ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА

Спин-вентильный сенсор в магнитном поле движущейся метки

Г.В. Бабайцев,^а Н.Г. Чеченин,⁶ И.О. Джунь, И.Л. Ромашкина, М.Г. Козин, А.В. Макунин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 14.01.2021, после доработки 13.03.2021, принята к публикации 15.03.2021.

Рассматривается изменение магнитосопротивления спин-вентильного сенсора при его линейном перемещении в неоднородном поле магнитной метки при различной ориентации магнитного момента спин-вентильной структуры. Показано, что форма сигнала сенсора и его величина критически зависят от исходной ориентации магнитного момента и траектории движения сенсора в поле магнитной метки.

Ключевые слова: спин-вентильный сенсор, магнитная метка, неоднородное поле, гигантское магнитосопротивление, модель Стонера—Вольфарта.

УДК: 537.621.2, 537.621.5. PACS: 85.75.-d, 75.47.De, 85.75.Ss.

введение

Спин-вентильные (СВ) сенсоры являются одним из базовых элементов современной и перспективной спинтроники [1-4]. Сфера применений сенсоров охватывает практически все области индустрии и жизнедеятельности человека. Их достоинства высокая чувствительность, низкое энергопотребление, низкая себестоимость, малые размеры, высокое пространственное и временное разрешение магнитных полей исследуемых объектов. Схематично СВ-сенсор представляет собой многослойную тонкопленочную структуру, состоящую из двух ферромагнитных (Ф) слоев, разделенных немагнитной прослойкой (рис. 1). Направление вектора намагниченности одного из Ф-слоев (ЗФ-слоя) закреплено за счет обменного взаимодействия с антиферромагнитным (АФ) слоем. Слой со свободной намагниченностью (СФ-слой) является чувствительным элементом в структуре и изменяет ориента-



Рис. 1. Схематичное изображение слоев СВ-структуры: БС — буферный, АФ — антиферромагнитный, ЗФ — закрепленный ферромагнитный, НМ — немагнитный, СФ свободный ферромагнитный, ЗС — защитный слои

цию своей намагниченности под действием внешнего магнитного поля. В результате возникающей неколинеарности магнитных моментов ЗФ- и СФслоев полное сопротивление структуры возрастает. Этот эффект получил название гигантского магнитосопротивления (ГМС).

В данной работе акцентируется внимание на том, что величина ГМС зависит не только от величины и направления внешнего магнитного поля, действующего на сенсор, но и от взаимной ориентации векторов магнитного поля и намагниченности свободного слоя СВ-сенсора. Именно это обстоятельство позволяет определять местоположение движущегося магнитного объекта. В работе рассматривается изменение ГМС-сигнала СВ-сенсора при его линейном перемещении в неоднородном поле магнитной метки (что эквивалентно перемещению метки вблизи неподвижного сенсора) при различной исходной (вдали от метки) ориентации вектора намагниченности СФ-слоя. Показано, что, в зависимости от исходной ориентации магнитного момента СФ-слоя сенсора и траектории движения в поле магнитной метки, ГМС-сигнал может либо иметь максимальное значение при максимальном сближении, либо отсутствовать.

1. РЕАКЦИЯ СПИН-ВЕНТИЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ради удобства вместо движения магнитной метки в окрестности сенсора рассмотрим движение сенсора вблизи магнитной метки. Пусть магнитная метка в форме вытянутого цилиндра или параллелепипеда располагается в центре декартовых координат с осью Z, направленной вдоль длинной стороны метки. Сенсор движется по прямой траектории параллельно оси **Y** в плоскости $\{X_0, Y, Z\}$. Скорость перемещения такова, что можно считать, что намагниченность СФ-слоя СВ-структуры устанавливается мгновенно. При этом пространственная вариация неоднородного поля в пределах размера СВ-структуры не учитывается. Такие условия зачастую реализуются в высокочувствительных микроразмерных датчиках позиционирования, где сенсоры реагируют на движущуюся магнитную метку.

^{*a*} E-mail: kvyvg-george93@mail.ru

⁶ E-mail: chechenin@yandex.ru



Рис. 2. а — Движение CB структуры представленное ее тремя положениями в поле магнитной метки в плоскости OZY; б — график зависимости изменения угла разворота намагниченности от изменения положения структуры

Ввиду того, что в спин-вентильной структуре только один слой ферромагнетика является чувствительным к внешнему магнитному полю, а также пренебрегая межслоевым взаимодействием ввиду его малости, мы можем исследовать поведение СВ-структур путем рассмотрения одного СФ-слоя. Из условия малости размера структуры можно также считать, что СФ-слой является однодоменным и находится в локально однородном магнитном поле, напряженность которого меняется по мере удаления сенсора от метки в соответствии с 3D-конфигурацией поля метки (рис. 2, a).

Под воздействием локального магнитного поля метки происходит вращение магнитного момента СФ-слоя (рис. 2, a, где угол отклонения изображен на рис. 2, δ). Вращение может быть описано с помощью модели Стонера—Вольфарта [5, 6] исходя из полной энергии на единицу объема E, являющейся суммой зеемановской энергии взаимодействия внешнего магнитного поля **H**, намагниченности ферромагнитной пленки $\mathbf{M}_{\mathbf{S}}$ и энергии ее одноосной анизотропии

$$E = -\mu_0 (\mathbf{H}\mathbf{M})_{xy} - K_u \sin^2 \varphi, \qquad (1)$$

где φ — угол разворота (неколинеарности) намагниченности М ферромагнетика под действием внешнего поля **Н** и K_u — постоянная одноосной анизотропии. Для определения значения равновесного угла φ введем локальную систему координат хуг, где ось г направлена перпендикулярно плоскости сенсора (и СФ-слоя), у — вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). В отличие от координатной системы XYZ, введенной ранее для описания взаимного расположения метки и сенсора (рис. 2), для локальной системы будем использовать строчные индексы xyz. Вследствие размагничивающего эффекта магнитный момент СФ-слоя лежит в плоскости слоя, т.е. в локальной системе имеет компоненты $\mathbf{M} = \{M_x, M_y, 0\}$. Внешнее поле **H** имеет компоненты $\{\mathbf{H}_{xy}, H_z\}$, где $\mathbf{H}_{xy} = \{H_x, H_y\}$ — вектор-проекция **H** на плоскость xy, ориентирован под углом в по отношению к ОЛН (точнее, к направлению поля при магнетронном осаждении, задающем одноосную анизотропию в Ф-слое) (рис. 3). С учетом сказанного уравнение (1) переписываем в виде





Рис. 3. Схема, поясняющая разворот намагниченности **М** под действием внешнего поля **H**

Для определения равновесного угла неколинеарности φ минимизируем (2) и ищем решение уравнения $\frac{\partial E}{\partial \varphi} = 0$, удовлетворяющее условию $\frac{\partial E^2}{\partial \varphi^2} > 0$:

$$\frac{\partial E}{\partial \varphi} = H_{xy} \mu_0 M_S \sin(\varphi - \theta) - K_u \sin 2\varphi = 0.$$

Делаем замену $h = \frac{H_{xy}\mu_0 M_S^2}{2K_u}, h_y = h \cdot \cos \theta,$ $h_x = h \cdot \sin \theta, \cos \varphi = \frac{M_y}{M_S}$ и $\sin \varphi = \frac{M_x}{M_S}$ и получаем

$$1 = \frac{h_y}{M_y} - \frac{h_x}{M_x}.$$
(3)

Так как $M_x^2 + M_y^2 = M_S^2$, получим

$$\begin{split} M_y^4 - 2h_y M_y^3 + (h_x^2 + h_y^2 - M_S^2) M_y^2 + \\ &+ 2h_y M_S^2 M_y - M_S^2 h_y^2 = 0. \end{split}$$

Из полученных решений M_y находим $\varphi = \arccos \frac{M_y}{M_S}$. Найденные φ ограничены областью определения $\varphi \in [0, \pi]$ и, как было указано выше, должны удовлетворять условию

$$-\cos 2\varphi + \frac{h}{M_S} \left(\frac{H_C}{H_{xy}}\cos\varphi + \frac{H_x}{H_{xy}}\sin\varphi\right) > 0.$$

Эффект ГМС, наблюдающийся в CB-структуре, заключается в возрастании сопротивления с увеличением неколинеарности во взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных 3Φ - и C Φ -слоев. Полагая, что внешнее поле не меняет ориентацию намагниченности закрепленного ферромагнетика 3Φ , неколинеарность можно характеризовать углом φ , тогда магнитосопротивление структуры определяется соотношением:

$$R = R^0 (1 - \cos(\varphi(H))) / 2$$

где $R = R(H) - R_P$; $R^0 = R_{AP} - R_P$; R_P и R_{AP} — сопротивление при параллельной и антипараллельной ориентациях. Таким образом, косинус угла в первом приближении определяет сопротивление CB, что позволяет построить соответствующую зависимость ГМС от внешнего поля.

2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МЕТКИ

В качестве источника магнитного поля мы выбрали цилиндрический Nd—Fe—B-постоянный магнит диаметром 2 мм и высотой 3 мм. Детально метод расчета для постоянного магнита произвольной формы изложен в работе [7]. Аналогичный метод расчета полей в аксиально-симметричном приближении использовался в работе [8]. Пространственное распределение $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ для цилиндрической метки схематично представлено на рис. 4.



Рис. 4. Иллюстрация 3D пространственного распределения магнитного поля **H**(**r**) цилиндрической метки

Распределение пространственных компонент напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_X, H_Y, H_Z\}$ вдоль некоторых линейных траекторий движения сенсора параллельно оси **Y** проиллюстрировано на рис. 5.

3. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СВ-СТРУКТУРЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ МЕТКИ НА СИГНАЛ ГМС

Рассмотрим шесть различных ориентаций CBструктур, представленных на рис. 6 вектором намагниченности СФ-слоя. Благодаря действию размагничивающего фактора намагниченность ферромагнитных слоев лежит в плоскости слоев. Поскольку сопротивление структуры определяется поведением намагниченности свободного ферромагнитного слоя, на рисунке сенсор представлен лишь одним СФслоем.



Рис. 6. Схематичное представление исходной взаимной ориентации векторов намагниченности **М** СФ-слоев и магнитной метки

Соотношение размеров пленки и метки, а также пространственное положение сенсора относительно метки на рис. 6 не соответствуют действительности и представлены для наглядности. Имеет значение лишь обозначенная стрелками ориентация намагниченности ферромагнитного слоя **M** в отсутствие внешнего магнитного поля (т. е. вдали от метки). Математически ориентации сенсоров можно записать следующим образом:

1.1 :
$$\mathbf{n} \parallel \mathbf{Y}, \quad \mathbf{M} = \{0, 0, M_S\};$$

1.2 : $\mathbf{n} \parallel \mathbf{Y}, \quad \mathbf{M} = \{M_S, 0, 0\};$
2.1 : $\mathbf{n} \parallel \mathbf{Z}, \quad \mathbf{M} = \{M_S, 0, 0\};$
2.2 : $\mathbf{n} \parallel \mathbf{Z}, \quad \mathbf{M} = \{0, -M_S, 0\};$
3.1 : $\mathbf{n} \parallel \mathbf{X}, \quad \mathbf{M} = \{0, 0, M_S, \};$
3.2 : $\mathbf{n} \parallel \mathbf{X}, \quad \mathbf{M} = \{0, -M_S, 0\},$



Рис. 5. Профили пространственных компонент магнитного поля цилиндрической метки при сканировании параллельно оси У для указанных значений X₀ и Z₀



Рис. 7. а — Схема движения СВ-структуры относительно магнитной метки: синей стрелкой указано направление движения, красной — исходная ориентация магнитного момента; б — изменение углов неколинеарности при движении сенсора по линейной траектории, параллельной оси Y и проходящей через точки X₀Z₀, обозначенные на графиках; в — соответствующее изменение магнитосопротивления

где \mathbf{M} — вектор намагниченности СФ-слоя, M_S — значение намагниченности в насыщении, \mathbf{n} — нормаль к поверхности сенсора. Мы будем рассматривать случай, когда СВ-структура перемещается в плоскости, параллельной YZ, находящейся на некотором расстоянии X_0, Z_0 от начала координат (рис. 7, *a*). В начале координат неподвижно располагается магнитная метка, в качестве наглядного примера выберем метку цилиндрической формы с намагниченностью, направленной вдоль оси Z. Используя рассчитанные компоненты магнитного по-

ля метки и решая уравнения (3), определяем угол поворота φ в зависимости от координат сенсора. Результаты расчетов для шести ориентаций сенсора иллюстрируются на рис. 7, б и в.

Представленные на рис. 7 результаты демонстрируют, что в случае неоднородного внешнего магнитного поля и форма, и амплитуда сигнала магнитосопротивления СВ-сенсора критическим образом зависят от ориентации сенсора. Так, при движении сенсора с ориентацией магнитного момента параллельно магнитному моменту метки в экваториальной плоскости метки (ориентация 1.1, траектория $\{X_0, Y, Z_0 = 0\}$, рис. 7, 6) ГМС-сигнал отсутствует, поскольку не возникает вращающего **М** момента (**M** × **H** = 0). По той же причине отсутствует вращение и, следовательно, ГМС-сигнал для ориентации 3.1 (траектория $\{7, y, 0\}$ на рис. 7, 6).

Рис. 7 также демонстрирует, что ГМС-сигнал может отсутствовать не только по причине отсутствия вращающего момента, но и в некоторых случаях, когда $\mathbf{M} \times \mathbf{H} \neq \mathbf{0}$. Например, при ориентации 1.1 и движении в полярной плоскости { $X_0 = 0, Y, Z_0$ } нулевой вращающий момент возникает только в окрестности оси полюса $\{X_0 = 0, Y = 0, Z_0\}$, однако ГМС-сигнал также отсутствует вдоль всей траектории (рис. 7, в) из-за того, что вращающий момент направлен на вывод магнитного момента из плоскости слоя, что подавляется возникающим размагничивающим полем ферромагнитного слоя. Аналогичный эффект подавления вращения (и ГМС-сигнала) при движении в полярной плоскости продемонстрирован для ориентации 2.2 (траектория $\{0, y, 7\}$) на рис. 7, 6, в, а также для ориентации 2.1 при движении в экваториальной области (траектория {7, y, 0} на рис. 7, *б*, *в*).

Отметим также, что изменение угла может иметь как биполярную (для ориентаций 2.1 иЁЗ.1), так и однополярную (для других ориентаций) форму, а соответствующий сигнал ГМС иметь два или только один максимум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные на рис. 7 результаты демонстрируют, что в случае неоднородного внешнего магнитного поля и форма, и амплитуда сигнала магнитосопротивления СВ-сенсора критическим образом зависят

от ориентации сенсора. Величина ГМС-сигнала и его форма при движении вдоль траектории существенно зависит не только от удаления сенсора от метки, но и от расположения траектории сканирования и ориентации сенсора относительно магнитной метки. Оба этих фактора могут приводить к тому, что сигнал сенсора будет отсутствовать при достаточно большой напряженности магнитного поля вдоль траектории движения сенсора. Изложенная в работе модель позволяет оптимизировать расположение и ориентацию сенсора по отношению к магнитным меткам разного рода с целью получения необходимого уровня сигнала магнитосопротивления и точности локализации магнитной метки в пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электронинформ, 2005.
- 2. *Reig C., de Freitas S. C., Mukhopadhyay S. Ch.* Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of-the-Art Applications. Springer, 2013.
- Ennen I., Kappe D., Rempel T. et al. // Sensors. 2016. 16. P. 904.
- Zheng Ch., Zhu Ke de Freitas S. C. et al. // IEEE Transactions on magnetics. 2019. 55, N 4. 0800130.
- Stoner E. C., Wohlfarth E. P. // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1948. A240. P. 599.
- Bruckner F., Bergmair B., Brueckl H. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2015. 381. P. 344.
- Bukunov K., Babaitsev G., Chechenin N. // EPJ Web of Conf. 2018. 185. 01001.
- 8. Camacho J. M., Sosa V. // Revista Mexicana de Fisica 2013. E 59. P. 8.

A Spin-Valve Sensor in the Magnetic Field of a Moving Label

G. V. Babaytsev^a, N. G. Chechenin^b, I. O. Dzhun, I. L. Romashkina, M. G. Kozin, A. V. Makunin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: ^akvyvg-george93@mail.ru, ^bchechenin@yandex.ru.

The variation in the magnetoresistance of a spin-valve sensor during its linear movement in an inhomogeneous field of a magnetic label at different orientations of the magnetic moment of the spin-valve structure is considered. It is shown that the shape of the sensor signal and its value critically depend on the initial orientation of the magnetic moment and the trajectory of the sensor in the field of the magnetic label.

Keywords: spin-valve sensor, magnetic label, inhomogeneous field, giant magnetoresistance, Stoner-Wohlfarth model.

PACS: 85.75.-d, 75.47.De, 85.75.Ss. Received 14 January 2021.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 4. Pp. 246–251.

Сведения об авторах

- 1. Бабайцев Георгий Владимирович вед. инженер; тел: (495) 939-23-48, e-mail: kvyvg-george93@mail.ru.
- 2. Чеченин Николай Гарилович доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: chechenin@sinp.msu.ru, nchechenin@yandex.ru.
- 3. Джунь Ирина Олеговна науч. сотрудник; e-mail: irina.dzhun@gmail.com.
- 4. Ромашкина Ирина Леонидовна канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел: (495) 939-41-60, e-mail: irom@srd.sinp.msu.ru.
- 5. Козин Михаил Германович канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kozin@srd.sinp.msu.ru.
- 6. Макунин Алексей Владимирович канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел: (495) 939-36-05, e-mail: makunin@anna19.sinp.msu.ru.