

МАГНИТНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТАНТАЛА С ОСЬЮ СИММЕТРИИ ПЯТОГО ПОРЯДКА

В.Г.Трубачев, А.И.Товстолыткин, А.П.Шпак

*Институт металлофизики АН Украины
252142 Киев, Украина*

Поступила в редакцию 14 марта 1994 г.

В полях до 200Э изучены структурные и магнитные свойства тонких пленок, сформированных из ансамбля кластеров тантала с осью симметрии пятого порядка. Обнаружено резкое увеличение магнитного отклика пентагональных кластеров тантала по сравнению с массивным танталом. Сдвиг петли гистерезиса, характерный для сложных неколлинеарных магнетиков, наблюдается при $T = 5\text{К}$ после охлаждения пленок в присутствии внешнего магнитного поля. Делается предположение, что наблюдаемые аномалии магнитных свойств вызваны икосаэдрическим типом симметрии кластеров.

Одним из интересных объектов в физике конденсированного состояния, привлекающих внимание исследователей в последние годы, являются металлические кластеры. Причина этого интереса не только в занимаемом ими промежуточном положении между изолированными атомами и массивным твердым телом. Он еще обусловлен и тем, что при определенных условиях формирования кластеров экспериментально наблюдается появление осей симметрии пятого порядка, запрещенных законами классической кристаллографии. Такой кластер как самостоятельный объект представляет интерес с точки зрения особых физических свойств, например магнитных. Возможно, что эта одна из особенностей может приобретать исключительно нетривиальный характер в ансамбле таких кластеров с размерами 1...10 нм.

В данной работе представлены результаты исследований магнитных свойств ансамбля кластеров тантала с осью симметрии пятого порядка, приготовленных в виде двух пленок на тонких (5 мкм) лавсановых подложках. Толщина сформированного на подложке слоя пентагональных кластеров (ПК) тантала составляла $\sim 100\text{нм}$ (пленка 1) и $\leq 1000\text{нм}$ (пленка 2). Обнаружено существенное отличие магнитных свойств ПК тантала от свойств массивного тантала с объемноцентрированной кубической (ОЦК) кристаллической решеткой.

Образцы с нанесенными кластерами тантала исследовались методами рентгеноструктурного анализа и высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (JEM-2000 FXII). Рентгеноструктурное исследование пленок проводилось на универсальном дифрактометре HZG-4A с использованием K_{α} излучения Fe. Измерение проводилось по точкам в несколько проходов. Особенностью представленного на рис.1 фрагмента дифрактограммы являются линии метастабильной модификации тантала с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, не свойственной для макроскопического состояния тантала. Высокоразрешающая электронная микроскопия позволила выявить габитус кластеров тантала, характерный для кластера с пентагональной симметрией. По-видимому, в данном случае появление осей симметрии пятого порядка в кластерах с размером порядка 10 нм можно рассматривать на качественном уровне как следствие коллективного поведения ансамбля из одинаковых ГЦК

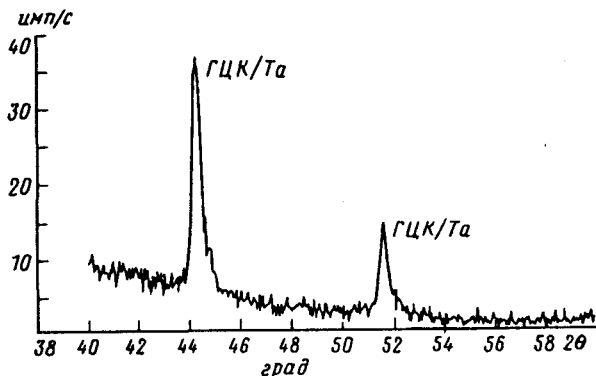


Рис.1. Фрагмент дифрактограммы от пентагональных кластеров тантала, сформированных в виде пленки толщиной ~ 100 нм (пленка 1)

кристаллов, имеющих форму тетраэдра и при этом многократно сдвойнированных. Необходимо отметить отличие данного типа симметрии, присущей ПК чистого тантала, от квазикристаллической симметрии, характерной для квазикристаллов [1].

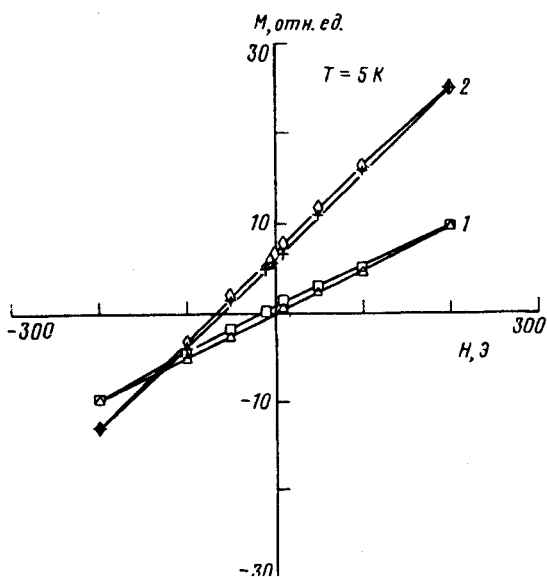


Рис.2. Петли гистерезиса при $T = 5$ К после охлаждения пленки 1 в присутствии магнитного поля $H_c = 200$ Э (кривая 2) и без него (кривая 1)

Магнитное поведение пленок из ПК тантала изучалось при помощи SQUID-магнитометра в полях до 200 Э. Результаты исследования магнитных свойств ПК тантала (пленка 1) приведены на рис.2. Кривая намагничивания 1 получена путем циклического изменения магнитного поля H после охлаждения образца от комнатной температуры до $T = 5$ К при отсутствии внешнего магнитного поля. Появление гистерезиса на зависимости $M(H)$ является довольно неожиданным. Хорошо известно, что тантал, имеющий в массивном состоянии ОЦК структуру вплоть до точки плавления, относится к переходным $5d$ -металлам, не обладающим магнитным упорядочением во всем интервале температур [2,3]. Проведенные нами измерения намагниченности образца тантала с объемом, превышающим объем ПК тантала (пленка 1) на два порядка, не позволили выделить слабый полезный сигнал на фоне сигнала от держателя

образца. Таким образом, магнитный отклик ПК тантала, как минимум, на два порядка выше, чем в ОЦК тантале.

Весьма интересной является петля гистерезиса 2, полученная после охлаждения пленки 1 от $T \sim 50$ К до 5 К в присутствии внешнего магнитного поля $H_c = 200$ Э. По сравнению с кривой 1 значительно увеличилась остаточная намагниченность M_r , и возрос угол наклона. Отношение M_r к намагниченности в поле 200 Э $M(200)$ для кривой 2 равно 0,28. Весьма впечатляющим является сдвиг петли гистерезиса на 60 Э в направлении, противоположном магнитному полю, приложенному во время охлаждения. В отрицательных полях при $|H| > 120$ Э абсолютные значения намагниченности в состоянии 2 выше, чем в состоянии 1. Такие особенности не характерны для простых видов магнитного упорядочения и могут служить признаком существования обменной анизотропии [2,4]. Комплекс свойств, аналогичных свойствам ПК тантала, наблюдался в ряде сложных неколлинеарных магнетиков с однонаправленной анизотропией [2,5,6], однако в случае ПК тантала природа возникновения сложного магнитного упорядочения остается неясной.

Магнитные свойства пленки 2 качественно не отличаются от свойств пленки 1. Однако в пересчете на единицу объема намагниченность оказывается в несколько раз меньше, чем в пленке 1, в то время как отношение $M_r/M(200)$ возрастает до 0,5 (для случая охлаждения в магнитном поле $H_c = 200$ Э). Уменьшение удельной намагниченности образца может быть вызвано увеличением доли кристаллического ОЦК тантала, которое может происходить за счет фазовых превращений, протекающих при увеличении числа кластеров в ансамбле.

В работе [7] было теоретически исследовано влияние икосаэдрической симметрии на свойства Al и сплавов Al-Mn. Результаты расчетов электронной структуры кластеров Al с икосаэдрической симметрией существенно отличаются от таких расчетов для кластеров с кубической симметрией. Для икосаэдрических кластеров характерны аномально высокая плотность состояний на уровне Ферми и увеличение энергии связи электронов на 0,8 эВ.

Тантал 4f спектр ПК был получен нами в работе [8] на рентгенофотоэлектронном спектрометре ЭС-2402. Основные максимумы тантала $4f_{7/2}$ и $4f_{5/2}$ спектра представляют собой узкие ярко выраженные пики, что свидетельствует о беспримесном гомогенном состоянии атомов тантала в ПК. По сравнению с ОЦК танталом спектр сдвинут в сторону больших энергий связи на 1,4 эВ. Очень вероятно, что наблюдаемый в эксперименте энергетический сдвиг спектра ПК и резкое увеличение магнитного отклика ПК тантала по сравнению с ОЦК танталом обусловлены влиянием икосаэдрической симметрии.

1. В.А.Полухин, В.А.Ватолин, Расплавы 1, 29 (1987).
2. С.В.Вонсовский, Магнетизм, М.: Наука, 1971.
3. H.Kojima, R.S.Tebbleand, and D.E.G.Williams, Proc. Roy. Soc. A260, 237 (1961).
4. W.H.Meiklejohn and C.P.Bean, Phys. Rev. 102, 1413 (1956).
5. J.S.Kouvel and C.D.Graham, Jr., J. Appl. Phys. 30, 312S (1959).
6. K.H.Fischer, Phys. Stat. Sol. B130, 13 (1985).
7. M.E.McHenry, M.E.Eberhart, R.C.O'Handley and K.H.Johnson, Phys., Rev. Lett. 56, 81 (1986).
8. A.M.Korduban, I.P.Nagibin, V.G.Trubachev and A.P.Shpak, Proc. 5-th Intern. conf. on electron spectroscopy, Kiev, 1993.