

05

# Исследование характеристик ТМР-сенсора на основе магнитных туннельных переходов с одноосной кристаллической анизотропией в свободном слое

© М.Д. Лобкова<sup>1</sup>, П.Н. Скирдков<sup>1,2</sup>, К.А. Звездин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новые спинтронные технологии, Российский квантовый центр, Инновационный центр Сколково, Московская обл., Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: m.shkanakina@nst.tech

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Представлен подход к проектированию туннельного магниторезистивного сенсора на основе магнитных туннельных переходов со свободным слоем с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора. Выполнено подробное исследование влияния формы магнитного туннельного перехода, туннельного магнетосопротивления и поля кристаллической анизотропии на чувствительность и передаточную характеристику ТМР-сенсора.

**Ключевые слова:** магнитный туннельный переход, магнитный туннельный переход со свободным слоем с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора, спинтроника, проектирование сенсора, ТМР-сенсор, туннельный магниторезистивный сенсор, передаточная характеристика сенсора, чувствительность сенсора.

DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58240.29NN

## 1. Введение

В настоящее время туннельные магниторезистивные сенсоры приобретают все большее значение в крупных отраслях промышленности, в частности, автомобильной индустрии. Сенсоры магнитного поля, основанные на эффектах анизотропного магнетосопротивления (АМП) [1,2] и гигантского магнетосопротивления (ГМП) [3,4], широко используются в качестве датчиков углового положения и датчиков контроля тока. Для такого рода применений необходимо обеспечить стабильность выходного сигнала сенсора без излишних помех, действующих на чувствительный элемент. Данное требование удовлетворяется за счет проектирования датчика в мостовой схеме Уитстона. Замена АМП и ГМП сенсоров на туннельные магниторезистивные (ТМР) датчики [5–7], основанные на магнитных туннельных переходах (МТП) [8–10], привела к повышению чувствительности сенсоров за счет эффекта туннельного магнетосопротивления, который достигает порядка 200%.

Сопротивление чувствительного элемента МТП изменяется под действием внешнего магнитного поля, благодаря чему сигнал магнитного поля преобразуется в электрический. Диапазон детектирования внешнего магнитного поля определяется линейностью кривой магнетосопротивления МТП, а для достижения такой характеристики используют дизайн МТП со свободным слоем с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора

(рис. 1, *a*). Данный дизайн МТП обеспечивает околонулевую ширину петли гистерезиса (рис. 1, *b*). В данной работе представлено аналитическое исследование влияния формы МТП, туннельного магнетосопротивления и поля кристаллической анизотропии на чувствительность сенсора и его передаточную характеристику.

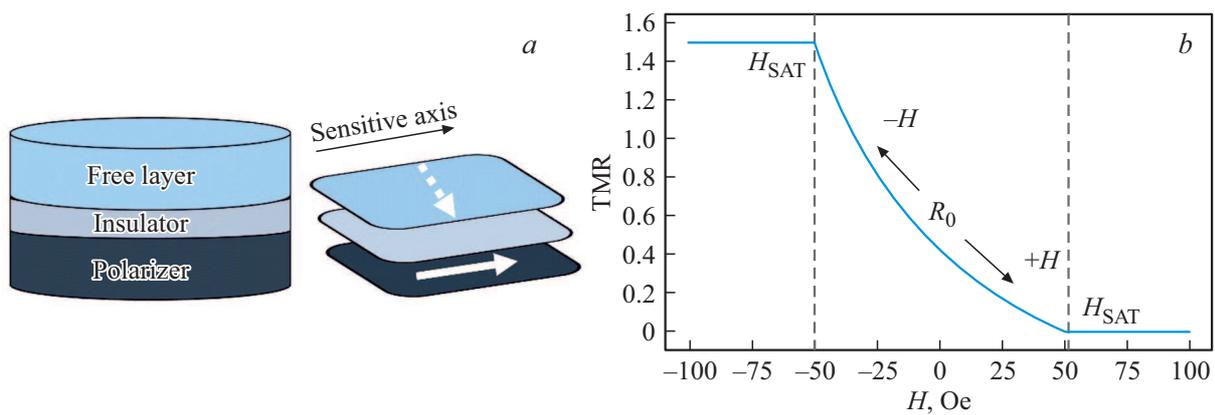
## 2. Чувствительность ТМР-сенсора

ТМР сенсор представляет собой соединение МТП в мостовой схеме Уитстона (рис. 2), намагниченность слоя поляризатора одной пары диагональных элементов моста направлена вдоль оси „+X“, а другой — против „-X“. При изменении величины внешнего магнитного поля сопротивление диагональных элементов изменяется: увеличивается ( $R + \Delta R$ ) или уменьшается ( $R - \Delta R$ ) в зависимости от направления намагниченности слоя поляризатора. Таким образом напряжение на дифференциальном выходе изменяется пропорционально величине внешнего магнитного поля.

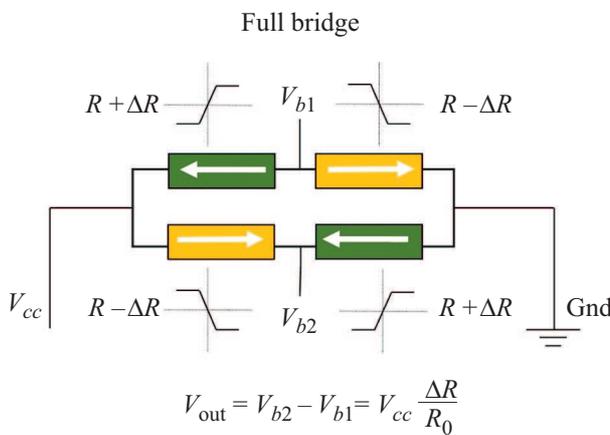
Чувствительность ТМР-сенсора к магнитному полю определяется чувствительностью магнитного туннельного перехода, которая имеет вид

$$S = 100\% \frac{dR}{dH} \frac{1}{R_0} \%/\text{Э}, \quad (1)$$

где  $R_0$  — сопротивление в нулевом внешнем магнитном поле,  $dR/dH$  — нелинейная функция зависимости



**Рис. 1.** *a* — стек магнитного туннельного перехода со свободным слоем, с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора; *b* — кривая магнетосопротивления МТП.



**Рис. 2.** Соединение МТП в мост Уитстона, где диагональные элементы моста имеют одно направление намагниченности поляризатора.

изменения сопротивления МТП от изменения величины внешнего магнитного поля.

Для аналитического исследования влияния внешних параметров на чувствительность МТП необходимо вывести зависимость сопротивления МТП от внешнего магнитного поля  $R(H)$ , для этого запишем энергию системы, действующую на намагниченность свободного слоя (в сферических координатах  $\mathbf{m} = \{\cos(\varphi) \sin(\theta); \sin(\theta) \sin(\varphi); \cos(\theta)\}$ ):

$$E = E_U + E_Z + E_{sh}, \quad (2)$$

где  $E_U$  — энергия кристаллической анизотропии, записанная в сферических координатах  $E_U = -k \sin^2(\varphi) \sin^2(\theta)$ , где  $k$  — константа одноосной анизотропии, а  $\varphi, \theta$  — полярный и азимутальный углы намагниченности, соответственно. В настоящей работе рассматривается плоскостная кристаллическая анизотропия, направленная ортогонально намагниченности слоя поляризатора (рис. 1, *a*). Энергия Зеемана записывается как  $E_Z = -M_s H \cos(\varphi) \sin(\theta)$ , где  $M_s$  —

намагниченность насыщения,  $H$  — величина внешнего магнитного поля. Следует учесть энергию анизотропии формы, которая имеет вид

$$E_{sh} = 4\pi M_s^2 / 2 (N_x \sin^2(\theta) \cos^2(\varphi) + N_y \sin^2(\theta) \sin^2(\varphi) + N_z \cos^2(\theta)),$$

где  $N_k$  — размагничивающие факторы.

Найдем состояние равновесия намагниченности, которое определяется условием

$$\frac{\delta E}{\delta \varphi} = \frac{\delta E}{\delta \theta} = 0. \quad (3)$$

Подставив вариационную производную энергии (2) в (3), было получено, что азимутальный угол  $\theta = \pi/2$ , а  $\cos(\varphi) = H/H_{SAT}$ , где  $H_{SAT}$  — поле насыщения, равное  $H_{SAT} = -4\pi M_s (N_y - N_x) + 2k/M_s$ . Устойчивость решений можно проверить с помощью определителя вторых производных матрицы Гессе, который дает достаточное условие минимума энергии.

Запишем проводимость МТП:

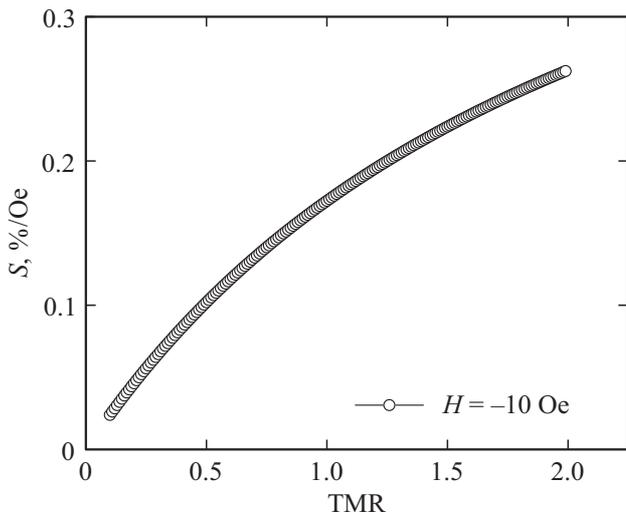
$$\frac{1}{R} = G = \frac{G_{AP} + G_P}{2} + \frac{G_P + G_{AP}}{2} \frac{H}{H_{sat}}, \quad (4)$$

где  $G_P (G_{AP})$  — проводимость МТП, когда намагниченность свободного слоя относительно намагниченности слоя поляризатора находится в параллельном (антипараллельном) состоянии.

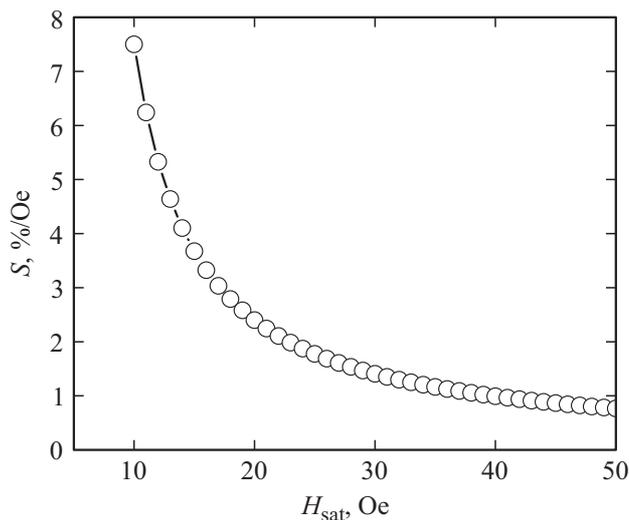
Исходя из (4), проведем дифференцирование сопротивления по внешнему магнитному полю  $dR/dH$ , тогда чувствительность МТП:

$$S = - \frac{TMR(TMR + 2)H_{sat}}{(H_{sat}(2 + TMR) + H \cdot TMR)^2} 100\%. \quad (5)$$

Таким образом чувствительность МТП определяется анизотропией формы, константой одноосной анизотропии и величиной туннельного магнетосопротивления. С увеличением туннельного магнетосопротивления



**Рис. 3.** Зависимость чувствительности МТП от его туннельного магнетосопротивления при поле насыщения  $H_{sat} = 200$  Oe и внешнем магнитном поле  $H = -10$  Oe.



**Рис. 4.** Зависимость чувствительности МТП от величины поля насыщения при туннельном магнетосопротивлении 1.5 и величине внешнего магнитного поля  $H = -10$  Oe.

наблюдается рост чувствительности МТП к внешнему магнитному полю (рис. 3), в то время как при увеличении поля насыщения чувствительность МТП снижается (рис. 4). Следует отметить, что диапазон работы сенсора  $\pm H$  должен быть меньше поля насыщения  $H \ll H_{sat}$ , поскольку кривая магнетосопротивления (рис. 1, b) становится более нелинейной ближе к АП-и П-состоянию намагниченности. Для того чтобы найти оптимальную комбинацию параметров: поля насыщения и туннельного магнетосопротивления, необходимо учитывать линейности кривой магнетосопротивления в заданном диапазоне полей  $\pm H$ , которая должна составлять менее 1% для разработки ТМР-сенсора.

Поскольку поле насыщения включает в себя разность поля кристаллической анизотропии и поля анизотропии формы, которые взаимно компенсируемы, то при разработке сенсора следует учесть, что в технологическом процессе поле кристаллической анизотропии является постоянным и для того, чтобы уменьшить (увеличить) поле насыщения МТП согласно требованиям заказчика, необходимо контролировать форму МТП, то есть изготавливать образец более вытянутым (округлым).

### 3. Коэффициент передачи ТМР-сенсора

Основной электрической характеристикой сенсора является коэффициент передачи  $K_{tr}$ , который обуславливает меру преобразования величины магнитного поля в электрический сигнал в линейном диапазоне  $[-H; +H]$  работы

$$K_{tr} = \frac{V_{out}(H) - V_{out}(-H)}{2HV_{cc}} 1000, \text{ mV/V/Oe}, \quad (6)$$

где  $V_{out}$  — напряжение на дифференциальном выходе моста Уитстона, которое записывается как  $V_{out} = V_{cc} \frac{\Delta R}{R_0}$ ,  $V_{cc}$  — напряжение питания. Как правило коэффициент передачи вычисляется при  $V_{cc} = 1$  V и имеет вид

$$K_{tr} = 1000 \frac{TMR(TMR + 2)H_{sat}}{(H \cdot TMR)^2 - (H_{sat}(2 + TMR))^2}, \text{ mV/V/Oe}. \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент передачи ТМР сенсора на основе МТП со свободным слоем с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора, зависит от поля насыщения и туннельного магнетосопротивления структуры. Увеличение величины поля насыщения приводит к уменьшению коэффициента передачи. Следует отметить, что ни чувствительность, ни коэффициент передачи сенсора не зависят от количества МТП в чувствительном элементе сенсора.

### 4. Заключение

Для магнитного туннельного перехода со свободным слоем с плоскостной кристаллической анизотропией, направленной ортогонально намагниченности слоя поляризатора, было проведено аналитическое исследование влияния таких параметров как константа одноосной анизотропии, форма и туннельное магнетосопротивление МТП на чувствительность и передаточную характеристику сенсора. В результате исследования было получено, что в мостовой схеме Уинстона чувствительность и коэффициент передачи ТМР-сенсора не зависят от количества МТП в массиве чувствительного элемента. Из этого следует, что сенсор в мостовом включении занимает меньшую площадь на пластине, что снижает его стоимость. При разработке ТМР-сенсора следует

учитывать, что чувствительность и коэффициент передачи сенсора повышается, когда туннельное магнетосопротивление максимально и поле насыщения минимально, то есть равно рабочему диапазону сенсора, однако выходная характеристика сенсора в данном случае является нелинейной. Для нахождения оптимальной комбинации параметров: наименьшего поля насыщения и наибольшего туннельного магнетосопротивления, необходимо, чтобы линейности кривой магнетосопротивления в рабочем диапазоне полей составляла менее 1%. Следует отметить, что при технологическом процессе константа одноосной анизотропии постоянна, поэтому контролировать величину поля насыщения возможно формой МТП, то есть изготавливая образец более вытянутым или округлым.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075–11-2022-046).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M.J. Caruso, L.S. Withanawasam. *Sensors Expo Proc.* **477**, 39 (1999).
- [2] P. Ripka, M. Janosek. *IEEE Sensors J.* **10**, 6, 1108 (2010).
- [3] C. Reig, S. Cardoso, S.C. Smart. *Sensors, Meas. Instrum.* **6**, 1, 1 (2013).
- [4] M.D. Cubells-Beltrán, C. Reig, J. Madrenas, A. de Marcellis, J. Santos, S. Cardoso, P. Freitas. *Sensors* **16**, 6, 939 (2016).
- [5] C. Ye, Y. Wang, Y. Tao. *IEEE Transact. Instrum. Meas.* **68**, 7, 2594 (2018).
- [6] A.V. Silva, D.C. Leitao, J. Valadeiro, J. Amaral, P. Freitas, S. Cardoso. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **72**, 1, 10601 (2015).
- [7] D.W. Guo, F.A. Cardoso, R. Ferreira, E. Paz, S. Cardoso, P.P. Freitas. *J. Appl. Phys.* **115**, 17 (2014).
- [8] S.S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P.M. Rice, B. Hughes, M. Samant. *Nature Mater.* **3**, 12, 862 (2004).
- [9] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki. *Nature Mater.* **3**, 12, 868 (2004).
- [10] J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong. *Phys. Rev. Lett.* **74**, 16, 3273 (1995).

Редактор Т.Н. Василевская