

PACS numbers: 46.25.Hf, 75.80. + q

МАГНІТОДЕФОРМАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ У ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВКАХ

С.І. Проценко

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

Проаналізовано питання про залежність коефіцієнта тензочутливості металевих плівок від величини індукції магнітного поля (магнітодеформаційний ефект). Кількісною характеристикою ефекту є так званий магнітний коефіцієнт тензочутливості, який описує зміну електричного опору плівки при її деформації в зовнішньому магнітному полі.

Ключові слова: МАГНІТОДЕФОРМАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ, МАГНІТНИЙ КОЕФІЦІЄНТ КОЕФІЦІЕНТУ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ, ДЕФОРМАЦІЯ ПЛІВКОВОГО ЗРАЗКА, ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЕНТА ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ.

(Одержано 10.09.2009, у відредагованій формі – 26.09.2009)

Питання про залежність коефіцієнта тензочутливості (КТ) плівкових і масивних матеріалів від величини магнітного поля (магнітодеформаційний ефект) належить, як і питання про його температурну залежність [1, 2], до числа маловивчених, хоча перебуває у полі зору дослідників. Так, автори [3] провели дослідження впливу магнітного поля на КТ аморфних металевих сплавів на основі Fe і В і встановили дуже суттєвий його вплив на величину поздовжнього КТ як у бік збільшення порівняно із величиною КТ за відсутності поля (відносно слабкі поля), так і зменшення величини КТ (відносно сильні поля). Отримані результати автори пояснюють зміною модуля Юнга під дією магнітного поля (т. зв. ΔE – ефект).

Автори роботи [4] провели теоретичні та експериментальні дослідження магнітодеформаційного ефекту на прикладі діамантових плівок із p - типом провідності. Було встановлено, що в інтервалі деформації $\Delta\varepsilon = 2 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ у магнітному полі $B = 3$ Тл величина КТ зменшується до 10 %, що пов'язано із деформаційно-індукованою зміною валентної зони і впливом ефекту магнітоопору.

Аналіз літературних даних стосовно магнітодеформаційного ефекту вказує на те, що його кількісною характеристикою може бути магнітний коефіцієнт тензочутливості (МККТ), методологічна основа введення якого до розгляду може бути такою самою, як для термічного коефіцієнта тензочутливості (ТККТ) [1], тобто

$$\beta_{\gamma l B} = \frac{1}{\gamma_l} \left(\frac{\partial \gamma_l}{\partial B} \right)_{\varepsilon l} \quad \text{та} \quad \beta_{\gamma t B} = \frac{1}{\gamma_t} \left(\frac{\partial \gamma_t}{\partial B} \right)_{\varepsilon t}, \quad (1)$$

де індекси l і t позначають поздовжню і поперечну тензочутливість, а γ_l і γ_t – величини КТ при відповідному напрямі деформації, які виражені через опір плівки.

Скориставшись співвідношеннями для γ_l і γ_t у найбільш загальному вигляді [1]:

$$\gamma_l = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l} + 1 + 2\mu_f, \quad \gamma_t = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_t} - 1, \quad (2)$$

де ρ – питомий опір, μ_f – коефіцієнт Пуассона для плівки, можна записати:

$$\begin{aligned} \beta_{\gamma l B} &= \frac{1}{\gamma_l} \frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l} + 1 + 2\mu_f \right) = \frac{1}{\gamma_l} \left(-\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial B} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B} \right), \\ \beta_{\gamma t B} &= \frac{1}{\gamma_t} \frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_t} - 1 \right) = \frac{1}{\gamma_t} \left(-\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial B} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_t \partial B} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Нами допускається, що у плівкових зразках має місце слабкий магнітострикційний ефект, і тому μ_f практично не залежить від магнітного поля.

Співвідношення (3) перетворюються до вигляду

$$\begin{aligned} \beta_{\gamma l B} &= \frac{1}{\gamma_l} \left(-\beta_B \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B} \right) = \frac{\gamma_l - 1 - 2\mu_f}{\gamma_l} \left(-\beta_B + \frac{1}{\gamma_l - 1 - 2\mu_f} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B} \right), \\ \beta_{\gamma t B} &= \frac{1}{\gamma_t} \left(-\beta_B \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_t \partial B} \right) = \frac{\gamma_t + 1}{\gamma_t} \left(-\beta_B + \frac{1}{\gamma_t + 1} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_t \partial B} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

де враховано співвідношення (2) і через $\beta_B = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial B}$ позначено магнітний коефіцієнт опору.

За умови, що γ_l і $\gamma_t \geq 10$, рівняння (4) спрощується до вигляду

$$\beta_{\gamma l B} \cong -\beta_B + \frac{1}{\gamma_l \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B}, \quad \beta_{\gamma t B} \cong -\beta_B + \frac{1}{\gamma_t \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_t \partial B}, \quad (4)$$

що дозволяє легко визначити дуже важливу тензометричну характеристику $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B}$, яка характеризує поведінку чутливого елемента тензодатчика в умовах одночасної дії деформації і магнітного поля. Спрощенні співвідношення (4) дозволяють якісно проаналізувати польову залежність γ_l і γ_t .

Спочатку розглянемо більш типовий для металічних матеріалів випадок, коли $\beta_B < 0$ [3,5], а $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B}$ залежно від чутливості до деформації

$(\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon})$ або до поля $(\frac{\partial \rho}{\partial B})$ може бути меншим або більшим від нуля. Тоді $\beta_{\gamma l B}$ і $\beta_{\gamma t B}$ будуть більші від нуля (у магнітному полі γ_l і γ_t збільшуються), якщо $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_{l,t} \partial B} > 0$. Така сама ситуація буде мати місце

також у тому випадку, коли $\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} > \left| \frac{\partial \rho}{\partial B} \right|$, тобто збільшення питомого опору при деформації повинно пережити його зменшення у магнітному полі.

Скоріше за все цей випадок має місце у двошарових плівках на основі Cr і Fe, в яких величина γ на 3-6 % більша в магнітному полі 0,1 Тл.

Якщо ж зменшення опору у магнітному полі перекине ефект збільшення за рахунок деформаційних процесів, $\beta_{\gamma B}$ буде більше від нуля

навіть за умови $\left| \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_{i,t} \partial B} \right| < |\beta_B|$. При протилежному знаку нерівності

величини γ і γ_t будуть зменшуватися у зовнішньому магнітному полі, як це має місце у діамантових плівках [4] або аморфних металевих сплавах [3] при відносно сильних полях.

У другому випадку, коли $\beta_B > 0$, величина $\beta_{\gamma B}$ буде більшою від нуля за умов $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B} < 0$ або $|\beta_B| > \left| \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial T} \right|$ незалежно від знака другої похідної.

У той самий час, за умови $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B} > 0$ і $|\beta_B|$ величини γ і γ_t будуть збільшуватися у зовнішньому магнітному полі. Але нам невідомі експериментальні результати, які б відповідали другому випадку.

Як вже зазначалося, за допомогою співвідношень (4) можна оцінити величину $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B}$. Згідно з даними [5] у випадку плівкової системи

$$\text{Cr}(30 \text{ нм})/\text{Fe}(70 \text{ нм}) \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B} \cong -4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м Тл}^{-1}.$$

ВИСНОВКИ

Висновки даної роботи можна сформулювати таким чином.

Запропоновані в рамках феноменологічного підходу теоретичні співвідношення для магнітних коефіцієнтів поздовжньої і поперечної тензочутливості металевих плівок, на основі яких здійснено якісний аналіз можливої залежності КТ від величини індукції зовнішнього магнітного поля. Отримані співвідношення дозволяють розрахувати

важливу тензометричну характеристику $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial B}$, яка описує зміну

питомого опору чутливого елемента тензодатчика при його деформації в магнітному полі. За аналогією до термічного коефіцієнта тензочутливості [1], який визначається температурною і деформаційною залежністю середньої довжини вільного пробігу електронів, коефіцієнта дзеркальності зовнішніх поверхонь та коефіцієнтів проходження межі зерен та меж поділу окремих шарів магнітний коефіцієнт тензочутливості також повинен визначатися впливом деформації і магнітного поля на вказані параметри електроперенесення.

Автор висловлює щире подяку проф. Черноусу А.М. за увагу до роботи і обговорення її результатів.

Робота виконана у рамках спільного науково-технічного проекту між Сумським державним університетом та Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина).

S.I. Protsenko

Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

Question about dependence of the strain sensitivity factor of metal films versus the value of magnetic field induction (the magneto-deformation effect) is examined. The so-called magnetic coefficient of the strain sensitivity factor is a quantitative characteristic of this effect and describes change of the film electric resistance under its deformation in the external magnetic field.

Keywords: MAGNETO-DEFORMATION EFFECT, MAGNETIC COEFFICIENT OF THE STRAIN SENSITIVITY FACTOR, DEFORMATION OF THE FILM SAMPLE, TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE STRAIN SENSITIVITY FACTOR, MAGNETIC FIELD INDUCTION.

**МАГНИТОДЕФОРМАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ В ТОНКИХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ**

С.И.Проценко

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина,
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

Проанализирована зависимость коэффициента тензочувствительности металлических пленок от величины индукции магнитного поля (магнитодеформирующий эффект). Количественной характеристикой эффекта является так называемый магнитный коэффициент коэффициента тензочувствительности, описывающий смену электрического сопротивления пленки при ее деформации во внешнем магнитном поле.

Ключевые слова: МАГНИТОДЕФОРМАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ, МАГНИТНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ, ДЕФОРМАЦИЯ ПЛЕНОЧНОГО ОБРАЗЦА, ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. С.І. Проценко, [ФХТТ 3 №3, 401](#) (2002).
2. С.І. Проценко, І.В. Чешко, Л.В. Однодворець, І.В. Пазуха, *Структура, дифузійні процеси і магніторезистивні та електрофізичні властивості плівкових матеріалів* (Суми: Вид-во СумДУ: 2008).
3. Н.И. Захаренко, М.П. Семенько, *ФММ 104 №2, 150* (2007) (N.I. Zakharenko, M.P. Semen'ko, *Phys. Met. Metallogr. 104 No2, 142* (2007)).
4. W.L. Wang, K.J. Liao, C.G. Hu, S.X. Wang, C.Y. Kong, H.Y. Liao, *Sensor Actuat. A-Phys. 108, 55* (2003).
5. О.В. Сынашенко, Е.П. Ткач, И.П. Бурый, Л.В. Однодворец, С.И. Проценко, Н.И. Шумакова, *ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники 18 №6, 169* (2009).