

УДК 539. 238

Р. Г. АННАЕВ
Л. В. КИРЕНСКИЙ
Р. В. СУХАНОВА
Г. Ш. АХМЕДОВА
П. Н. ЗАЯКИН
З. М. ПЕРЖАНОВСКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА И МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЯ НА ТОНКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ НИКЕЛЯ

Тонкие пленки находят все большее применение в физике и технике. Изучению электрических и магнитных свойств некоторых тонких ферромагнитных пленок посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [1—7].

Влияние старения (окисления) монокристаллических тонких пленок никеля на эффект Холла и на изменение электросопротивления пленок под воздействием магнитного поля или намагничивания (магнетосопротивление) никем не изучалось.

Цель данной работы — исследование магнетосопротивления и эффекта Холла на тонких монокристаллических пленках никеля толщиной 480—1400 Å при 291°К в магнитных полях до 5,6 кэ и через год повторить при прочих равных условиях опыта те же измерения для выяснения влияния процесса окисления (старения) на эти пленки. Опыт показывает, что ЭДС Холла V_y в ферромагнетиках можно представить соотношением

$$V_y = (R_0 H + R_1 I) \frac{i_x}{d}, \quad (1)$$

где R_0 — обыкновенная постоянная Холла; R_1 — необыкновенная или ферромагнитная постоянная Холла; I — намагниченность образца; H — магнитное поле; i_x — сила тока; d — толщина образца.

Первый член (1) характеризуется процессом проводимости материала, а второй — зависит от намагниченности его.

Многие авторы исследовали тонкие пленки ферромагнетиков и показали, что постоянные Холла R_0 и R_1 и величины их зависят от технологии изготовления пленок, от температуры подложки, от величины давления при процессе напыления или испарения, от направления и скорости напыления или испарения и т. д. Кроме этого, с уменьшением толщины пленок абсолютные величины постоянных Холла R_0 и R_1 увеличиваются и знаки их сохраняются, как в случае массивных образцов.

Соотношение (1) можно представить в иной форме:

$$H = H_e - NI, \quad (2)$$

где \vec{H}_e — внешнее магнитное поле; N — размагничивающий фактор образца.

Действительно, обозначая в

(1) $e_x = \frac{V_y \cdot d}{i_x}$ и воспользовавшись (2), находим

$$e_x = R_0 H_e + (R_1 - R_0 N) I. \quad (3)$$

Кривую зависимости e_x как функции H_e схематически можно изобразить (рис. 1) аналогично [8], только мы здесь даем $e_x = f(H_e)$, а не $e_x = f(B)$. В частности в (3), когда $(R_1 - R_0 N) I \ll R_0 H_e$, имеем $e_{x_2} = R_0 H_e$ или

$$\frac{e_{x_2}}{H_e} = \operatorname{tg} \varphi = R_0 \quad (H_e \ll H_s).$$

Тем самым можно из опыта определить в данном образце обыкновенную постоянную Холла. Пересечение продолжения прямолинейного участка AB при $H_e > H_s$ с осью ординат дает отрезок $e_{x_1} = (R_1 - R_0 N) I_s$ и I заменена нами на I_s , поскольку наклон прямолинейного участка AB в области больших $H_e > H_s$ (рис. 1). Намагниченность образца можно считать равной намагниченности насыщения I_s .

Таким образом, если известно I_s и размагничивающий фактор образца N , то можем находить величину ферромагнитной константы Холла R_1 .

Если исследуемый образец имеет форму прямоугольного параллелепипеда длиной l и сечением s , то удельную намагниченность σ [9] или интенсивность намагничивания I можно вычислить по формулам

$$\sigma = \frac{C\psi l}{(4\pi - N) 2\pi n} \cdot \alpha, \quad I = \frac{C\psi \alpha}{2\Delta n s (4\pi - N)},$$

где $C\psi$ — баллистическая постоянная установки; α — отброс гальванометра; Δn — разность числа витков в дифференциальной катушке; m — масса образца.

Методы измерения эффекта Холла и магнетосопротивления

Наиболее распространенным методом измерения эффекта Холла и магнетосопротивления является потенциометрический метод [9].

Нами при измерении эффекта Холла использован неуравновешенный потенциометр, теория конструкции которого разработана Р. Г. Аннаевым [10]. В схему включался зеркальный гальванометр типа М 17/6 с постоянной к напряжению $C_u = 0,74 \cdot 10^{-7} \frac{b}{\text{мм}}$. м.

Магнетосопротивление измерялось неуравновешенным двойным мостом Томсона [11] с точностью до порядка 10^{-6} ом. Собранный установка и правильность ее работы проверялась по измерению эффекта Холла на отожженной никелевой пластинке размерами $20 \times 10 \times 0,1$ мм³, результаты которых хорошо совпали с наблюдениями, приведенными

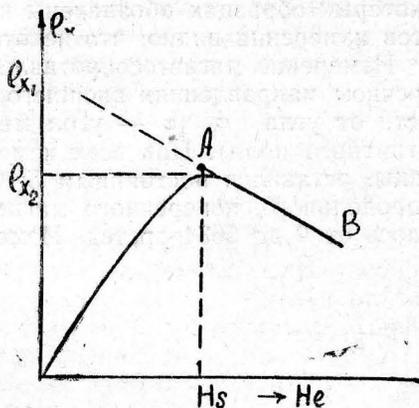


Рис. 1. Схематическая зависимость I_x как функции внешнего магнитного поля H_e .

в [12]. С целью выяснения роли окисления, на рис. 2, 3 приведены результаты измерений точками, а вторые наблюдения через год на некоторых образцах обозначены крестиками. Из сопоставления результатов измерения видно, что некоторое влияние окисления имеет место.

Измерение магнетосопротивления проводилось в продольном и поперечном направлениях внешнего магнитного поля, а также в зависимости от угла φ (φ — угол между [100] и направлением внешнего магнитного поля). При всех измерениях ток, пропускаемый через образцы, оставался постоянным $5 \cdot 10^{-4}$ а. При измерении эффекта Холла и продольного, поперечного магнетосопротивления внешнее поле изменялось от 0 до 5634 эрстед. Измерение эффекта в наших опытах производилось с точностью в среднем до 1—5%.

При измерении магнетосопротивления в зависимости от угла φ величина поля насыщения была равна 5634 эрстедам. Направление измерения r , электрический ток i , внешнее магнитное поле H_e по отношению оси [100] имели следующие ориентации: эффект Холла измерялся, когда $[100] \parallel i \perp r \perp H$; магнетосопротивление для поперечного эффекта, когда $[100] \parallel i \parallel r \perp H$; для продольного $[100] \parallel i \parallel r \parallel H_e$.

Магнетосопротивление в зависимости от угла φ производилось измерением, когда $[100] \parallel i \parallel r \perp H_e = \varphi$.

Экспериментальная часть выполнялась на тонких монокристаллических пленках, полученных в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.) при температуре подложки 180°C . Подложкой служил монокристалл NaCl в плоскости [001].

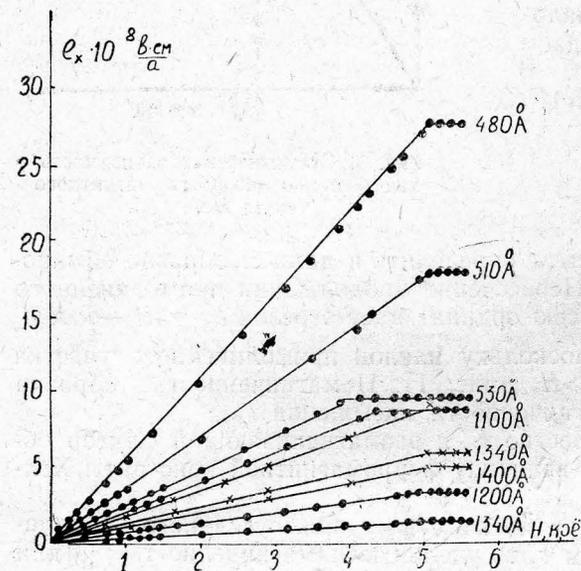


Рис. 2. Зависимость эффекта Холла e_x от внешнего магнитного поля H_e для различных толщин монокристаллических пленок чистого никеля в [100] (xxx — повторные измерения через год).

На электронограмме проверялась плоскость [001] тонких пленок никеля.

Для обеспечения контактов проводящих проводов с пленкой, вследствие большой чувствительности никеля к деформации и температуре, были напылены отводящие контакты из красной меди.

Подводящие провода крепились специальным припоем, состоящем из чистых элементов: $57\% \text{Ga} + 23\% \text{In} + 20\% \text{Sn}$ вес. частей, которые имеют низкую температуру плавления и обеспечивают надежность контакта.

Состав был синтезирован в эвакуированных кварцевых запаянных ампулах при температуре тугоплавкого компонента с последующим постепенным охлаждением.

Полученный сплав наносился на месте контактов электрода с соединительными проводами, затем помещался в водяную баню и выдерживался там до расплавления.

Надежность контакта определяется по овалу припоя на границе с электродом. Если не наблюдается растекания припоя на медном электроде, то края получаются овальными. Как только медный электрод смачивался с припоем, пленка вынималась из водяной бани и на место контакта наносилась капля БФ-2. Затем пленка с подложкой зажималась в специальную подставку.

Результаты измерения

Полученные результаты измерений эффекта Холла и продольного поперечного магнетосопротивления, а также зависимость магнетосопротивления от угла φ для монокристаллических тонких пленок различной толщины показаны на рис. 2, 3, 4. На рис. 2 представлены зависимость эффекта Холла e_x от внешнего магнитного поля H_e для тонких монокристаллических пленок с толщинами: 1400, 1340, 1200, 1100, 530,

510, 480 Å, а для некоторых из них повторные измерения через год при атмосферном давлении обозначены крестиками.

С уменьшением толщины пленки (начиная с 530 Å) эффект Холла резко возрастает, а затем уменьшается в зависимости от увеличения толщины пленок до 1340 Å.

Величина ЭДС Холла у пленок (480—1100 Å) больше по сравнению с массивными образцами монокристаллического никеля.

Продольное магнетосопротивление обнаруживает насыщение во всех исследованных пленках и уменьшается почти до нуля с уменьшением толщины пленок (рис. 3). Но насыщение продольного эффекта наступает раньше, чем поперечного. Продольный эффект вначале резко возрастает у всех пленок, а затем у пленок 530 и 510 Å наблюдается незначительное понижение области насыщения.

Поперечное магнетосопротивление при малых полях порядка 500—1500 эрстед имеет очень маленькую величину для пленок 530, 510, 480 Å, но с дальнейшим увеличением поля резко возрастает. Величина поперечного магнетосопротивления значительно больше продольного.

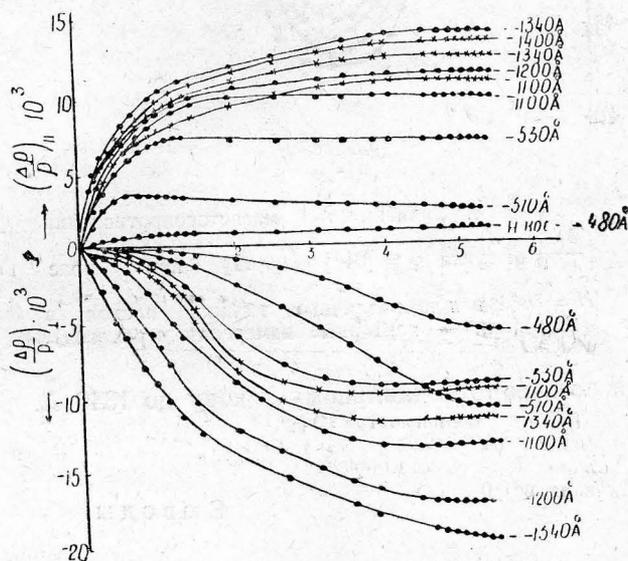


Рис. 3. Зависимость продольного $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\parallel}$ и поперечного $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\perp}$ магнетосопротивления от внешнего магнитного поля H_e и толщины монокристаллических пленок никеля (xxx — повторные измерения через год).

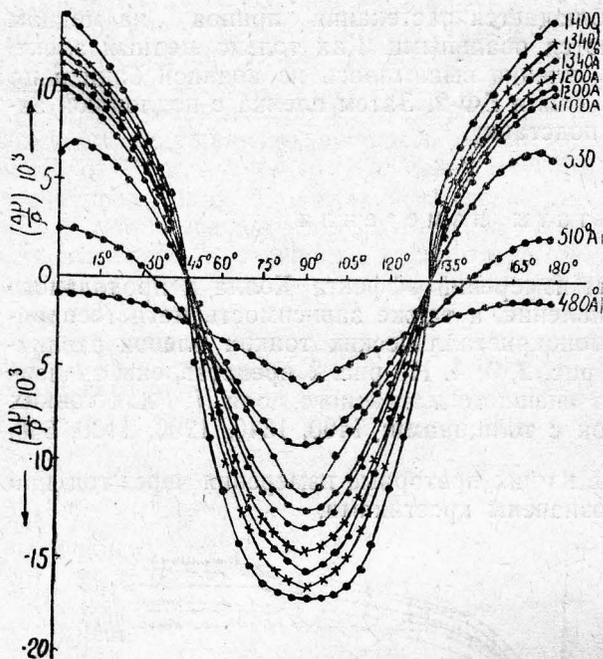


Рис. 4. Зависимость магнетосопротивления $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)$ от угла $\varphi = [010] \parallel i \parallel r \overset{\wedge}{\parallel} H_s$ при поле $H = 5634$ э для различных толщин пленок в (100) (xxx — повторные измерения через год).

ся по эквипотенциальному закону до 1340 \AA .

Выводы

1. Холловская разность потенциалов увеличивается с уменьшением толщины пленки.

2. Магнетосопротивление как в продольном, так и в поперечном магнитном поле для всех исследуемых толщин пленок имеет различный ход кривых: в первом случае с положительным, во втором — с отрицательным значением величины эффекта.

3. Величина магнетосопротивления при поле магнитного насыщения, равном 5634 э, в зависимости от угла φ между осью $[100]$ и магнитного поля H смещается в сторону отрицательного эффекта при уменьшении толщины пленки и достигает нуля при φ , равной 145 и 135° для пленок толщиной 510 \AA .

4. На пленках толщиной 480 \AA величина магнетосопротивления во всей области изменения угла имеет отрицательный знак величины эффекта.

При измерении магнетосопротивления в зависимости от угла φ наблюдается смещение в сторону отрицательного эффекта с уменьшением толщины пленки (рис. 4).

У пленок 1400 , 1340 , 1200 , 1100 , 530 \AA эффект достигает нуля при φ , равной 45 и 135° , а у пленки толщиной 510 \AA — при φ , равной 33 и приблизительно 150° , а пленка 480 \AA имеет только отрицательное значение эффекта.

Постоянная Холла с увеличением толщины пленки возрастает и, начиная с 530 \AA , уменьшает-

5. Влияние окисления монокристаллических пленок никеля указывает на изменение величины эффекта Холла и магнетосопротивления в наших измерениях (рис. 2—4).

Туркменский государственный университет
им. А. М. Горького
Институт Физики Сибирского отделения
АН СССР

Поступило
12 ноября 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тонкие магнитные пленки. — Сб. статей под ред. А. С. Глушкого и Л. В. Ки-ренского. Гостехиздат УССР, Киев, 1963.
2. Тонкие ферромагнитные пленки — Изд. МИР, под ред. Р. В. Телеснина.
3. Поливанов К. М., Фрумкина А. Л. — Известия АН СССР, сер. физич. 25, № 5, 1961.
4. Ву Динь Кы — Известия АН СССР, 29, № 4, 576—579, 1965.
5. Colombani, A. Aсаureaux G. — Hall effect of thin films of nilel Structure and Properties Thin Films, New Iork-London, Iom Wiley and Sons, Inc, 393—400 Discuss, 400—401, 1959.
6. Velio A. — Magnetoresistance and Hall Voltage measurements on Single crystal Ni1 and Ni-Fr thin films, (9. Appl. Phys.), 35, № 3, part 2, 774—775, 1964.
7. Coleman R. V., Larson D. C. — «Magnetoresistance of sindl crystal nickel films». Physical Letter 19, № 7, 554—556, 1965.
8. Ву Динь Кы и Е. Ф. Курицына — ФММ, 19, вып. 4, 501—505, 1965; ДАН СССР, 160, № 1, 77—86, 1965.
9. Чечерников В. И. — Магнитные измерения. Изд. Московского ун-верситета, 1963.
10. Аннаев Р. Г. — Тр. первой межвузовской конференции по современной технике диэлектриков и полупроводников, стр. 388—396, Л., 1957.
11. Аннаев Р. Г. — Магнито-электрические явления в ферромагнитных металлах. Изд. АН Туркм. ССР, Ашхабад, 1952.
12. Кондорский Е. И., Галкина О. С. Черникова и Чжен Кай-Да — ЖЭТФ, 41, № 6, 1961.