

НАНОКЛАСТЕРНЫЕ ПЛЕНКИ

Федосюк В.М.

Институт физики твердого тела и полупроводников НАНБ
220018 Минск ул.П.Бровки 17 E-mail : fedosyuk@ifftp.bas-net.by

Нанокластерные пленки представляют собой нановключения ферромагнитного материала (*Co*, *Fe*, *Ni*) в диа- (н-р *Cu*) или парамагнитной (н-р *Re*) матрице. Первоначально интерес к нанокластерным (гранулированным) сплавам появился вследствие возможности использования таких материалов в качестве магниторезистивных элементов вместо используемых сегодня датчиков на основе пермаллоя. По сравнению с последними, покрытия на основе гранулированных сплавов весьма перспективны из-за того, что, во-первых, при определенных условиях они обладают эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС); во-вторых, по сравнению с ферромагнитными сплавами имеют более низкие шумы из-за отсутствия доменных стенок. Недавно пленки неоднородных сплавов были также предложены для использования в качестве материала носителя информации в устройствах со сверхвысокоплотной записью.

Система *CuCo* привлекает особое внимание. Отчасти это связано с тем, что при комнатной температуре *Cu* и *Co* практически не растворимы друг в друге, и поэтому очень удобны для получения метастабильных сплавов.

Пленки составов *CuCo* осаждались на медные и алюминиевые подложки, а также ситалл с химически нанесенным аморфным немагнитным подслоем фосфида никеля из электролита следующего состава, в г/л: $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$ - 30, $CoCl_2 \cdot 6 H_2O$ - 3,3, H_3BO_3 - 6,6, $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ - 23,3, $CoSO_4 \cdot 7 H_2O$ - 10 - 30. Осаждение велось при кислотности электролита $pH=6,0$, его температуре $20^\circ C$ и катодной плотности тока $D_K=5 \text{ mA/cm}^2$.

Типичные кривые перемагничивания пленок *CuCo* приведены на рис.1. Они имеют гистерезис при низких температурах наряду с обратимой частью в области высоких полей (рис.1(а)), и полностью безгистерезисны при комнатной температуре (рис.1(б)). Это свидетельствует о том, что исследуемые пленки представляют собой смесь ферро- и суперпарамагнитных частиц.

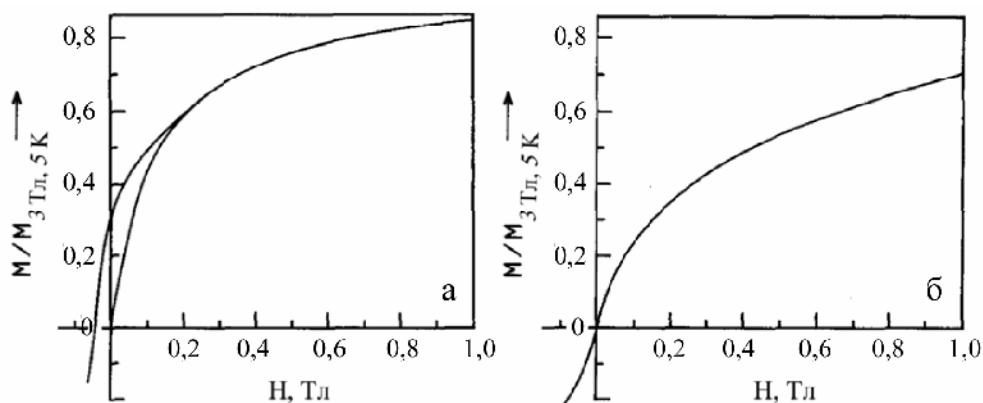


Рис. Характерные кривые перемагничивания образца $Co_{11}Cu_{89}$:
1. (а) - 5 К, (б) - 300 К

Температурная зависимость намагниченности приведена на рис. 2. Интересно отметить, что для пленок состава $Cu_{80}Co_{20}$ эта зависимость почти линейна. Такое поведение

намагниченности от температуры типично для двухмерного магнетизма. На этом основании можно предположить, что гранулы кобальта в матрице меди могут быть существенно вытянутой формы.

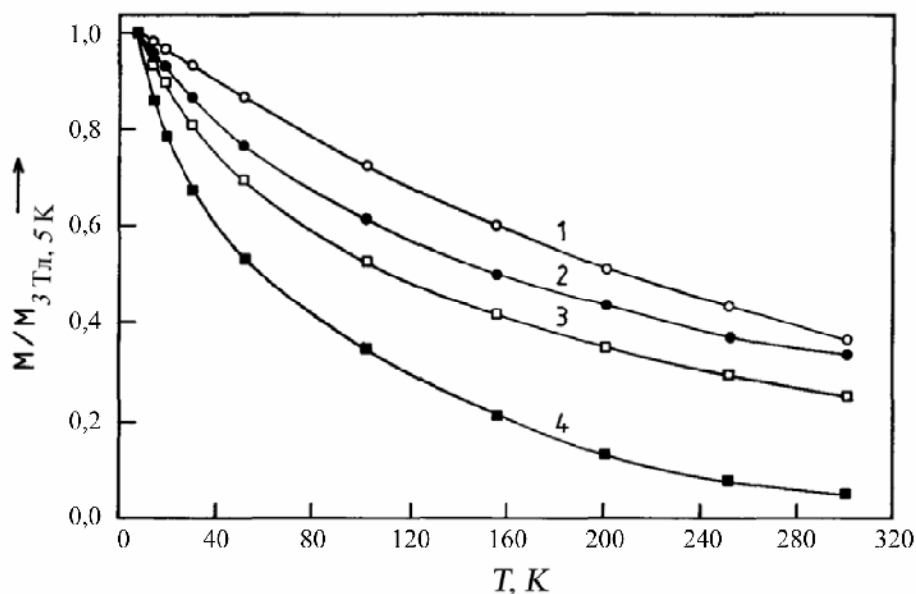


Рис.2 Температурная зависимость намагниченности исследованных образцов в поле 3 Тл. Значения нормированы к намагниченности при 5 К. (1) – Co₂₀Cu₈₀, (2) – Co₁₁Cu₈₉, (3) – Co₈Cu₉₂, (4) – Co₆Cu₉₄

Электроннограмма на просвет неотожженного образца Co₆Cu₉₄ приведена на рис.3(а). Рефлексы по крайней мере от двух ГЦК-фаз могут быть идентифицированы с параметрами решетки 0,362 + 0,002 нм и 0,424 + 0,002 нм.

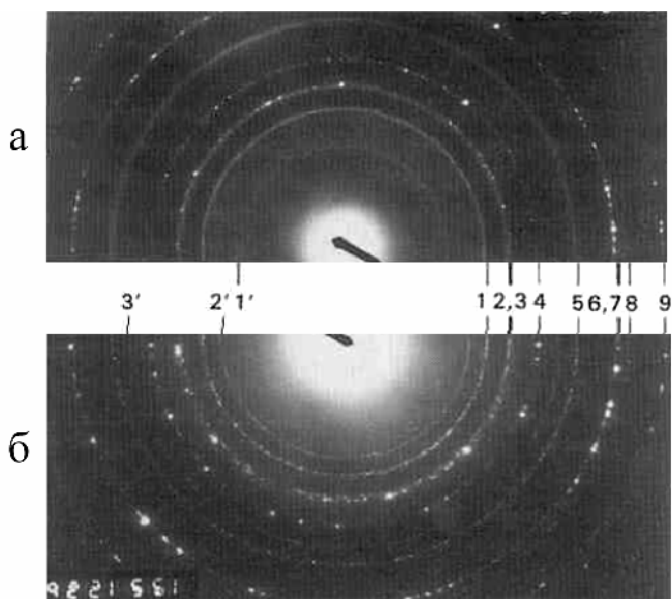


Рис.3. Электроннограмма (а) "свежеприготовленных" и (б) отожженных пленок Co₆Cu₉₄.

Первый, в пределах погрешности измерения, соответствует решетке меди (0,3615 нм). При идентификации второго рефлекса имеется некоторая трудность, состоящая в том, что оценка параметра решетки приводит к значению между Cu₂O (0,4220 нм) и CoO (0,4260 нм), которые отличаются только на 1 %. По всей видимости, вторая серия рефлексов обусловлена одним из этих оксидов, однако вследствие точности экспериментального округления их невозможно разрешить. Тем не менее,

поскольку содержание меди в образцах значительно выше, то скорее всего указанный рефлекс относится к решетке Cu_2O . Поскольку указанный оксид не обнаруживается рентгеновским методом, когда вклад в формирование рефлексов вносит вклад весь объем образца, то одним из вариантов объяснения наличия рефлексов оксидов меди (и кобальта) является методика ионно-лучевого утонения при подготовке образцов для электронно-микроскопических исследований "на просвет". Обозначенные цифрами рефлекссы являются общими для обеих пленок, а именно: оксидные рефлекссы: 1 - (1 1 1); 2 - (200); 5 - (220); 7 - (311); 8 - (222). Рефлекссы меди: 3 - (111); 4 - (200); 6 - (220); 9 - (3 1 1). Обозначенные цифрами со штрихом рефлекссы специфичны только для одной или другой пленки. Температура отжига составляла 600 °С.

Отметим еще некоторые другие особенности рис.3(а). Кольцевые рефлекссы оксидов меди и кобальта имеют более равномерное распределение интенсивности, по сравнению с рефлекссами меди, которые точечны. Это предполагает, что размер гранул зерен (кристаллитов) оксидов намного меньше, по сравнению с зернами медной матрицы.

Отсутствие очевидных рефлекссов ГЦК и ГПУ-решеток кобальта не является неожиданным. И другие авторы не наблюдали четких рефлекссов кобальта. В некоторых случаях можно различить наличие кластеров кобальта посредством малоуглового рентгеновского рассеяния при скользких углах падения. Электронная микроскопия и обычная дифракционная техника оказываются обычно неэффективными для этого.

Для исследований методом электронной микроскопии "на просвет" трудно получить однородный по толщине образец. Как правило, они имеют заметную шероховатость. Это и видно на рис.4(а,б). Некоторые частицы оксидов различаются по контрасту: они крупнее (> 100 нм) и лучше видны, по сравнению с неотожженной пленкой. Другие, более мелкие детали (до ~1 нм) также различаются на темнопольном изображении. Они и ассоциируются с большой вероятностью с нанокластерами кобальта в медной матрице.

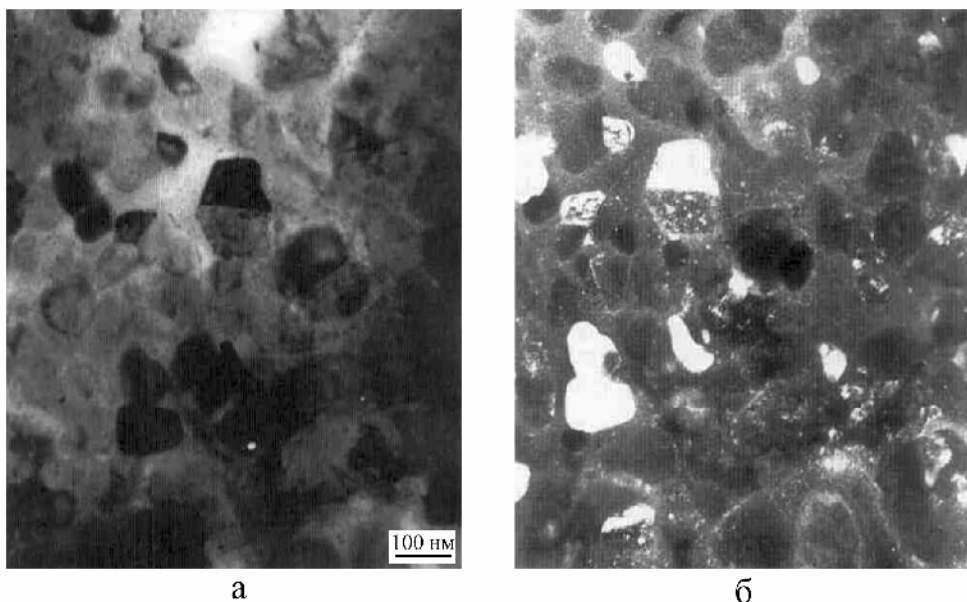


Рис.4. Светлопольная (а) и темнопольная (б) микрофотографии образца $Co_{20}Cu_{80}$ отожженного при 600 °С

Как результат нанокластерного строения пленок они обладают эффектом ГМС. На рис.5 приведена зависимость магнитосопротивления неотожженных пленок Co20Cu80. Видно, что не наблюдается насыщения электросопротивления образцов в доступных магнитных полях. Тот факт, что магнитосопротивление отрицательно и изотропно (т.е. $\Delta R_{||} \approx \Delta R_{\perp} \approx \Delta R_{||,\perp}$) в отличие от обычного анизотропного магнитосопротивления (АМС) для объемных ферромагнитных переходных металлов, является свидетельством, что наблюдается именно эффект гигантского магнитосопротивления.

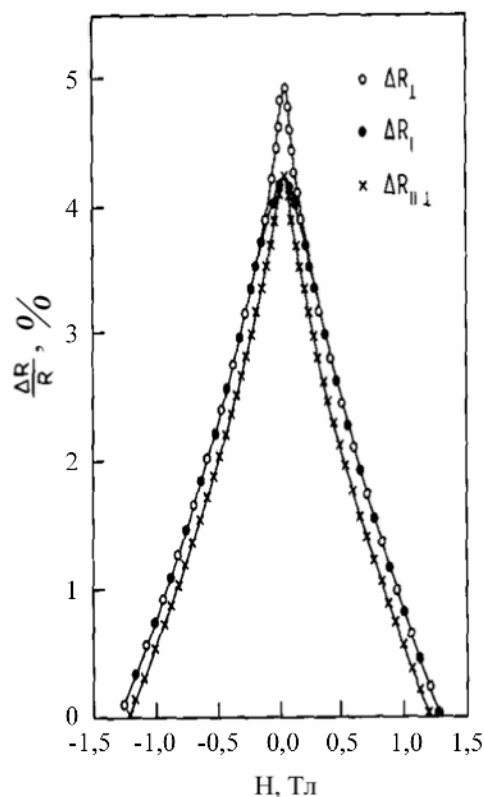


Рис.5. Магнитосопротивление свежесоздаваемых пленок Co20Cu80 при температуре 5 К в зависимости от магнитного поля при различных взаимных ориентациях электрического тока, магнитного поля и плоскости пленки

Размер магнитных нановкраплений кобальта в матрице меди зависит от состава электролита и режимов осаждения. Типичные размеры их составляют ~7 нм для Co6Cu94, ~8 нм для Co8Cu92, ~11 нм для Co11Cu89, ~12 нм для Co20Cu80 и ~15 нм для Co35Cu65. Т.е. они того же порядка величины, что и средняя длина свободного пробега электронов в переходных металлах. Это является причиной того, что зависимость от

взаимной ориентации спина электрона и магнитного момента кластера кобальта компонента тензора электрической проводимости доминирует, что и является основой механизма эффекта ГМС.

При отжиге образцов происходит увеличение ГМС. Тем не менее, даже после отжига при 600°C, насыщения зависимости электросопротивления от магнитного поля не происходит. Намагниченность же после соответствующего отжига, как ранее уже указывалось, увеличивается и выходит на насыщение в полях, меньших 1 Тл. Одновременно возрастает и коэрцитивная сила. Это можно объяснить, анализируя увеличение размеров нановкраплений кобальта в медной матрице в процессе отжига.

Хорошо известно, что величина ГМС определяется размерами магнитных кластеров, их распределением, а также резкостью композиционного профиля границы, например, наночастица/матрица, причем все эти факторы сильно зависят от отжига.

В настоящей работе мы проводим анализ текущего состояния дел по разработке и исследованию нанокластерных электролитически осажденных сплавов и перспектив на будущее в плане их практического использования.