

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Разработан датчик угловых перемещений на основе гигантского магниторезистивного эффекта для применений в линейных и угловых акселерометрах. Получена зависимость сопротивления тонкой полоски от ее параметров и от угла намагничивания. Полученная зависимость является не линейной. Для линейаризации характеристики на материал тонкой пленки наносят проводящие полоски-штрихи под углом 45° к оси жесткого намагничивания. Проводящие полоски-штрихи являются эквипотенциалами на поверхности тонкой ферромагнитной пленки. Перпендикулярно к эквипотенциалам направлен вектор плотности тока в свою очередь повернутый на угол 45° относительно оси x . Из всех нежелательных явлений, отрицательно влияющих на характеристики датчика перемещений является изменение температуры. Снижение этого влияния до допустимых значений осуществляется включение рабочих магниторезисторов в дифференциальный мост. Результатом применения датчиков на ГМРЭ является повышение чувствительности акселерометров и снижение погрешности нулевого сигнала.

Ключевые слова: магниторезистивный эффект, линейаризация, мостовая схема, датчик угловых перемещений.

Анизотропный магниторезистивный эффект (АМЭ) у ферромагнитных материалов, например, у пермаллоя ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) проявляется в зависимости удельного электрического сопротивления ρ от угла между вектором плотности тока \vec{i} и вектором внутренней намагниченности \vec{j} (рис. 1) На базе АМЭ могут быть построены магнитометры как прямого измерения, так и компенсационные. Магнитометры прямого измерения являются широкополосными с частотной полосой от постоянного тока до 1 ГГц, а чувствительность их лежит в диапазоне $10^3 - 5 \cdot 10^6$ нТл. Компенсационные магнитометры имеют ограниченную задаваемую параметрами полосу пропускания и минимальное значение измеряемой напряженности магнитного поля порядка 0,1 нТл. Магнитометры на основе АМЭ изготавливают по технологии МЭМС, они могут работать в диапазоне температур от 55 до 200°C .

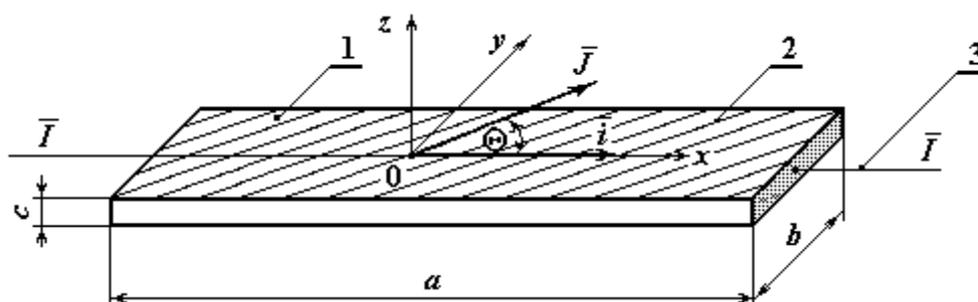


Рис. 1. Чувствительный элемент импульсного магнитометра

Рассмотрим вначале теоретические основы магниторезистивной анизотропии на примере тонкой полоски ферромагнетика (рис. 1). Образец 1 имеет анизотропию формы, выражающуюся следующим неравенством: $a \gg b \gg c$, причем толщина слоя $c < 0,1$ микронметра. На поверхности пленки нанесена металлизация вакуумным напылением в виде тонких штрихов 2 под углом 45° к оси жесткого намагничивания (ось y). На торцах образца имеются под-

воды Z для подключения внешнего питания с силой тока \vec{I} . В связи с анизотропией формы вектор внутреннего намагничивания \vec{J} лежит в плоскости пленки.

Двумерный тензор удельного сопротивления пленки можно выразить следующим образом

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{\parallel} & 0 \\ 0 & \rho_{\perp} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} - компоненты удельного сопротивления пленки, соответственно параллельно и перпендикулярно к направлению вектора намагничивания \vec{J} . Для осуществления общих поворотов тензора (1) необходимо выполнить лево- или правостороннее умножение его на матрицу вращения или ее транспоненту:

$$S = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где Θ - угол между вектором намагничивания \vec{J} и осью легкого намагничивания x (рис. 1). После умножения получим зависимость удельного тензора сопротивления угла поворота:

$$\rho(\Theta) = \begin{bmatrix} \rho_{\parallel} \cos^2 \Theta + \rho_{\perp} \sin^2 \Theta & \rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta \\ \rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta & \rho_{\parallel} \sin^2 \Theta + \rho_{\perp} \cos^2 \Theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Результирующее поле напряженности E с двумерным вектором плотности тока имеет вид:

$$\vec{E}(\Theta) = \rho(\Theta) \vec{i}, \quad (4)$$

где $\vec{i} = \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}$. В связи с тем, что вдоль оси жесткого намагничивания y отсутствует ток, напряженности поля имеет вид:

$$E(\Theta) = \begin{bmatrix} (\rho_{\parallel} \cos^2 \Theta + \rho_{\perp} \sin^2 \Theta) i_x \\ (\rho_{\parallel} \sin \Theta \cos \Theta - \rho_{\perp} \sin \Theta \cos \Theta) i_x \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Используя геометрические параметры пленки (рис. 1) a , b и c - соответственно длину, ширину и толщину, представим напряженность поля и силу тока вдоль оси легкого намагничивания в виде:

$$E(\Theta) = U/a, \quad I = i_x bc. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим зависимость сопротивления тонкой полоски от ее параметров и от угла намагничивания:

$$R(\Theta) = R_{\parallel} - (R_{\parallel} - R_{\perp}) \sin^2 \Theta = R_{\parallel} \cos^2 \Theta + R_{\perp} \sin^2 \Theta \quad (7)$$

Полученная зависимость является нелинейной. Для линейризации характеристики материал тонкой пленки наносят проводящие полоски-штрихи под углом 45° к оси жесткого намагничивания (ось y). Проводящие полоски-штрихи являются эквипотенциалами на поверхности тонкой ферромагнитной пленки. Перпендикулярно к эквипотенциалам направлен вектор плотности тока \vec{i} , в свою очередь повернутый на угол 45° относительно оси x . С учетом этого поворота, имеем:

$$\Theta = \alpha - 45^{\circ},$$

где α - угол поворота вектора намагничивания \vec{J} относительно оси x .

Далее воспользуемся тригонометрической зависимостью:

$$\sin^2 \left(\frac{\alpha - 45^{\circ}}{2} \right) = \frac{1}{2} (1 - \sin(\Theta)). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получим:

$$R(\alpha) = \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*) + \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*)\sin(\Theta). \quad (9)$$

Из работы [1] известна зависимость между вращением направления намагничивания J относительно оси легкого намагничивания и внешним магнитным полем H_y , полученная посредством минимизации суммы вызванных анизотропией энергетических плотностей энергии размагничивания и потенциальной энергии:

$$\sin \Theta = \frac{H_y}{H_k}, \quad H_y < H_k, \quad (10)$$

где H_y - компонента внешнего магнитного поля в направлении оси y жесткого намагничивания; H_k - полная напряженность поля анизотропии, представляющая собой сумму константы внутренней напряженности примененного материала и геометрической составляющей:

$$H_k = H_0 + \frac{c}{b} J_s, \quad (11)$$

H_0 - константа внутренней напряженности магнитного поля материала; J_s - намагничивание насыщения; c и b - соответственно толщина и ширина магниторезистивной полоски.

Преобразуя (10), (11) и (12) совместно, получим:

$$R(\Theta) = \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*) + \frac{1}{2}(R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*)\frac{H_y}{H_k}, \quad (12)$$

где * - верхний индекс у резисторов, введенный для того, чтобы подчеркнуть, что на поверхности рассматриваемой анизотропной полоски нанесена линеаризирующая металлизация.

Соотношение (12) представляет собой линейную зависимость сопротивления линеаризированной анизотропной полоски от внешней напряженности магнитного поля. Угол линеаризирующей металлизации относительно оси легкого намагничивания можно выполнить по соотношению $\Theta = \alpha + 45^\circ$, тогда при обращенном направлении плотности тока в магниторезисторе можно получить соотношение, аналогичное (12) с той лишь разницей, что знак у второго члена изменится на противоположный.

Максимальные изменения сопротивления магниторезистора имеют место, когда напряженность поля перпендикулярна к его плоскости, т.е. совпадает с осью жесткого намагничивания y . Составляющая магнитного поля, действующая по оси легкого намагничивания x , на величину сопротивления магниторезистора влияния не оказывает.

В планарной структуре выполняют две пары магниторезисторов с противоположной штриховкой и включают их в полный мост (рис. 2). Напряжение в измерительной диагонали моста определяется в виде:

$$\Delta U = \frac{U_{\Pi}}{2} \frac{\Delta R}{R_0} \sin 2\varphi, \quad (13)$$

где U_{Π} - напряжение питания моста; φ - угол между направлением намагниченности и направлением линеаризирующих металлических полосок; R_0 - сопротивление магнитной полоски без влияния магнитного поля; ΔR - изменение сопротивления магнитной полоски.

Угол φ определяется через компоненты магнитного поля H_x и H_y . Компонента H_z - перпендикулярна к плоскости магнитного поля и соответственно на угол φ влияния не оказывает:

$$\frac{H_x}{H_0} \operatorname{tg} \varphi = \frac{H_y}{H_0} - \sin \varphi. \quad (14)$$

Посредством снижения толщины металлической полоски линеаризации можно существенно повысить чувствительность магниторезистивного моста к магнитному полю. До

уровня стандартного сигнала (-5...+5В) выходной сигнал с моста доводят масштабным усилителем.

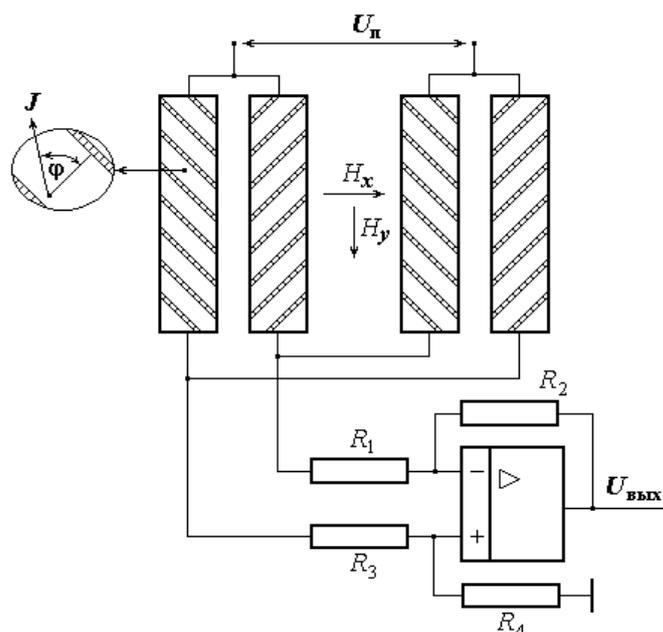


Рис. 2. Мостовая схема включения магниторезисторов

Типичные изменения сопротивления анизотропных магниторезисторов составляют порядка 2 ... 4%. Изменения более 10% были получены при использовании металлов с планарной структурой, а эффект был назван гигантским магниторезистивным эффектом (ГМРЭ). Наиболее просто ГМРЭ реализуется в виде структуры из четырех слоев толщиной менее 0,1 микронметра (рис. 3).

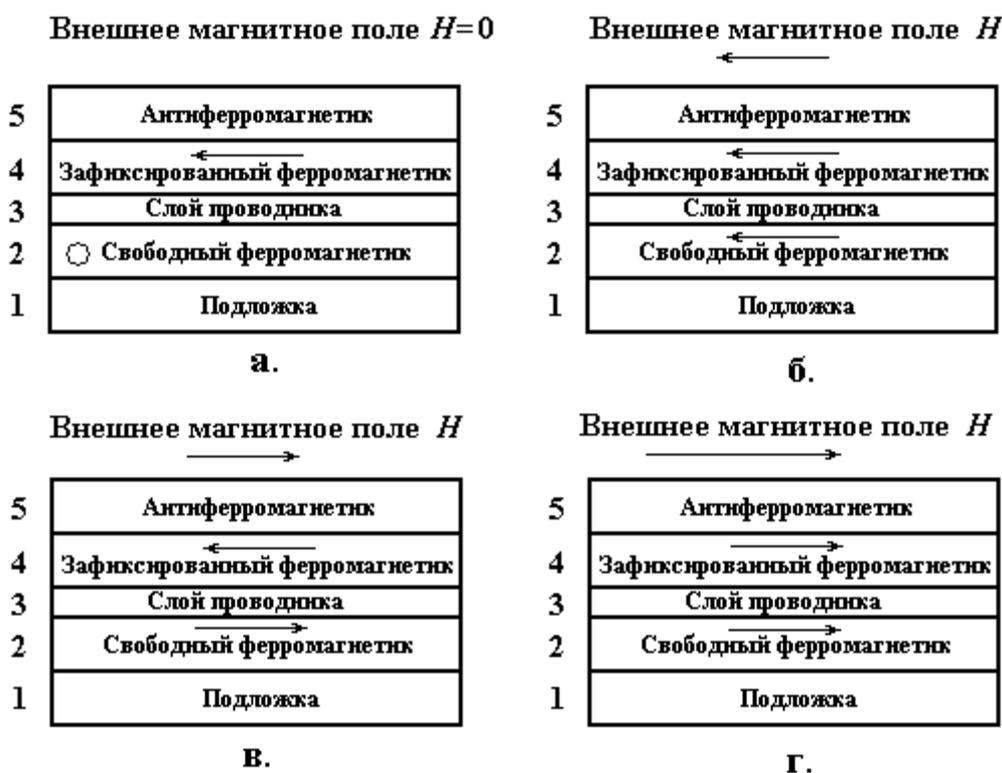


Рис. 3. Гигантский магниторезистивный эффект и реакция его структуры на внешнее поле

Все слои наносятся вакуумным напылением на изоляционную подложку. Первый слой – свободный ферромагнетик, материалом для него является пермаллой $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$. Следующий слой зафиксированный (жесткий) ферромагнетик из сплава кобальта и никеля CoNi . Между свободным и зафиксированным ферромагнетиками имеется тонкий разделительный слой из немагнитного проводника. Последний антиферромагнитный слой изготовлен из окиси никеля NiO и предназначен для удержания намагниченности жесткого ферромагнетика. Намагничивание жесткого ферромагнетика осуществляется при его изготовлении. Линеризующая металлизация наносится на подложку под слоем свободного ферромагнетика.

На рис. 4 приведена схема, поясняющая устройство разработанного магниторезистивного датчика перемещений. В состав схемы входят: пластина монокремния 1 , на которой как на изоляционной подложке размещены первая и вторая четырехслойные магниторезистивные структуры 2 ; дискретный источник магнитного поля 3 ; подвижный объект (маятник) 4 на упругом подвесе 5 , который может быть выполнен для работы, как на изгиб, так и на кручение. Ось качания маятника также может быть выбрана произвольно. В любом случае маятник совершает сложное движение - линейное x от прогибов и угловое α , от поворотов. Точечные источники магнитного поля воздействуют на магниторезистивные структуры в направлении максимальной чувствительности.

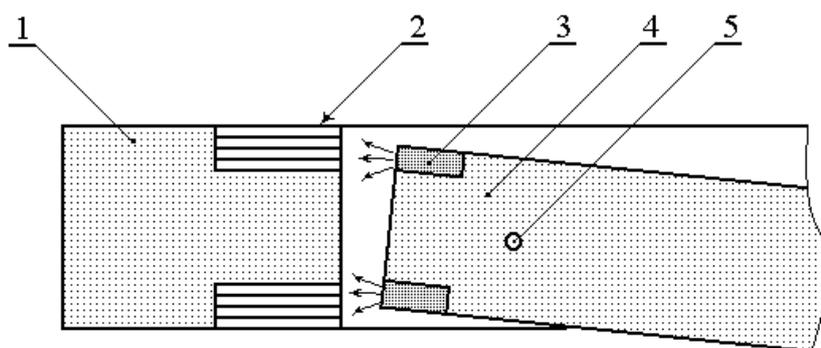


Рис. 4. Магниторезистивный датчик перемещения

В связи с тем, что магниторезисторы обладают сильной зависимостью от температуры, в измерительные цепи их включают в противоположные плечи мостовой схемы (рис. 4). Плечи моста выполняют по аналогичной четырехслойной структуре. Располагать структуры можно в один столбик одна над другой или в два столбика рядом. Рабочие линеризированные магниторезисторы 1 и 2 на схеме показаны косой штриховкой. Для изменения направления тока в свободных магниторезисторах они включены встречно. Зафиксированные магниторезисторы 3 и 4 включены последовательно с одним направлением тока

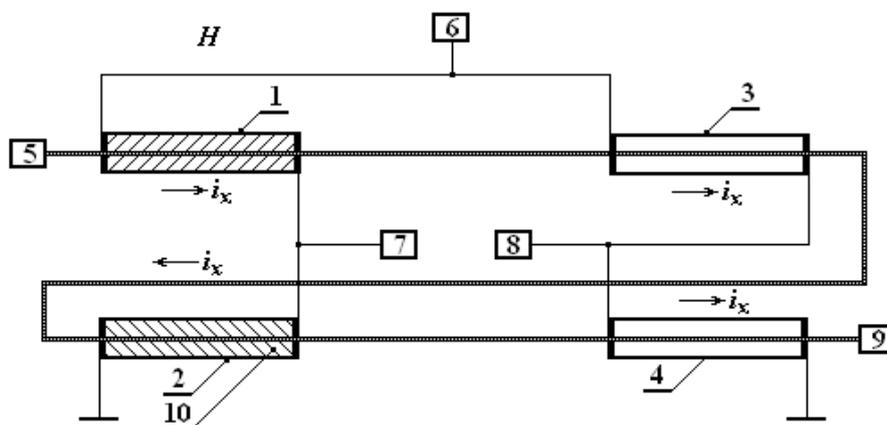


Рис. 5. Схема включения магниторезисторов и управляющей шины в четырехслойной структуре

Контактная площадка 6 предназначена для подвода внешнего питания $U_{\text{п}}$ мостовой схемы. Контактные площадки 7 и 8 являются выходными для измерительной диагонали моста. Поверх всех плеч моста проходит управляющая напыленная обмотка с контактными площадками 5 и 9. Ток в управляющей обмотке над всеми магниторезисторами имеет одинаковое направление. Управляющая обмотка имеет назначение установки и сброса для схем прямого измерения или обмотки обратной связи в компенсационных магнитометрах.

Магниторезисторы в качестве датчиков перемещений используются только для малых углов. При больших углах применение магниторезисторов теряет смысл. В соответствии со схемой включения напряжение на выходе мостовой схемы составляет:

$$U_{\text{вых}}(\Theta) = U_{\text{п}} \frac{R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*}{R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*} \frac{H_y}{H_k}. \quad (15)$$

Применяя соотношение (10) для (15), получим:

$$U_{\text{вых}}(\Theta) = U_{\text{п}} \frac{R_{\parallel}^* - R_{\perp}^*}{R_{\parallel}^* + R_{\perp}^*} \sin \Theta. \quad (16)$$

Магнитометры на базе ГМРЭ находят широкое применение: от считывающих головок в компьютерной технике до интегральных датчиков информации в качестве преобразователей перемещения. При слабом внешнем магнитном поле $H_y \ll H_k$ соотношение (16) является линейным.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 504 с.
2. **Дитмауер, К.** Магнитные датчики на базе анизотропного магниторезистивного эффекта // Контрольно-измерительная техника. – М.: Экспресс-информация. 2009. №9С. 13-25.

Дата поступления
в редакцию 26.10.2012

V.D. Vavilov

SENSOR OF THE ANGULAR DISPLACEMENT ON BASE GIGANTIC MAGNITORESISTIVS EFFECT

Arzamasskiy pollytechnic institute (branch)
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The Designed sensor of the angular displacement on base gigantic magnitoresistivs effect for using in linear and angular accelerometers. Dependency of the resistance of the fine strip is Received from her(its) parameter and from corner of the magnetization. The Got dependency is not linear. For linearization of the feature on material of the fine film inflict the conducting strips- stroke under corner 45° to axis of the hard magnetization. The Conducting strips-stroke areekvipotentials on surfaces of the fine ferromagnetic film. Perpendicular to ekvipotentials is directed vector to density of the current in turn gone on to corner 45° for axis x. From all undesirable phenomenas, negativly influencing upon features of the sensor displacement thread is a change the temperature. The Reduction of this influence before possible importances it is realized cut-in a worker magnetoresistor in differential bridge. The Result use-thread sensor on GMRE is increasing to sensitivity accelerometers and reduction inaccuracy zero signal.

Key words: magnitoresistivs effect, linearization, roadway cxema, sensor of the angular displacement.