

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ И ДРУГИЕ ДВУМЕРНЫЕ ОБЪЕКТЫ

УДК 536:669

А.Ф. Андреева, А.М. Касумов

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины
г. Киев, ул. Кржижановского, 3, Украина, 03680

СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК Ni/Y_2O_3 , ВЫРАЩЕННЫХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ключевые слова: многослойные пленки, Ni , Y_2O_3 , свойства, магнитное поле

Определены свойства многослойных наноразмерных пленок Ni/Y_2O_3 , выращенных во внешнем постоянном магнитном поле с индуктивностью 30 мТл и вектором напряженности, перпендикулярным к плоскости пленки. Ориентация магнитных моментов кластеров Ni по полю приводит к их взаимному отталкиванию и возникновению напряжений сжатия в кластерах, а также растяжению матрицы Y_2O_3 . В растянутой матрице кластеры Ni растут, образуя цепочки. Появление в пленке цепочек приводит к смене механизма проводимости с прыжкового на металлический, снижению удельного сопротивления и исчезновению эффекта гигантского магнитосопротивления, наблюдаемого в пленках Ni/Y_2O_3 , выращенных без магнитного поля. Свойства, нечувствительные к форме кластеров и напряжениям, — диэлектрическая проницаемость и оптические характеристики — остаются близкими для пленок, выращенных как в магнитном поле, так и без его применения.

Введение

Многослойные наноразмерные пленки, состоящие из чередующихся слоев ферромагнетика и немагнитного материала, являются перспективными для спинтроники благодаря проявлению эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) и могут быть использованы в системах энергонезависимой памяти, магнитных считывающих головках, магнитных датчиках и сенсорах и др. [1].

В предыдущих наших исследованиях [2, 3] было показано, что значительная величина ГМС может быть получена при использовании в качестве немагнитной прослойки оксида редкоземельного металла. В пленках Ni/Y_2O_3 , состоящих из слоев ультрадисперсных частиц (кластеров) Ni , разделенных слоями Y_2O_3 , была получе-

на величина ГМС 12% в магнитном поле 1,2 Т, а в отдельных образцах 30-слойных пленок — 48% в поле 1,6 Т, что в настоящее время уточняется. Данные пленки отличались также взаимной химической нейтральностью и несмачиваемостью компонентов, высокой технологичностью процесса нанесения слоев.

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению структурных, электрических, магнитоэлектрических и оптических свойств пленок Ni/Y₂O₃ и их изменению под влиянием постоянного магнитного поля, приложенного к пленке в процессе роста.

Экспериментальная часть

Пленки Ni/Y₂O₃ наносились последовательным электронно-лучевым испарением на подложку металлов Ni и Y. Ni испарялся в условиях высокого вакуума 1 · 10⁻⁴ Па при скорости конденсации (0,5–5) нм/мин. Y наносился при напуске в камеру кислорода с парциальным давлением 2 · 10⁻³ Па и скорости роста пленок Y₂O₃ (20–25) нм/мин. Толщина слоев Ni была равна 5 нм, слоев Y₂O₃ — 10 нм. Общая численность слоев пленки Ni/Y₂O₃ варьировалась в пределах от 2 до 40. При изучении структурных свойств пленок Ni/Y₂O₃ в качестве подложек использовались свежие сколы монокристаллической соли NaCl, для изучения электрических, магнитных и оптических свойств этих

пленок использовались подложки из стеклообразного кварца.

Подложки устанавливались в двух позициях: на поверхности постоянного магнита и вне его. Постоянный магнит обеспечивал рост пленок во внешнем магнитном поле с индукцией 30 мТ и направлением вектора напряженности, перпендикулярным плоскости подложки. Проводилось сравнение свойств пленок, выращенных при идентичных условиях без применения магнитного поля [2, 3] и при его воздействии.

Электроннографические и электронно-микроскопические исследования показывают, что приложение магнитного поля к растущей пленке Ni/Y₂O₃ вызывает ряд изменений в ее структуре и морфологии.

При комнатной температуре конденсации слой Y₂O₃ имеют аморфную структуру как при росте в магнитном поле, так и без него. В то же время кластеры Ni, расположенные между слоями Y₂O₃, в магнитном поле имеют кристаллическую структуру, в то время как без поля для их кристаллизации необходим подъем температуры конденсации до 350–370 К. Таким образом, магнитное поле стимулирует кристаллизацию растущих кластеров Ni.

В обоих случаях кластеры Ni имеют кубическую решетку с параметрами, близкими к гранецентрированной кубической решетке объемных образцов Ni со структурой типа Fm3m — O⁵_h. Однако в пленках Ni/Y₂O₃, выра-

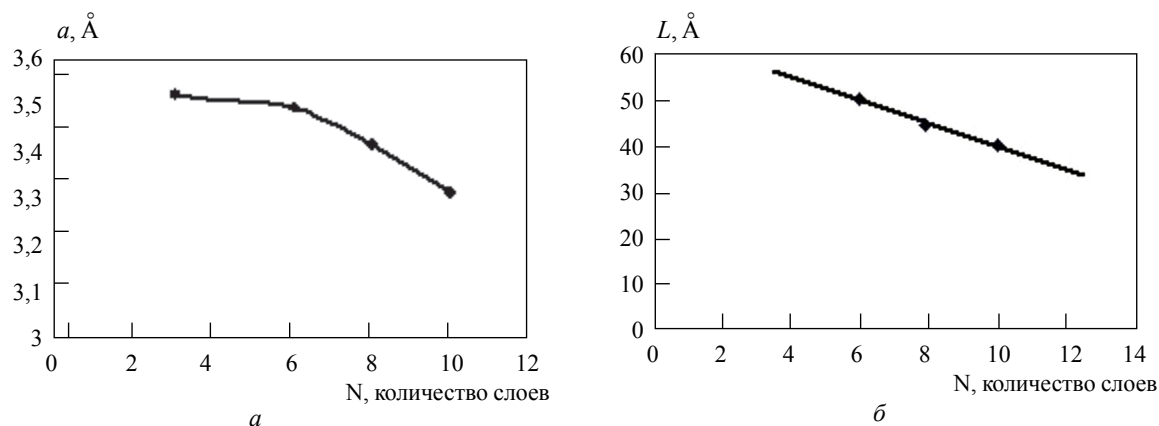


Рис. 1. Зависимость периода кристаллической решетки (а) и размера блоков когерентного рассеяния (б) кластеров никеля от числа слоев N в пленках Ni/Y₂O₃, выращенных в магнитном поле



Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок пленки $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, подвешенной на сеточке, $\times 48000$. Угол падения электронного луча к плоскости пленки равен 45°

щенных в магнитном поле, наблюдается сжатие элементарной ячейки решетки Ni , возрастающее с ростом числа слоев пленки (рис. 1а), а также уменьшение блоков когерентного рассеяния и межплоскостных расстояний кристаллической решетки (рис. 1б). Такое уменьшение свидетельствует, согласно работе [4], о действии в кластерах Ni механических напряжений сжатия, возрастающих с увеличением числа слоев в пленке $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$.

Одновременно со сжатием кластеров Ni в пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, наблюдается растяжение слоев Y_2O_3 . Данное растяжение приводит в свободно висющей на сеточке пленке к образованию гофрированной поверхности. На рис. 2 видны такие растянутые участки, оттененные при наклонном падении электронного луча к плоскости пленки $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$.

Электронно-микроскопические исследования показывают, что кластеры Ni в пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, имеют эллипсообразную форму и связаны в цепочки в направлении главной оси эллипса. В поперечном направлении распределение кластеров по размерам близко к распределению, наблюдаемому в пленках, выращенных без поля. В направлении главной оси эллипса распределение сильно смещено в область больших длин с

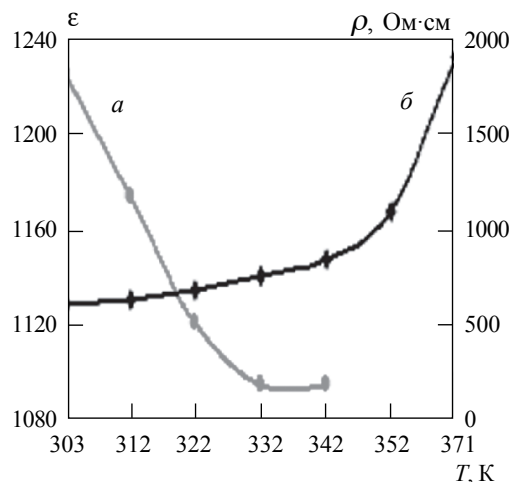


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и активного удельного сопротивления ρ (б) 30-слойной пленки $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенной в магнитном поле, от температуры T . Частота электрического поля $f = 100$ кГц

резким максимумом при размерах, близких к толщине слоя Ni (5 нм).

Наличие преимущественного направления роста кластеров Ni , тем не менее, не приводит к образованию текстуры, т.е. слои Ni остаются поликристаллическими.

Электрические свойства пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, также имеют ряд особенностей.

Зависимость диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления от частоты электрического поля близки для пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле и вне его [3].

Близка и температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ этих пленок (рис. 3, кривая а).

В то же время температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ пленок сильно отличается (рис. 3, кривая б). В пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных без поля, зависимость $\rho(T)$ описывается законом $\log \rho \sim T^{-1/4}$, что соответствует прыжковому механизму проводимости [3]. В пленках же, выращенных в магнитном поле, зависимость $\rho(T)$ на начальной стадии нагрева близка к линейной $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, и соответствует металлической проводимости. Температурный коэффициент этих пленок $\alpha = 0,008$ град $^{-1}$

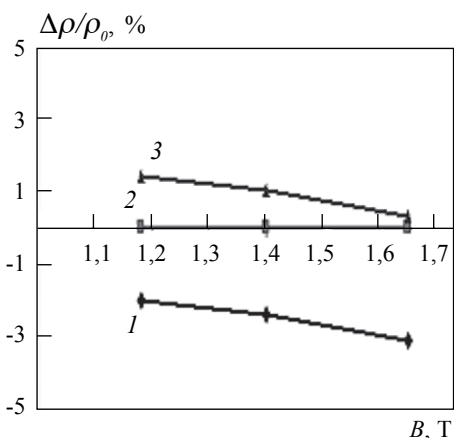


Рис. 4. Зависимость магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ от индукции B внешнего магнитного поля в пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле. 1, 2, 3 — соответственно 10, 20 и 30 слоев в пленке

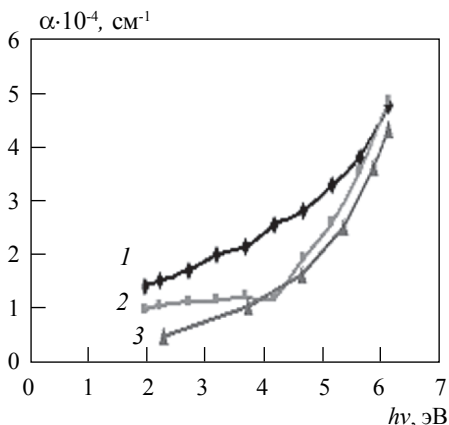


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения α пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, от энергии $h\nu$ квантов падающего света. 1, 2, 3 — соответственно 10, 20 и 30 слоев в пленке

мало отличается от значения 0,005, известного для объемных образцов Ni.

Зависимость удельного сопротивления от числа слоев N в пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, имеет вид $\rho \sim N^{0,58}$, т. е. кривая $\rho(N)$ становится менее крутой, чем у пленок, выращенных без поля, — $\rho \sim N^{0,62}$ [3].

Магнитосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в отсутствие магнитного поля и под его воздействием, сильно отличается. Если в первом случае $\Delta\rho/\rho_0$ всегда имеет положительный знак, экспоненциальный вид зависимо-

сти от индукции B внешнего магнитного поля $\Delta\rho/\rho_0 \sim e^{3B}$, значительную величину (до 50%) [3], то во втором — знак $\Delta\rho/\rho_0$ изменяется с ростом числа слоев пленки, зависимость от B близка к линейной, а величина не превышает нескольких процентов (рис. 4).

Такое поведение магнитосопротивления показывает, что в пленках $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, эффект ГМС исчезает.

Оптические свойства пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных без магнитного поля [2] и с его применением (рис. 5), близки друг другу.

В магнитном поле увеличивается в 1,07 раза коэффициент поглощения света в видимой области спектра, дисперсионная же зависимость показателя преломления остается практически без изменения. В спектре коэффициента поглощения наблюдаются интерференционные экстремумы при общей толщине пленки $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, кратной длине волны света (рис. 5, кривая 2), т. е. данные пленки взаимодействуют со светом видимого диапазона как единое композиционное вещество.

Обсуждение результатов

Наблюдаемые особенности пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, выращенных в магнитном поле, могут найти объяснение в предположении, что магнитное поле вызывает ориентацию магнитных моментов кластеров Ni вдоль направления своего вектора напряженности, т. е. перпендикулярно поверхности пленки. При этом кластеры Ni начинают взаимодействовать как магниты с одноименными полюсами. Силы отталкивания между кластерами Ni приводят, с одной стороны, к их сжатию, а с другой стороны — к растяжению матрицы Y_2O_3 . Сжатие кристаллитов вызывает уменьшение периода решетки Ni (рис. 1) и блоков когерентного рассеяния, возникновение напряжений сжатия, облегчающих кристаллизацию кластеров Ni при температуре на 100 К более низкой, чем в случае выращивания пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$ без поля. Растяжение матрицы Y_2O_3 приводит к возникновению гофрированной поверхности пленок $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$, свободно подвешенных на сеточке (рис. 2). С ростом числа слоев в пленке $\text{Ni}/\text{Y}_2\text{O}_3$ количество взаи-

модействующих кластеров Ni увеличивается, а силы их отталкивания возрастают, что усиливает проявления упомянутых эффектов.

Магнитное поле стимулирует также возникновение цепочек из кластеров Ni. Действительно, кластеры Ni имеют эллипсоидальную форму как при росте в магнитном поле, так и без него вследствие применения протяженного источника испарения Ni. Отталкивание кластеров Ni и растяжение матрицы Y_2O_3 в наибольшей степени должно происходить в местах наименьшего расстояния между кластерами, т. е. в направлении главной оси эллипсов. Соответственно, на растянутые участки Y_2O_3 идет более интенсивное осаждение атомов Ni, что и приводит к слиянию кластеров в цепочки в данном направлении.

Возникновение цепочек из кластеров Ni в пленках Ni/Y₂O₃, выращенных в магнитном поле, ведет к смене механизма проводимости от прыжкового между кластерами к металлическому по цепочкам кластеров. А переход к металлической проводимости, в свою очередь, приводит к исчезновению эффекта ГМС (рис. 4), наблюдаемого при прыжковой проводимости в пленках, выращенных без магнитного поля [3].

Переход к металлической проводимости приводит также к уменьшению удельного сопротивления и его зависимости от числа слоев пленки: $\rho \sim N^{0,58}$ вместо $\rho \sim N^{0,62}$, свойственного прыжковой проводимости.

Свойства пленок Ni/Y₂O₃, слабо чувствительные к форме кластеров и напряжениям в слоях, мало изменяются при наложении магнитного поля в процессе роста слоев. К таким свойствам можно отнести, например, температурную (рис. 3, кривая *a*) и частотную зависимость диэлектрической проницаемости, спектральную зависимость коэффициента оптического поглощения (рис. 5) и показателя преломления в видимой области спектра.

Выводы

1. В многослойных наноразмерных пленках Ni/Y₂O₃, выращенных в магнитном поле, обнаружены механические напряжения, приводящие к сжатию кластеров Ni и растяжению матрицы

Y₂O₃. Действие напряжений сопровождается уменьшением периода кристаллической решетки и областей когерентного рассеяния кластеров Ni, а также возникновением гофрированной поверхности слоев Y₂O₃. Влияние напряжений усиливается с ростом числа слоев в пленках.

Возникновение напряжений объяснено ориентацией магнитных моментов кластеров Ni вдоль вектора напряженности приложенного магнитного поля в процессе роста пленки Ni/Y₂O₃, и возникновением взаимного отталкивания кластеров.

2. Установлено, что в пленках Ni/Y₂O₃, выращенных в магнитном поле, образуются более длинные цепочки из сросшихся кластеров Ni, чем в пленках, выращенных без поля. Возникновение длинных цепочек приводит к смене механизма проводимости от прыжкового к преимущественно металлическому, а также вызывает уменьшение удельного сопротивления пленок и исчезновение эффекта ГМС.

Визначено властивості багат шарових нанорозмірних плівок Ni/Y₂O₃, вирощених у зовнішньому постійному магнітному полі з індуктивністю 30 мТ та вектором напруженості, перпендикулярним до площини плівки. Орієнтація магнітних моментів кластерів Ni за полем призводить до взаємного відштовхування їх та виникнення напружень стискання в кластерах, а також розтягнення матриці Y₂O₃. У розтягнутій матриці кластери Ni зростають, утворюючи ланцюжки. Поява у плівці ланцюжків призводить до зміни механізму провідності зі стрибкового на металічний, зниження питомого опору та зникнення ефекту гігантського магнітоопору, що спостерігається у плівках Ni/Y₂O₃, вирощених без магнітного поля. Властивості, нечутливі до форми кластерів та напружень, — діелектрична проникність та оптичні характеристики — залишаються близькими для плівок, вирощених як у магнітному полі, так і без його застосування.

Ключові слова: багат шарові плівки, Ni, Y₂O₃, властивості, магнітне поле

The properties of Ni/Y₂O₃ multilayer nanofilms grown in the external constant perpendicular magnetic field about 30 mT has been determined. The orientation of Ni clusters magnetic moments along the field leads to their mutual repulsion and compressive stress appearance in the clusters and to the tension of Y₂O₃ matrix. Ni clusters grow in the tensioned matrix and form the chains. An appearance of chains in the film tends to the conductivity mechanism

changing from hopping to metallic, the specific resistance decreasing and giant magnetoresistance disappearance. The giant magnetoresistance effect is observed for Ni/Y₂O₃ films grown without magnetic field. The properties which are independent of clusters' shape and stresses, such as permittivity and optical characteristics, remain close for the films grown in magnetic field and without one.

Key words: *multilayer films, Ni, Y₂O₃, properties, magnetic field*

1. *Effect of interface intermixing on giant magnetoresistance in NiFe/Cu and Co/NiFe/Co/Cu multilayers / Nagamine L.C.C., Biondo A., Pereira L.G. et al. // J. Appl. Phys. — 2003. — № 9, 94. — P. 5881–5890.*
2. *Андреева А.Ф., Касумов А.М., Двойненко О.К. Структура и оптические свойства многослойных нанопленок Ni–Y₂O₃ // Сб. тезисов I Международной конференции “Современные проблемы физики металлов”. — К., 2008. — С. 175.*
3. *Андреева А.Ф., Касумов А.М., Двойненко О.К. Электрические и магнитоэлектрические свойства многослойных нанопленок Ni–Y₂O₃ // Сб. тезисов II Международной конференции “Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур”. — Харьков, 2008. — С. 358–361.*
4. *Качанов Н.Н., Миркин Л.И. Рентгеноструктурный анализ поликристаллов: Практическое руководство. — М.: Машгиз, 1960. — 216 с.*