

## МИКРОКОНТАКТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МАГНОНОВ В МЕТАЛЛАХ

А. И. Акименко, И. Б. Янсон

Исследованы нелинейности вольт-амперных характеристик точечных контактов из Gd, Ho, Tb. Обнаружены особенности на зависимости второй производной  $d^2V/dI^2$  от  $eV$ , которые соответствуют особенностям магнонных спектров этих металлов и интерпретируются как проявление зависимости электрон-магнонного взаимодействия от энергии.

В последние годы метод микроконтактной спектроскопии успешно используется для исследования электрон-фононного взаимодействия в металлах [1]. В принципе, этот метод позволяет исследовать взаимодействие электронов и с другими возбуждениями. В настоящей работе представлены результаты исследования малых нелинейностей вольт-амперных характеристик точечных контактов из редкоземельных ферро-магнитных металлов, которые интерпретируются как проявление зависимости электрон-магнонного взаимодействия (ЭМВ) от энергии.

Наибольшее число экспериментов выполнено на прижимных контактах типа "игла-наковальня" из Gd (отношение  $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 50$ ). Исследовались также контакты из Ho и Tb ( $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 25$  и 20 соответственно). Контактные поверхности обрабатывались только механически, так как из-за высокой химической активности этих металлов при травлении и электрополировке образовывался очень прочный окисный слой, препятствовавший созданию металлического контакта. После механической полировки электроды находились минимальное время на воздухе ( $\sim 5$  мин), тем не менее образующийся при этом слой окисла значительно затруднял образование контакта. В экспериментах, выполненных при температурах 1,5 — 4,2К, записывались зависимости второй гармоники модулирующего напряжения —  $V_2$ , пропорциональной

второй производной  $d^2V/dI^2$ , от напряжения  $V$  на контакте (микроконтактные спектры). Представленные ниже спектры получены на контактах с сопротивлениями  $25 + 400$  Ом. Ограничение снизу на сопротивление контакта есть следствие необходимости выполнения неравенства  $d < l_i$  или  $d < \lambda = \sqrt{l_i l_e}$  ( $d$  — диаметр контакта;  $l_i, l_e$  — импульсная и энергетическая длины свободного пробега электронов).

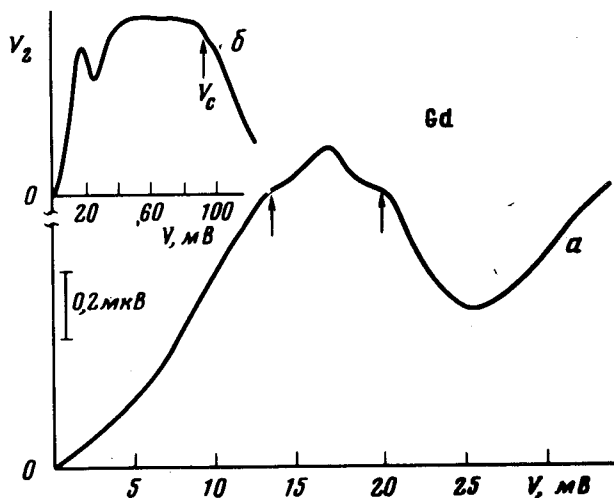


Рис. 1. а — Микроконтактный спектр Gd при первых касаниях иглой наковальни.  $R = 37$  Ом,  $T = 4,2$  К,  $V_1^{(1)} = 0,8$  мВ. Стрелками отмечены положения особых точек  $d\omega/dq = 0$  на дисперсионных кривых магновов по данным работы [2]. б — Тот же спектр в сжатом по  $V$  масштабе. Стрелкой отмечено значение  $V_c = 3,62 kT_c/e$ , соответствующее разогреву контакта до температуры Кюри, согласно [5].  $V_1 = 0,5$  мВ

На рис. 1 показаны микроконтактные спектры Gd. При первых касаниях между иглой и наковальней наблюдается спектр, приведенный на рис. 1, а (кривая 1), который в более сжатом масштабе по  $V$  показан на рис. 1, б. Видно, что на монотонно возрастающем фоне в области энергий  $eV < 25$  мэВ имеются особенности, которые могут быть сопоставлены с положениями особых точек  $d\omega/dq = 0$  на дисперсионных кривых магновов, известных по данным нейтронографии [2]. Фонный спектр Gd заканчивается при 13 мэВ, следовательно часть кривой  $V_2(eV)$  при  $eV > 13$  мэВ может быть обусловлена только взаимодействием электронов с магнонами. Из измерений температурной зависимости электросопротивления [3] следует, что электроны преимущественно рассеиваются на магнонах (а не на фонах) в широком температурном интервале. Следовательно, можно предположить, что вся наблюдаемая характеристика  $V_2(eV)$  (рис. 1, а) обусловлена электрон-

1)  $V_1$  — эффективное значение напряжения первой гармоники модулирующего сигнала на контакте.

магнетонным взаимодействием и пропорциональна плотности магнетонных состояний [4], и вклад фононов при  $eV < 13$  мэВ сравнительно мал. Пропорциональность между  $V_2(eV)$  и плотностью магнетонных состояний означает, что температура в области контакта все время остается много меньше  $eV$  [1, 3].

По мере увеличения напряжения на контакте средняя длина свободного пробега электронов укорачивается, и когда она становится меньше диаметра контакта, осуществляется переход к тепловому режиму, при котором температура в центре контакта связана с напряжением на нем простым соотношением  $eV = 3,62 kT$ . Из рис. 1, б видно, что когда  $V \rightarrow V_c$  на  $V_2(eV)$ -характеристике появляется особенность, обусловленная переходом металла в области контакта из ферромагнитного в парамагнитное состояние при  $T \rightarrow T_c$  [5].

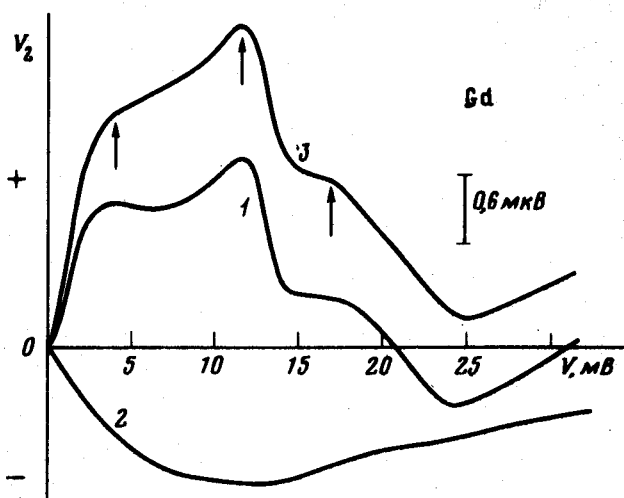


Рис. 2. Микроконтактный спектр деформированных контактов Gd. (кривая 1),  $R = 25 \text{ Ом}$ ,  $V_1 = 0,5 \text{ мВ}$ ,  $T = 1,7 \text{ К}$ . Кривая 2 — зависимость фона от энергии, кривая 3 — результат вычитания фона из кривой 1. Стрелками показаны положения особенностей на микроконтактном спектре Gd, которые повторяются для различных контактов

Если изменять сопротивление контакта, увеличивая прижимное усилие между электродами или производя "заварку" контакта током, то  $V_2(eV)$ -характеристики значительно деформируются, принимая в наиболее типичном случае вид, показанный на рис. 2 (кривая 1). Как видно, часть  $V_2(eV)$ -характеристики отрицательна, что является следствием наложения истинного спектра ЭМВ и гладкого фона, который для деформированных контактов становится отрицательным. Так же, как и при микроконтактной спектроскопии фононов,  $V_2(eV)$ -характеристики предельно грязных контактов состоят только из фона [6]. Одна из таких характеристик показана на рис. 2 (кривая 2). Вычитая ее из кривой 1, получим результирующий спектр ЭМВ (кривая 3). На типичных спектрах ЭМВ Gd обычно выделяются три особенности: при  $eV = 4 \text{ мэВ}$ ,

$eV = 11$  мэВ и  $eV = 17$  мэВ —, и спектр заканчивается при  $20 + 25$  мэВ в полном согласии с дисперсионными кривыми магнонов. Интенсивности особенностей, наблюдаемых в спектрах различных контактов, могут заметно варьировать, что, возможно, объясняется анизотропией ЭМВ, проявляющейся при случайной ориентации кристаллитов в области контакта. Положение особенностей на оси  $V$  изменяется мало ( $\pm 1$  мэВ).

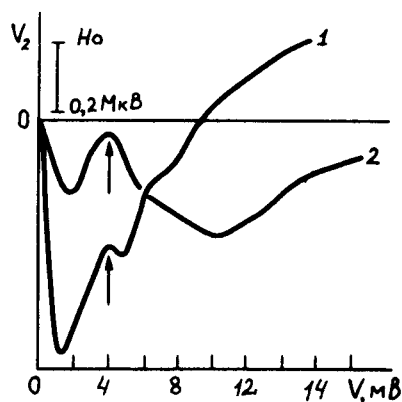


Рис. 3. Микроконтактные спектры двух различных контактов из Ho: 1 —  $R = 50$  Ом,  $V_1 = 0,8$  мВ, 2 —  $R = 40$  Ом,  $V_1 = 0,6$  мВ,  $T = 1,7$  К

На рис. 3 показаны  $V_2(eV)$ -характеристики микроконтактов Ho — Ho. Как известно, Ho претерпевает переход из АФ в ФМ состояние при 20К. В магнотном спектре Ho, согласно нейтронным данным [7], имеются низкочастотные ветви, соответствующие интенсивному максимуму в плотности магнотных состояний при  $eV = 4 + 5$  мэВ. Максимумы (или изломы) при этом напряжении наблюдаются на всех спектрах Ho-контактов. Они обусловлены ЭМВ, так как плотность фонотных состояний Ho в этой области энергий мала и не содержит максимумов [8]. Первый максимум плотности фонотных состояний Ho имеет место при  $6 + 7$  мэВ, его слабые следы также видны на некоторых микроконтактных спектрах (кривая 1 на рис. 3). Так же, как и для Gd, фон на спектрах Ho-контактов содержит провал с отрицательными значениями  $V_2$ . Ширина области отрицательных значений  $V_2$  варьирует от контакта к контакту, положение магнотного максимума на оси  $V$  при этом не изменяется. Важно отметить, что наложение магнотного поля напряженностью 2 кЭ сдвигает максимум при 4 мэВ для Ho в сторону меньших энергий приблизительно на 10%.

Микроконтактные спектры Tb подобны рассмотренным выше спектрам для Gd, за исключением того, что они заканчиваются при 14,5 мэВ в соответствии с нейтронными данными для магнонов [9].

Все спектры ЭМВ симметричны относительно начала координат, ширина полос пропорциональна  $kT$  в соответствии с теорией [4]. Наблюдаемые нелинейности соответствуют суммарному изменению дифференциального сопротивления контакта приблизительно на 10%. Эти наблюдения, наряду с явными корреляциями между положениями особенностей  $V_2(eV)$ -характеристик на оси энергий и особыми точками на дисперсионных кривых для магнонов, убеждают нас в том, что в наших экспе-

риментах действительно удалось зарегистрировать спектральные функции ЭМВ Gd, Ho и Tb. Ранее такие попытки были предприняты в работе [10], где, по-видимому, был реализован лишь тепловой режим.

Авторы глубоко благодарны Б.И.Веркину за внимание к работе и ее поддержку, В.В.Еременко и И.О.Кулику – за полезные обсуждения.

Физико-технический институт  
низких температур  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
8 декабря 1979 г.

### Литература

- [1] И.К.Янсон, И.О.Кулик: "Микроконтактная спектроскопия фононов в металлах", препринт ФТИНТ АН УССР №24, 1978 г. см. также Journal de Physique, Colloque C6, Supplement au n°88) 39, C6-1564, 1978.
- [2] W.C.Koehler. Phys. Rev. Lett., 24, 16, 1970.
- [3] N.V.Volkenshtein, V.P.Dyakina, V.E.Startsev. Phys. Stat. Solidi (b), 57, 9, 1973.
- [4] И.О.Кулик, Р.И.Шехтер. ФНТ, 1979.
- [5] B.I.Verkin, I.K.Yanson, I.O.Kulik, O.I.Shklyarevski, A.A.Lysykh, Yu.G.Naydyuk. Solid State Comm., 30, 215, 1979.
- [6] И.К.Янсон. ФНТ, 3, 1516, 1977.
- [7] M.W.Stringfellow, T.M.Holden, B.M.Powell, A.D.B.Woods. J. Phys. C: Metal Phys., Suppl., №62, 1970, p.189.
- [8] R.M.Nicklow, N.Wakabayashi, P.R.Vijayaraghavan. Phys. Rev., B3, 1229, 1971.
- [9] J.Jensen, J.C.Houmann, H.Bjerrum Møller. Phys. Rev., B12, 303, 1975; 12, 320, 1975. 12, 332, 1975.
- [10] H.P.Leppin, D.K.Wohlleben. "Point contact spectroscopy of magnons in metals", Physikalische Institute der Universität zu Köln, preprint, october, 1978.