

Авторы благодарят В. Б. Тимофеева за интерес к работе и полезные замечания.

Список литературы

- [1] Буравов Л. И., Винников Л. Я., Емельченко Г. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 1. С. 50—52.
- [2] Farell D. E., Chandrasekhar B. S., De Guire M. R. et al. // Phys. Rev. B. 1988. V. 36. N 7. P. 4025—4028.
- [3] Takita K., Akinaga H., Katoh H., Masuda K. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 9. P. L1552—L1554.
- [4] Suzuki M., Oda M., Enomoto Y., Murakami T. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 12. P. L2052—L2054.
- [5] Wang X., Namba T., Ikezawa M. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 12. P. L2023—L2025.
- [6] Schmid H., Rivera J.-P., Clin M. et al. // Physica C. 1988. V. 153—155. Pt 2. P. 1748—1751.
- [7] Semba K., Suzuki H., Katsui A. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 10. P. L1654—L1647.
- [8] Власко-Власов В. К., Индепбом М. В., Оспьян Ю. А. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 6. С. 312—315.
- [9] Schlesinger Z., Collins R. T., Kaiser D. L. et al. // Physica C. 1988. V. 153—155. Pt 2. P. 1734—1739.
- [10] Tanaka J., Kamija K., Tsurumi S. // Physica C. 1988. V. 153—155. Pt 1. P. 653—654.
- [11] Massidda S., Yu J., Freeman A. J. // Phys. Lett. A. 1987. V. 122. N 3—4. P. 198—202.
- [12] Веркин Б. И., Дмитриев В. М., Дикин Д. А. и др. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 2. С. 218—221.

Институт физики твердого тела
АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
22 августа 1988 г.

УДК 537.311.31

Физика твердого тела, том 31, в. 4, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 4, 1989

ПОПЕРЕЧНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ

Н. И. Киселев, Ю. И. Маньков, В. Г. Пынько

Известно [1], что растягивающие напряжения оказывают влияние на магнитосопротивление монокристаллических ферромагнетиков. Чаще всего при этом исследуются нитевидные образцы (вискеры). Напряжения в этом случае прикладываются вдоль направления роста кристалла, т. е. образцы подвергаются одностороннему растяжению.

Недавно [2] сообщалось о технологии выращивания толстых монокристаллических пленок никеля методом химического транспорта на подложке из окиси магния. Метод позволяет получать пленки толщиной в пределах $2 \text{ мкм} \leq d \leq 15 \text{ мкм}$, причем они характеризуются сравнительно высоким отношением остаточных сопротивлений $\eta = \rho_{300 \text{ К}} / \rho_{4.2 \text{ К}}$, достигающим 10^3 .

В соответствии с технологией пленки выращивались при температуре подложки 1000°C . Коэффициент теплового расширения никеля α_{Ni} превышает соответствующий коэффициент α_{MgO} для окиси магния. Например, при комнатной температуре $\alpha_{\text{Ni}} = 12.5 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_{\text{MgO}} = 11.2 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Следовательно, при охлаждении пленка, будучи связана с подложкой, подвергается плоскостному растягивающему напряжению, которое приводит к тетрагональной деформации кристаллической решетки. Этот вывод был подтвержден сравнением параметров кристаллической решетки, измеренных методом рентгеновской дифракции при комнатной температуре $T_{\text{к}}$ и $T = 77 \text{ К}$.

В данной работе исследовалась анизотропия поперечного магнитосопротивления монокристаллических пленок никеля. Измерения проводились на образцах, плоскость поверхности которых совпадала с плоскостью (001). Использовались образцы толщиной $d=5.0 \pm 0.5$ мкм с отношением $\eta=10^3$.

На рис. 1 показаны угловые зависимости поперечного магнитосопротивления ($\Delta\rho/\rho$) (φ) такой пленки при $T=4.2$ К и направлении тока вдоль [110]. Здесь $\Delta\rho=\rho_H-\rho$, где ρ_H , ρ — удельные сопротивления образца во внешнем поле H и в отсутствие поля ($H=0$). Угол φ определяет направление H относительно нормали к плоскости пленки (при $\varphi=90^\circ H \parallel n$). Кривыми 1, 2 показаны зависимости ($\Delta\rho/\rho$) (φ) для пленки, связанной с подложкой и, следовательно, находящейся под действием растягивающих напряжений, при $H=14$ (1) и 21 кЭ (2). Отметим, что неоднократное охлаждение и нагревание пленки на подложке от T_g до $T=4.2$ К не изменяло зависимости ($\Delta\rho/\rho$) (φ). Кривая 3 представляет график ($\Delta\rho/\rho$) (φ) при $H=21$ кЭ на той же пленке, но отделенной от подложки MgO. После

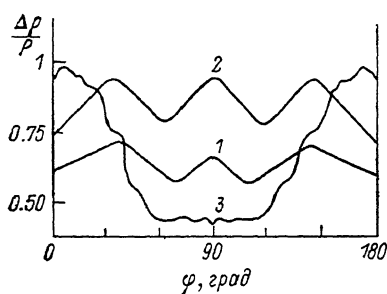


Рис. 1.

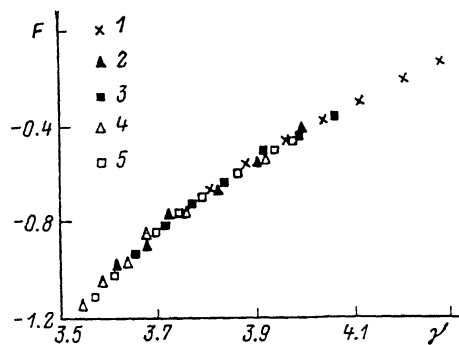


Рис. 2. Зависимости $F=\lg(\Delta\rho/\rho)$ от $\gamma=\lg(B\eta d^*/d)$ монокристаллических пленок никеля.

1—3 — пленки на подложке; 4, 5 — пленки, отделенные от подложки. d (мкм), η : 1—9,800; 2—5,380; 3—9,460; 4—5,250; 5—9,380.

снятия пленки с подложки отношение η уменьшилось до ~ 870 . Как видно из сравнения кривых 2 и 3, снятие напряжений приводит к заметному изменению угловой зависимости поперечного магнитосопротивления пленок никеля. Следует отметить, что при $T=T_g$ и $T=77$ К кривые ($\Delta\rho/\rho$) (φ), полученные нами, совпадают с известными [3] результатами для анизотропии магнитосопротивления массивных образцов. Причем, как оказалось, отделение пленки от подложки не меняет зависимость ($\Delta\rho/\rho$) (φ) при указанных значениях температуры.

Угловая зависимость магнитосопротивления пленки, снятой с подложки, при $T=4.2$ К (рис. 1, 3) в общих чертах соответствует графику ($\Delta\rho/\rho$) (φ) поперечного магнитосопротивления монокристаллического стержня никеля с $\eta=2700$ [4]. Анизотропия магнитосопротивления в этой работе связывалась с формой поверхности Ферми никеля. В отличие от [4] полученная нами кривая не имеет резких минимумов при направлениях H , совпадающих с кристаллографическими осями типа [111], а минимумы при $H \parallel [100]$ не достигают величины, отмеченной авторами [4]. Такие отличия, по нашему мнению, связаны с рассеянием электронов на границах образца. В магнитном поле, использованном при измерении магнитосопротивления пленок никеля, циклотронный радиус электронов проводимости $r \geq d$. Отметим, что наши данные ближе к кривой ($\Delta\rho/\rho$) (φ), приведенной в работе Фоссета и Рида [4], чем результаты работы [5], где измерения проводились на массивном образце с $\eta=1000$. Как известно [6], статическое сопротивление пленок в магнитном поле определяется средней длиной свободного пробега электронов $l_{\text{эфф}}$, в которую дает

вклад рассеяние носителей на поверхности пленки. В то же время в образце имеются электроны, не сталкивающиеся с поверхностью и обладающие длиной свободного пробега $l > l_{эфф}$. Такие электроны при условии $l \gg r$ могут дать вклад в магнитосопротивление пленки, определяемый формой поверхности Ферми, что и наблюдается на эксперименте.

Таким образом, исследование анизотропии магнитосопротивления пленки никеля на подложке MgO позволяет сделать вывод об изменении формы поверхности Ферми электронов проводимости, вызванном тетрагональной деформацией кристаллической решетки осажденного материала. Насколько нам известно, столь существенные изменения $\Delta\rho/\rho$ под действием внешних напряжений в никеле ранее не наблюдались.

Примечательно, что значение $\Delta\rho/\rho$ в пленке на подложке при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ ($\varphi = 90^\circ$) больше, чем при H в плоскости образца, несмотря на меньшее значение индукции B в первом случае. Действительно, в пленочном ферромагнитном образце, намагниченном до насыщения, при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ размагничивающее поле $H_{разм} = -4\pi M$, в результате $B \approx H$. При H в плоскости пленки $B = H + 4\pi M$. Очевидно, что уменьшением индукции нельзя объяснить минимум в зависимости $(\Delta\rho/\rho)(\varphi)$ на пленке, снятой с подложки при $\varphi = 90^\circ$.

При направлении тока вдоль $[100]$ (в этом случае при H в плоскости пленки и при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ магнитное поле приложено вдоль эквивалентных кристаллографических направлений) исследование зависимости $\Delta\rho/\rho$ от H показало, что в полях, больших поля насыщения, одинаковые значения $\Delta\rho/\rho$ при упомянутых взаимно перпендикулярных направлениях поля получаем при H , отличающихся на 6 кЭ. Это примерно равно $4\pi M$ в никеле. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ от величины магнитного поля в области $H < 21$ кЭ при любом φ представляет монотонно возрастающую функцию H . Измерения зависимости $M(H)$ при $T = 4.2$ К показали, что магнитное насыщение образца вдоль нормали достигается в поле $H \geq 5$ кЭ. Выход M в направлении \mathbf{n} облегчается наведенной перпендикулярной анизотропией, обусловленной действием на пленку растягивающих напряжений.

Как известно, в ряде случаев, например при построении колеровских кривых [7], требуется знать сопротивление ферромагнетика при $B = 0$. В силу отмеченного выше факта, что при $M \parallel \mathbf{n}$ магнитная индукция пленки $B \approx H$, величина ее сопротивления при $B = 0$ получается простой экстраполяцией зависимости $\rho(H)$, полученной в области магнитного насыщения образца при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$, к значению при $H = 0$. Используя такую процедуру, мы получили зависимость $(\delta\rho/\rho_0)(H)$ при H в плоскости пленки и измерительном токе, направленном вдоль $[100]$. Здесь $\delta\rho = \rho_B - \rho_0$, где ρ_B — значение сопротивления образца при поле индукции в нем, равном B ; ρ_0 — сопротивление при $B = 0$. Измерения проводились на трех образцах на подложке MgO, отличающихся значением η и толщиной. Два образца с $d = 9$ мкм имели соответственно $\eta = 800$ (образец № 1) и $\eta = 460$ (образец № 2). Образец № 3 с $d = 5$ мкм обладал $\eta = 380$. Измерения $(\delta\rho/\rho)(H)$ на образцах № 2, 3 были повторены после отделения их от подложки.

На рис. 2 показана универсальная зависимость $\delta\rho/\rho = f(B\eta d^*/d)$, которой подчиняется магнитосопротивление исследованных образцов; здесь $d^* = 9$ мкм. Причем на эту кривую ложатся точки, полученные при измерении пленок как на подложке, так и снятых с нее. Максимальное отклонение отдельных точек от среднего хода универсальной зависимости не превышает 10%. Возможность представить магнитосопротивление универсальной кривой, зависящей от толщины образца, указывает на наличие размерного эффекта, существование которого предполагалось при обсуждении результатов исследования анизотропии магнитосопротивления.

Таким образом, в работе продемонстрировано влияние на поперечное магнитосопротивление монокристаллической пленки никеля растягивающих напряжений, действующих на нее со стороны подложки из окиси магния. Модификация анизотропии магнитосопротивления пленки на подложке по сравнению со свободным образцом, по-видимому, связана с изме-

нением формы поверхности Ферми носителей. При этом объем, занимаемый носителями в импульсном пространстве, не изменяется, на что указывает существование общей универсальной зависимости для магнитосопротивления пленок на подложке и пленок, отделенных от нее.

Список литературы

- [1] Гайдуков Ю. П. // УФН. 1984. Т. 142. № 4. С. 571—597.
- [2] Киселев Н. И., Кан С. В., Пынько В. Г., Бабкин Е. В. // Изв. вузов, физика. 1986. № 4. С. 12—15.
- [3] Dedie G. // Z. Angew. Phys. 1971. V. 32. Heft 2. P. 96—100.
- [4] Fawcett E., Reed W. A. // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. N 7. P. 336—338.
- [5] Marcus S. M., Langenberg D. N. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 4. P. 1367—1369.
- [6] Азбель М. Я. // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. № 4. С. 1262—1270.
- [7] Волкенштейн Н. В., Дякина В. П. // ФММ. 1971. Т. 31. № 4. С. 773—780.

Институт физики
им. Л. В. Киреевского СО АН СССР
Красноярск

Поступило в Редакцию
22 августа 1988 г.

УДК 538.955

Физика твердого тела, том 31, в. 4, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 4, 1989

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ FeGe_2

Р. И. Зайнуллина, М. А. Миляев, В. Н. Сыромятников

Соединение FeGe_2 (пространственная группа D_{4h}^{18}) относится к классу веществ, структуру которых можно рассматривать состоящей из подрешеток двух типов, а именно подрешеток, образованных атомами с фиксированными координатами (жесткие подрешетки), и подрешеток, образованных атомами с координатами, содержащими непрерывный параметр x (мягкие подрешетки). В случае FeGe_2 «жесткую подрешетку» образуют атомы Fe, «мягкую» — атомы Ge. Особенностью таких соединений является сохранение структуры кристалла при изменении x . Отмеченные структурные особенности могут служить причиной необычных физических свойств соединений такого типа. Для их выявления необходимы прецизионные измерения с малым температурным шагом.

В настоящей работе сообщаются результаты исследования в постоянных полях магнитной восприимчивости монокристалла FeGe_2 , где, по нейтронографическим данным [1], реализуется такая последовательность магнитных фазовых переходов: парамагнетизм ($T > T_A = 287 \text{ K}$) — несоизмеримая магнитная структура ($T_k < T < T_N$) — коллинеарная антиферромагнитная структура ($T < T_k \approx 265 \text{ K}$).

Для измерений использовались монокристаллические образцы FeGe_2 , выращенные из расплава по методу Чохральского на кафедре общей физики Уральского политехнического института.

Исследования температурной зависимости магнитной восприимчивости проведены на вибрационном магнитометре с шагом 0.5 K со скоростью изменения температуры образца 6 град/ч. Заданная температура поддерживалась с точностью $\pm 0.1 \text{ K}$. Среднее квадратичное отклонение результатов измерений восприимчивости составляло $\sim 0.1 \%$.

На рисунке приведена температурная зависимость восприимчивости $\chi(T)$ монокристалла FeGe_2 , снятая при нагреве, в поле $H = 5000 \pm 1 \text{ Э}$ при ориентации магнитного поля \mathbf{H} параллельно кристаллографической оси [110].