

ГИГАНТСКОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛЕНОК ВАНАДИЯ С ПОВЕРХНОСТНОЙ МАГНИТНОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ

А.Н.Стещенко, В.Н.Самофалов, В.В.Зорченко

Харьковский государственный политехнический университет

31002 Харьков, Украина

Поступила в редакцию 24 июля 1996 г.

При комнатной температуре обнаружено гигантское (до 68%) магнитосопротивление пленок (110) V на слюде, на поверхности которых выращена периодическая система тонких (≤ 10 нм) полосок Co шириной 5 – 25 нм с зазорами между ними 1 – 2 нм. Эффект наблюдался только в тех образцах, у которых намагниченность выходит из плоскости пленки.

PACS: 72.12.G, 73.60.D, 75.70.

В последние годы не ослабевает интерес к явлению гигантского магнитосопротивления (МС), обнаруженному сначала в магнитных мультислоях, а затем и в гранулированных структурах металлическая немагнитная матрица – ферромагнитные включения (см. обзор [1]). На мультислоях Co/Cu достигнуто рекордное МС при комнатной температуре – 65% [2].

В данной статье сообщается о первом наблюдении гигантского МС структур ионного типа – двуслойных, полученных на базе пленок с модулированной толщиной (ПМТ), представляющих собой эпитаксиальные пленки (110) V (толщиной ≤ 100 нм), выращенные на слюде в безмасляном вакууме $\sim 10^{-5}$ Па методом электронно-лучевого испарения, с приблизительно периодической системой параллельных клиновидных канавок на поверхности шириной ~ 1 – 2 нм и глубиной до ~ 10 нм с расстоянием между ними ~ 5 – 25 нм [3]. Такие модулированные структуры формируются в результате релаксации внутренних напряжений в пересыщенных вакансиями пленках путем скореллированного выхода вакансий на поверхность пленки. В пленках ОЦК металлов (V, Nb и Ta) наблюдаются три фракции зерен, соответствующие трем возможным ориентациям плоскостей (110) на поверхности слюды (они отличаются разворотами направления [001] друг относительно друга на 60° либо на 120°). В каждой фракции зерен (средние размеры зерен 100–200 нм для пленок толщиной 50–100 нм) имеется своя система канавок, проходящих через всю площадь зерна вдоль направления [001] и оканчивающихся на границах зерен. Несмотря на отсутствие строгой периодичности, на картинах электронной дифракции на просвет каждая система канавок дает свои сверхрешеточные рефлексы вблизи первичного пучка. Если на такую пленку сконденсировать достаточно тонкий сплошной слой ферромагнетика, то возникает система магнитных полосок, выросших на плато между канавками, то есть своеобразная трехпозиционная "поликристаллическая" поверхность сверхрешетка. Именно на таких структурах с эпитаксиальными слоями Co и наблюдалось высокое МС.

Образцы для измерения МС имели прямоугольную форму и размеры $10 \cdot 1$ мм². Магнитное поле до 16 кЭ было направлено в плоскости пленки параллельно либо перпендикулярно току. Регистрация изменения сопротивления образцов, находившихся при комнатной температуре, производилась

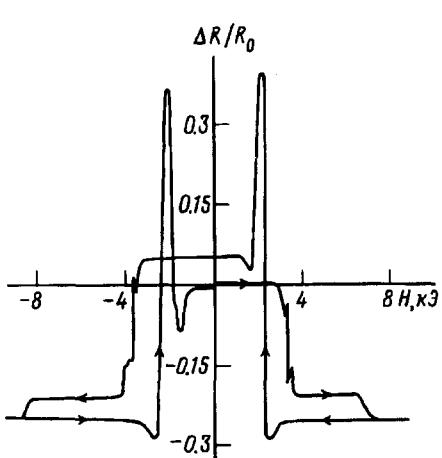


Рис.1. Полевая зависимость относительного магнитосопротивления ПМТ Co(5 нм)/M(40 нм), покрытой слоем V толщиной 10 нм, в магнитном поле, параллельном току

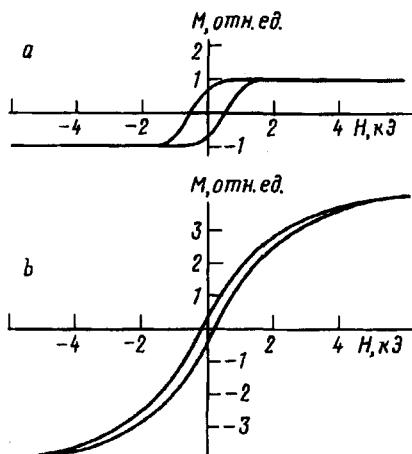


Рис.2. Петли намагниченности полученных одновременно пленки Co на слюде толщиной 10 нм (а) и ПМТ Co(10 нм)/V(72 нм) с $\Delta R/R_0$ около 12% (б), записанные на вибромагнитометре в продольном образцу магнитном поле

при скорости развертки поля $\leq 0.1 \text{ кЭ/с}$. Пример полевой зависимости относительного МС $\Delta R/R_0$ (ΔR – изменение сопротивления в магнитном поле, R_0 – сопротивление образца до включения поля) для одного из образцов Co/V, покрытого слоем V 10 нм, показан на . В общем случае по мере роста магнитного поля сопротивление образцов сначала остается практически неизменным, затем наблюдается ступенчатообразный спад с выходом отрицательного МС на насыщение ($\leq 25\%$ для всех исследованных образцов) в поля $\geq 8 \text{ кЭ}$. При уменьшении магнитного поля из состояния насыщения магнитосопротивления в относительно малых полях ($\sim 2 \text{ кЭ}$) происходит резкий всплеск $\Delta R/R_0$ на величину $\leq 50\%$ с последующим столь же быстрым спадом сопротивления к уровню R_0 . Наибольшая зарегистрированная амплитуда всплеска МС составляла 68% (рис.1), что заметно превосходит величину МС сверхрешеток Co/Cu [2] с учетом того, что в работе [2] изменение сопротивления относилось к его наименьшему уровню в состоянии насыщения. Отметим, что качественно вид полевой зависимости и масштаб изменения сопротивления не зависит от взаимной ориентации тока и магнитного поля (в плоскости образца).

Для образцов Co/V с относительно толстыми слоями Co ($d_{Co} \sim 10 \text{ нм}$) происходит трансформация вида полевой зависимости МС: за участком плато следует относительно плавное, а не ступенчатообразное, уменьшение сопротивления с выходом на насыщение при тех же полях, что и для образцов с $d_{Co} \sim 5 \text{ нм}$ (рис.1), а при уменьшении поля наблюдается постепенный возврат к исходному уровню R_0 сильным гистерезисом без всплеска сопротивления, как это показано на рис.1.

Петли гистерезиса для образцов Co/V с $d_{Co} \sim 10 \text{ нм}$ с высоким уровнем МС, записанные на вибромагнитометре в параллельном поверхности магнитном поле, имеют вид, характерный для "закритических" пленок с полосовой

доменной структурой (см. рис.2б). На рис.2а для сравнения приведена петля гистерезиса для пленки Со той же толщины (10 нм), выращенной на слюде одновременно (в одном акте конденсации Со) с магнитной сверхрешеткой Со(10 нм)/V(72 нм), петля намагничения для которой показана на рис.2б. Из рис.2 видно, что петля гистерезиса пленки Со близка к прямоугольной с коэрцитивной силой $H_c \approx 570$ Э, что заметно выше, чем у ПМТ Со/V ($H_c \approx 190$ Э), а выход намагниченности на насыщение происходит в полях $\sim 1,3$ кЭ, тогда как у ПМТ Со/V эти поля существенно больше ($\sim 6,3$ кЭ), что указывает на наличие перпендикулярной компоненты намагниченности в ПМТ Со/V в отсутствие поля. Для ПМТ Со/v с $d_{Co} \sim 5$ нм получаются аналогичные результаты, однако из-за малости сигнала вибромагнитометра, соизмеримого с уровнем шумов, не удалось установить точную форму петель гистерезиса (в частности, надежно доказать наличие ступенек на петлях, аналогичных ступенькам на МС).

Подчеркнем, что гигантское МС наблюдалось только в пленках, у которых намагниченность выходила из плоскости образца. Для ПМТ Со/V сразу после изготовления магнитные моменты атомов Со лежали в плоскости пленки, и их МС не превышало $\sim 0.1\%$. Через некоторое время появлялась перпендикулярная компонента намагниченности (только при наличии системы канавок) и вместе с ней гигантское МС. При длительном вылеживании образцов МС практически исчезает, образцы теряют свои ферромагнитные свойства из-за диффузионного перемешивания слоев (для массивных сплавов Со–V при содержании ванадия ≈ 25 ат.% температуры Кюри сплава снижается до комнатной). Некоторая задержка во времени появления гигантского МС может быть связана как с диффузионными процессами, так и с особенностями структуры пленок Со. По данным электронной микроскопии пленки Со представляют собой ГЦК фазу Со, сопрягающуюся с плоскостями (110) V согласно ориентационным соотношениям Курдюмова–Закса (111), [110] ГЦК || (110), [111] ОЦК, с прослойками ГПУ фазы, образующейся путем движения дислокаций по любой из четырех плоскостей скольжения типа (111) ГЦК фазы (фазовый переход ГУК \rightarrow ГПУ в Со происходит именно таким образом [4]). Поэтому с течением времени объемная доля ГПУ фазы в пленке Со возрастает, что, очевидно, способствует выходу намагниченности из плоскости пленки. Кроме того, замыкание полосок Со на границах зерен должно препятствовать появлению перпендикулярной компоненты намагниченности. Диффузионные процессы, протекающие особенно интенсивно на границах зерен, могут привести к разрыву прямой обменно связи полосок Со в соседних зернах, уменьшению их магнитного момента и энергии анизотропии формы $\sim M_s^2$ (V_s – намагниченность насыщения), препятствующей выходу намагниченности из плоскости пленки. По-видимому, тонкий баланс между различными противоборствующими факторами приводит к тому, что лишь очень небольшое число изготовленных образцов проявляет перпендикулярную намагниченность и высокое МС.

При интерпретации полученных результатов следует учесть, что длина свободного пробега электронов в пленках V при комнатной температуре мала (3–6 нм) [5], поэтому факт наличия гигантского МС, по сути, означает образование ультрадисперской доменной структуры с размерами доменов нанометрового масштаба. Как и в случае мультислоев, для ПМТ Со/V гигантское МС, по-видимому, связано с резким ослаблением зависящего от спина рассе-

яния электронов на межфазных границах и примесных ионах Со в объеме пленки V при укладывании намагниченности Со в плоскость образца внешним магнитным полем, сопровождающимся исчезновением мелкомасштабной доменной структуры. Можно предположить, что в состоянии с перпендикулярной компонентой намагниченности (при $H = 0$) смежные полоски Со имеют противоположные направления магнитных моментов, чему способствует отсутствие обменного взаимодействия между ними из-за наличия канавок (то есть мы имеем дело как бы с пленкой с полосовой доменной структурой, в которой границы доменов попали в зазоры между полосками ферромагнетика). Большую (или основную) роль в МС должна играть поляризация спинов электронов проводимости V, наведенная контактом с пленкой Со, которая в мультислоях Со/V проявляется в толщинах осцилляции границы доменов попали в зазоры между полосами ферромагнетика). Большую (или основную) роль в МС должна играть поляризация спинов электронов проводимости V, наведенная контактом с пленкой Со, которая в мультислоях Со/V проявляется в толщинах осцилляциях обменной связи соседних слоев Со [6], а в нашем случае – привести к поляризации магнитных моментов ионов Со в V, изменяющей знак при переходе от одной полоски к другой при антипараллельной ориентации намагниченности смежных полосок Со и имеющей постоянный знак при намагничивании пленки вдоль слоев. Три ступеньки на полевых зависимостях $\Delta R/R_0$ (рис.1) можно приписать последовательным процессам опрокидывания намагниченности в трех фракциях зерен пленок V в плоскости образца. Всплеск МС при сбросе внешнего поля предположительно можно объяснить тем, что выход намагниченности из плоскости пленки с некоторой остаточной намагниченностью при $H = 0$ происходит через стадию размагниченного состояния с предельно быстрым пространственным изменением направления локальных магнитных моментов.

В заключение подчеркнем, что полученные результаты показывают принципиальную возможность получения гигантского МС не только в мультислоях и объемных гранулированных магнитных структурах, но и в двуслойных пленках ферромагнетик – немагнитный металлы.

Работа поддержана Международным научным фондом (грант U38000).

-
1. R.E.Camley and R.L.Stamps, J. Phys.: Condens. Matter **5**, 3727 (1993).
 2. S.S.P.Parkin, Z.G.Li and David J. Smith, Appl. Phys. Lett. **58**, 2710 (1991).
 3. Л.С.Палатник, Е.Н.Зубарев, А.А.Козьма и др., Кристаллография **32**, 445 (1987).
 4. Ультрих Делингер, Теоретическое металловедение М.: Металлургиздат, 1960 (U. Dehlinger, *Theoretische Metallkunde*, Springer-Verlag, Berlin–Gottingen–Heidelberg, 1955).
 5. А.Н.Стеценко, А.Е.Колинько, А.И.Федоренко, Н.Я.Фогель, Металлофизика **3**, 59 (1981).
 6. S.S.P.Parkin, Phys. Rev. Lett. **67**, 3598 (1991).