

PACS: 81.40.P, 75.70.Cn

А.В. Труханов, С.В. Труханов, С.А. Шарко

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОСТОЯНСТВА КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ГИГАНТСКОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА  
В МНОГОСЛОЙНЫХ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»  
ул. П. Бровки, 19, г. Минск, 220072, Беларусь

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2013 года

*Предложена методика расчета постоянства коэффициентов гигантского магниторезистивного (ГМР) эффекта в многослойных металлических структурах. В качестве модельного объекта для расчетов выбрана квазиодномерная многослойная структура (нанопроволока), состоящая из чередующихся слоев диамагнитной (медь) и ферромагнитной (сплав никеля и кобальта) компонент. Методика основана на расчетах и анализе температурно-временных зависимостей коэффициентов взаимодиффузии атомов металлов как фактора, наиболее точно определяющего четкость границ раздела ферромагнетик/диамагнетик, на которых происходит спин-зависимое рассеяние носителей заряда.*

**Ключевые слова:** гигантский магниторезистивный эффект, многослойная квазиодномерная структура, анодированный оксид алюминия, температурно-временные коэффициенты диффузии

*Запропоновано методику розрахунку постійності коефіцієнтів гігантського магніторезистивного (ГМР) ефекту в багатошарових металевих структурах. Як модельний об'єкт для розрахунків обрано квазіодновимірну багатошарову структуру (нанодріт), що складається з шарів діамагнітної (мідь) і ферромагнітної (сплав нікелю й кобальту) компонент, які чергуються. Методика ґрунтується на розрахунках та аналізі температурно-часових залежностей коефіцієнтів взаємодифузії атомів металів як фактора, що найбільш точно визначає чіткість меж розділу ферромагнетик/діамагнетик, на яких відбувається спин-залежне розсіювання носіїв заряду.*

**Ключові слова:** гігантський магніторезистивний ефект, багатошарова квазіодновимірна структура, анодований оксид алюмінію, температурно-часові коефіцієнти дифузії

### Введение

Не ослабевают интерес к исследованию магнитных наноструктур, включая многослойные пленки, нанопроволоки и др., что обусловлено научной значимостью, перспективами практического использования этих материалов

[1–3]. Многослойные квазиодномерные структуры в виде нанопроволок, выращенные в порах алюмооксидной матрицы с диаметрами пор от 20 nm, являются прекрасными модельными объектами для изучения магнитных и магнитотранспортных явлений в нанокристаллических системах. Наноструктуры, сформированные путем зарастивания пор в матрицах анодного оксида алюминия (АОА) ферромагнитными металлами и сплавами, являются перспективными материалами для вертикальной магнитной записи [4,5]. Перпендикулярная магнитная анизотропия в указанных системах формируется за счет ячеисто-пористой структуры АОА и распределения в ней игольчатых частиц ферромагнитного материала, ориентированных своей длинной осью по нормали к поверхности пленки.

Особое внимание привлекают квазиодномерные объекты (нанопроволоки) [6], что связано с возможностью реализации в них ГМР-эффекта – квантово-механического эффекта, который наблюдается в тонких металлических многослойных системах, состоящих из чередующихся ферромагнитных и диамагнитных слоев. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев.

В многослойных нанопроволоках коэффициенты ГМР-эффекта существенно выше по сравнению с планарными структурами, в которых плоскости слоев имеют ориентацию, параллельную направлению электрического тока. Для нанопроволок эффект ГМР значителен в геометрии, когда электрический ток перпендикулярен границам раздела слоев. В отличие от традиционной пленочной геометрии с током, направленным параллельно слоям, эффект ГМР в такой конфигурации существенно выше. Данная конфигурация обеспечивает рассеяние практически всех электронов, участвующих в токопереносе, на границах последовательно расположенных магнитных слоев с антипараллельной ориентацией намагниченностей. Следствием этого будет и большее значение коэффициента ГМР по сравнению с обычными многослойными структурами.

Эффект ГМР может быть использован для реализации сенсоров магнитного поля, работающих в широких температурных интервалах. Существуют ключевые факторы, влияющие на величину коэффициента ГМР в многослойных нанопроволоках: геометрическое соотношение «длина/толщина» нанопроволок (при увеличении этого соотношения коэффициент ГМР должен расти); толщина диамагнитного слоя (должна быть сопоставима с длиной свободного пробега спин-поляризованных электронов); качество границ раздела ферромагнетик/диамагнетик.

Однако широкое применение материалов на основе многослойных и гранулированных нанопроволок, выращенных в порах матриц АОА, ограничено рядом причин, в том числе недостаточно изученным механизмом роста и отсутствием данных о постоянстве коэффициентов ГМР с течением времени и при различных температурах. Исследования процессов, обуславливающих временные аспекты величины коэффициентов ГМР, прямыми методами

сильно затруднены. Таким образом, задача разработки методики теоретического расчета температурно-временных зависимостей постоянства коэффициентов ГМР является актуальной.

### Методика расчета и результаты

В качестве модельного объекта для расчета коэффициентов ГМР была выбрана квазиодномерная многослойная структура, состоящая из чередующихся слоев диамагнитной (медь) и ферромагнитной (сплав никеля и кобальта) компонент.

Основным параметром, который характеризует ресурс работы магнитного сенсора или устройства считывания магнитной информации, является коэффициент ГМР. При этом будем считать, что допустимое снижение коэффициента ГМР составляет не более 10% от первоначальной величины. Магниторезистивный эффект в многослойных и гранулированных системах обуславливается главным образом наличием четких границ между ферро- и диамагнитной фазами, на которых происходит спин-зависимое рассеяние носителей заряда.

Взаимная диффузия атомов меди в ферромагнитный слой и атомов ферромагнитного металла в немагнитную прослойку является основной причиной, приводящей к размытию границ и, как следствие, к снижению величины эффекта. При этом происходит как разбавление магнитной фазы, так и уменьшение толщины немагнитной прослойки, вплоть до полного ее исчезновения в отдельных местах.

Уменьшение магниторезистивного коэффициента пропорционально концентрации немагнитной компоненты в магнитном слое:

$$MR_2 = MR_1 \frac{(C_{FM})_2}{(C_{FM})_1} = MR_1 \left( 1 - \frac{C_{NM}}{(C_{FM})_1} \right), \quad (1)$$

где  $MR_1$  и  $MR_2$  – коэффициенты ГМР, соответствующие концентрациям магнитной компоненты в ферромагнитном слое  $(C_{FM})_1$  и  $(C_{FM})_2$ ;  $C_{NM}$  – концентрация немагнитной компоненты. Разделив  $C_{NM}$  на  $(C_{FM})_1$ , можно перейти к относительной концентрации немагнитной компоненты  $C$ :

$$MR_2 = MR_1 (1 - C). \quad (2)$$

Иными словами, при заданном допустимом снижении коэффициента магнитосопротивления на 10% максимальная концентрация немагнитной компоненты в ферромагнитном слое должна составить 0.1.

Рассмотрим процесс диффузии атомов меди в никель (условно будем считать, что никель присутствует в магнитном слое в значительно большем количестве по сравнению с кобальтом). Считаем, что диффузия атомов происходит из непостоянного источника (медная прослойка), тогда решение основного уравнения диффузии (I закон Фика) приводит к следующему выражению для концентрации меди в магнитном слое [7]:

$$C_{\text{NM}}(x, t) = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (3)$$

где  $C_{\text{NM}}(x, t)$  – концентрация атомов меди на расстоянии  $x$  от источника (граница раздела слоев) к моменту времени  $t$ ,  $C_0$  – концентрация атомов меди на границе слоев в немагнитной прослойке (непостоянная),  $D$  – коэффициент диффузии атомов меди в слое никеля. Аналогично (3) можно перейти к относительной концентрации немагнитной компоненты  $C(x, t)$  в магнитном слое, приняв  $C_0 = 1$ :

$$C(x, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (4)$$

При этом связь между аргументами функции (4) и функции  $\varphi(s)$  следующая:

$$x = s\sqrt{2Dt}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что  $C(x, t) = 0.1$ . Пользуясь формулой (5), находим значение аргумента  $s = 0.397$ , который затем пересчитываем по формуле

$$x = 0.397\sqrt{2Dt}. \quad (6)$$

В качестве длины  $x$  выбираем характерный размер, равный длине свободного пробега электрона,  $2 \text{ nm} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$ . Таким образом,  $2 \cdot 10^{-7} = 0.397\sqrt{2Dt}$ . Выполняя преобразования, получаем соотношение между временем и коэффициентом диффузии:

$$3.56 \cdot 10^{-7} = \sqrt{Dt}. \quad (7)$$

Температурная зависимость коэффициента диффузии определяется на основании уравнения Аррениуса

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{T}\right), \quad (8)$$

где  $D_0$  – фактор диффузии;  $Q$  – температура активации процесса диффузии, соответствующая энергии активации;  $T$  – термодинамическая температура. Для атомов меди, диффундирующих в никеле,  $D_0 = 1.01 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  и  $Q = 17750 \text{ K}$  [8].

Соответственно из (8) время эксплуатации

$$t = \left(3.56 \cdot 10^{-7}\right)^2 / D. \quad (9)$$

Максимальная температура эксплуатации определяется работой токопотребляющих устройств микроэлектроники и составляет  $160^\circ\text{C}$ .

Коэффициент диффузии, вычисленный по формуле (8), при температуре  $T_1 = 293 \text{ K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) равен  $D_1 = 4.95 \cdot 10^{-30} \text{ cm}^2/\text{s}$ , а при  $T_2 = 433 \text{ K}$  ( $160^\circ\text{C}$ )  $D_2 = 1.59 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Время постоянства коэффициента ГМР в многослойных квазиодномерных структурах, вычисленное по формуле (9), для температуры  $T_2 = 433$  К ( $160^\circ\text{C}$ ) равно 2.5 года.

Остальные сроки службы сенсоров магнитного поля или устройств для считывания магнитной информации, сформированных на основе многослойных квазиодномерных структур, при различных температурах можно вычислить, исходя из вышеизложенных формул.

1. *A. Moser, K. Takano, D.T. Margulies, M. Albrecht, Y. Sonobe, Y. Ikeda, S.H. Sun, E.E. Fullerton*, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R157 (2002).
2. *X. Battle, A. Labarta*, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R15 (2002).
3. *И.П. Суздалев, П.И. Суздалев*, Успехи химии **70**, 203 (2001).
4. *R.M. Metzger, V.V. Kononov, M. Sun, T. Xu, G. Zangari, B. Xu, M. Benaki, W.D. Doyle*, IEEE Trans. Magn. **36**, 30 (2000).
5. *А.В. Болтушкин, В.Г. Шадров*, Зарубежная радиоэлектроника № 11, 51 (1997).
6. *В.М. Федосюк, В. Шварцатер, Т.А. Точицкий, С.А. Шарко*, Металлофиз. и новейшие технол. **11**, № 11, 17 (2000).
7. *П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов*, Физика твердого тела, Высшая школа, Москва (2000).
8. *Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич*, Справочник по элементарной физике, Наука, Москва (1982).

*A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, S.A. Sharko*

#### METHOD OF CALCULATION OF STABILITY OF THE GMR-COEFFICIENTS IN MULTILAYER QUASI-ONE-DIMENSIONAL STRUCTURES

Giant magnetoresistance (GMR) effect is a quantum-mechanical effect which consists in a significant change in the electrical resistance of a material or structure in an external magnetic field. As a model object for the calculation of the GMR-coefficient stability, a multilayer quasi-one-dimension structure (nanowires) has been selected, consisting of alternating layers of diamagnetic (copper) and ferromagnetic (nickel-cobalt alloy) components. In multilayer nanowires, GMR-coefficients are significantly higher in comparison with film (planar) structures. This is due to spin-dependent scattering of almost all of the electrons involved in the charge transport.

Key factors affecting the value of the GMR-coefficients of multilayer systems are: geometric ratio «length/thickness» of the nanowires; thickness of diamagnetic layers (should be comparable to the free path of spin-polarized charge carriers); quality of the ferromagnetic/diamagnetic interfaces.

Allowable reduction of the GMR-coefficient in devices that are based on the GMR is no more than 10% of the initial value. A limiting factor contributing to the magnetoresistive effect in multilayer systems is the presence of distinct boundaries between the ferromagnetic and diamagnetic phases. The main reason leading to the blurring of the boundaries and reduction of the GMR-effect is the interdiffusion of metal atoms of adjacent layers. And as results are dilution of the ferromagnetic phase (decreasing the

degree of spin-polarization of the charge carriers) and the reduction of the nonmagnetic layer thickness.

The paper proposes a method for calculating the GMR-coefficient stability in multilayer quasi-one-dimension structures. The method is based on the calculation and analysis of time-temperature dependences of the interdiffusion coefficients of metal atoms.

The time of the stability of the GMR-coefficients in multilayer quasi-one-dimension structures calculated according to the formulas is equal to 2.5 years (at 433 K). Lifetime of the magnetic field sensors or devices for reading magnetic information formed on the basis of quasi-one-dimension structures can be theoretically calculated on the base of the proposed method (for various temperatures).

**Keywords:** giant magnetoresistive effect, multilayer quasi-one-dimension structure, anodized alumina oxide, time-temperature diffusion coefficients