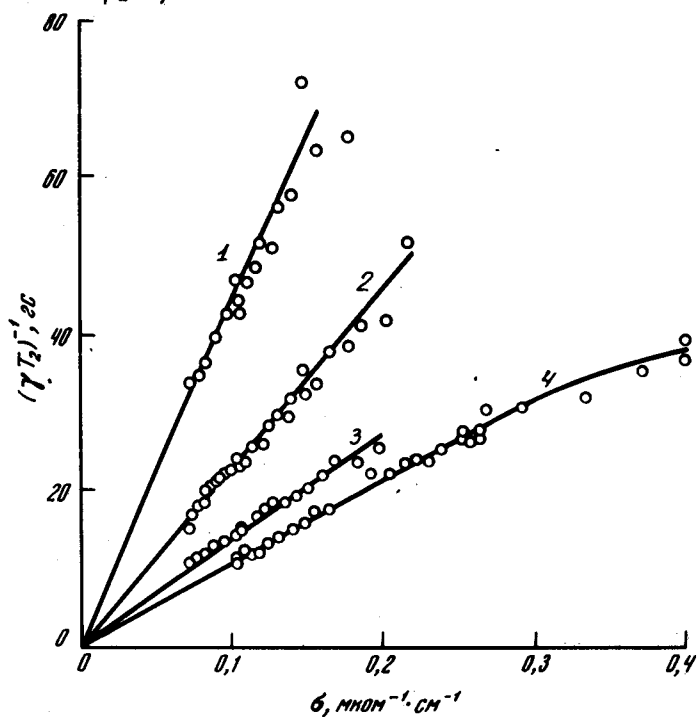


Рис. 2. Зависимость ширины линии от электропроводности для образцов с инваровым подслоем и толщиной слоев лития в микронах:  $d = 2,1$  (1);  $2,8$  (2);  $3,5$  (3);  $4,2$  (4)

Присутствие инвара на границе лития приводило к резкому уширению (почти на два порядка) линии ПРЭП и размерной и температурной зависимостям ширины линии вида  $(\gamma T_s)^{-1} \sim \lambda d^{-2}$ , которые показаны на рис. 1 и рис. 2. Эти данные являются первым однозначным наблюдением температурно-зависимой поверхностной релаксации, возможность существования которой неоднократно дискутировалась в литературе [2, 5 - 7]. Приведенные результаты могут быть интерпретированы на основе простых физических аргументов. Условия эксперимента таковы ( $d \gg \lambda$ ), что электрон, пересекая образец, движется диффузионно. Можно показать, что при каждом "диффузионном подходе" к рассеивающей границе электрон испытывает в среднем  $\sim d/\lambda$  баллистических столкновений с поверхностью образца (толщиной подслоя рассеивателя пренебрегаем, так как она  $< \lambda$ ). Тогда параметр Дайсона  $Q$  приобретает физический смысл величины, пропорциональной вероятности переориентации спина при одном "диффузионном подходе" к границе. При больших  $Q$  велика вероятность рассеивания при первом же таком подходе, и время жизни спина равно среднему времени достижения границы электроном. Следовательно, в этом случае должно существовать простое решение:

$$T_s^{-1} = \alpha D d^{-2}, \quad (2)$$

где  $D = \frac{1}{3} v_F \lambda$  — коэффициент диффузии электронов,  $\alpha$  — числовой

коэффициент усреднения. Важно подчеркнуть, что (2) справедливо не только для  $\epsilon = 1$  (см. [7]), но и при более слабом условии  $Q \gg 1$  в широком интервале величин  $\epsilon$ . Действительно, проведенный с помощью ЭВМ численный расчет выражений Дайсона показал, что при  $Q > 4$  ширина линии  $(\gamma T_s)^{-1}$  не зависит от  $\epsilon$ <sup>1)</sup> и описывается выражением (2) с  $\alpha \approx 2,5$ . Из наклона размерной зависимости (рис. 1) с помощью выражения (2) получим значение коэффициента диффузии электронов при комнатной температуре  $D = 16 \pm 3 \text{ см}^2/\text{сек}$ , которое согласуется с ранее проведенными измерениями методом спинового эха [8].

Величина  $\epsilon$  для границы с инваром велика, поэтому отклонения от условий сильной релаксации наблюдаются лишь при самых низких температурах (рис. 2). Непрерывный переход между обоими типами релаксации удалось осуществить для более слабого "спин-орбитального" рассеивателя (ниобий). Размерная зависимость ширины линии ПРЭП для образцов с ниобием приведена на рис. 1, а температурная зависимость в координатах приведенная ширина линии  $(\gamma T_s)^{-1} d^2$  — проводимость  $\sigma$ , удобных для анализа типа поверхностной релаксации — на рис. 3. Из рис. 1 и рис. 3 видно, что при высоких температурах, больших  $d$ , экспериментальные результаты описываются выражением (2), а при низких температурах, малых  $d$  — выражением (1). Это позволило определить величину вероятности переориентации спина электрона

<sup>1)</sup> Было обнаружено, однако, что форма наблюдаемой линии ПРЭП в этом случае зависит от  $\epsilon$ , если толщина образца больше глубины скин-слоя.

проводимости на границе с ниобием  $\epsilon(\text{Nb}) = (5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ . По изменению наблюдаемой формы линии проведена оценка  $\epsilon(\text{инвар}) \approx 10^{-2}$ .

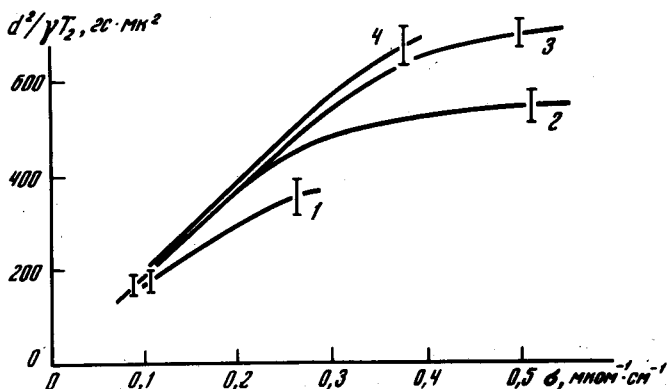


Рис. 8. Температурная зависимость "приведенной" ширины линии: 1, 2, 3 — для образцов с ниобиевым подслоем и толщиной лития 2,8 мкм, 3,3 мкм, 4,0 мкм, соответственно; 4 — для образцов с инваровым подслоем (усредненная по всем измерениям)

Возможное изменение  $g$ -фактора, а также усиление интенсивности резонансного сигнала, вследствие поляризации электронов проводимости в литии, в исследуемых образцах не обнаружены.

Авторам приятно поблагодарить А.С.Боровика-Романова и К.А.Валиева за конструктивную критику работы, А.Р.Кесселя и В.А.Жихарева — за многочисленные плодотворные обсуждения проблемы поверхностной релаксации, В.Н.Лисина — за полезные советы.

Казанский

физико-технический институт  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
28 апреля 1978

### Литература

- [1] F. Dyson. Phys. Rev., **98**, 349, 1955.
- [2] M. V. Walker. Phys. Rev., **3B**, 30, 1971.
- [3] Е.К.Завойский. Письма в ЖЭТФ, **21**, 418, 1975.
- [4] А.Г.Аронов. Письма в ЖЭТФ, **24**, 37, 1976.
- [5] A. J. Watts, J. E. Cousins. Phys. Stat. Sol., **30**, 105, 1968
- [6] S. Wang, R. Schumacher. Phys. Rev., **8B**, 4119, 1973.
- [7] В.А.Жихарев, А.Р.Кессель, Э.Г.Харахашьян, Ф.Г.Черкасов, К.К.Шварц. ЖЭТФ, **64**, 1356, 1973.
- [8] F. Cherkasov, et al. Phys. Lett, **50A**, 399, 1975.