

05,04

# Влияние взаимного направления поляризатора и свободного слоя на автогенерацию магнитных туннельных переходов (МТП) разной геометрии

© В.Р. Киктева<sup>1,2</sup>, К.В. Киселева<sup>1,3</sup>, Г.А. Кичин<sup>1,4</sup>, П.Н. Скирдков<sup>1,4,5</sup>, К.А. Звездин<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup> ООО „Новые спинтронные технологии“, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>3</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский институт физики и технологии, Москва, Россия

<sup>5</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: kiktevavera@mail.ru

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Исследовался режим автогенерации структур на основе магнитного туннельного перехода. В ходе эксперимента изучалось, как различные значения и ориентация магнитного поля влияют на эффективность режима автогенерации для образцов различной формы. Режим автогенерации в образцах наблюдался вблизи перехода из одного состояния намагниченности свободного слоя в другое. Было получено, что максимальной величиной спектральной плотности мощности и ее положением относительно частотной оси можно управлять за счет изменения величины и ориентации внешнего магнитного поля.

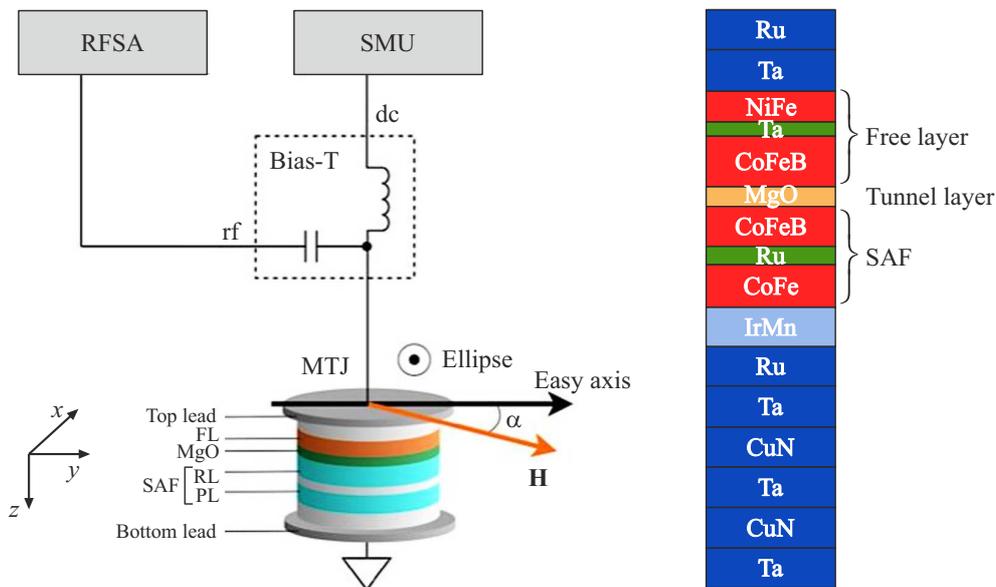
**Ключевые слова:** магнитный туннельный переход (МТП), автогенерация, спектральная плотность мощности, наносциллятор.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55646.03H

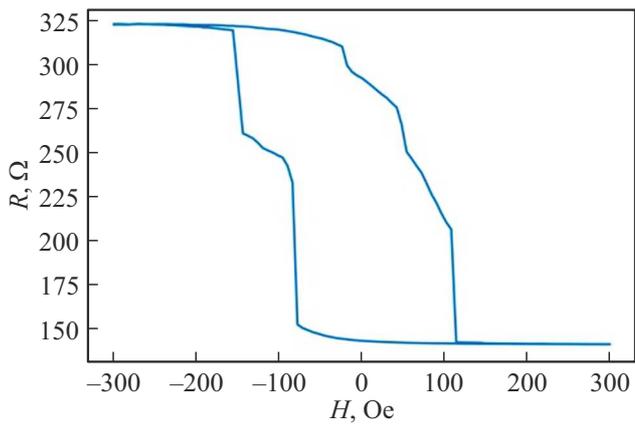
## 1. Введение

Спин-трансферные наносцилляторы на основе магнитных туннельных переходов (МТП) являются одним из наиболее перспективных направлений развития на-

ноэлектроники и нанофотоники. Эти устройства представляют собой наносистемы, способные генерировать высокочастотные электромагнитные волны в диапазоне от нескольких гигагерц до терагерц, при этом потребляя минимальное количество энергии. Режим автогенерации



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки и структура МТП с помощью источника измерителя (SMU) через образец пропускался ток. Характерное значение тока варьировалось от  $-2$  до  $+1$  мА.



**Рис. 2.** График магнетосопротивления образца размером  $250 \times 300$  nm.

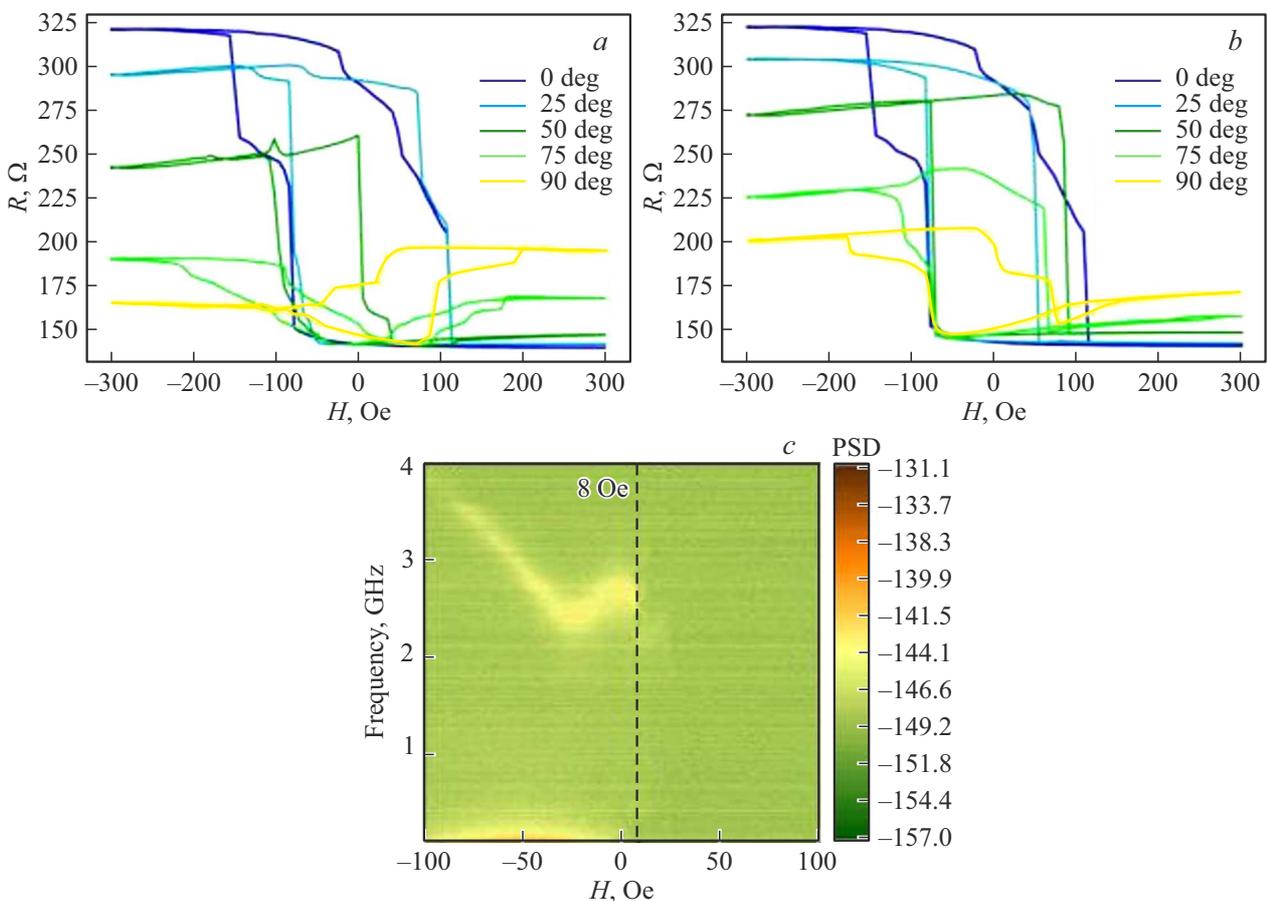
делает спин-трансферные наноосцилляторы потенциально полезными для создания высокочастотных генераторов с низким энергопотреблением. Такие устройства могут использоваться в различных областях, включая беспроводную связь, радиолокацию, микроволновую электронику и многие другие.

Изучение спин-трансферных наноосцилляторов и их свойств является активной областью исследований в научной и инженерной сферах [1–3], так как эти устройства обладают многими потенциальными применениями и могут стать ключевым элементом будущих электронных устройств [4–5]. Также известно, что спин-трансферные осцилляторы могут применяться в качестве истинного генератора случайных чисел в силу возможности стохастических переключений намагниченности свободного слоя [6].

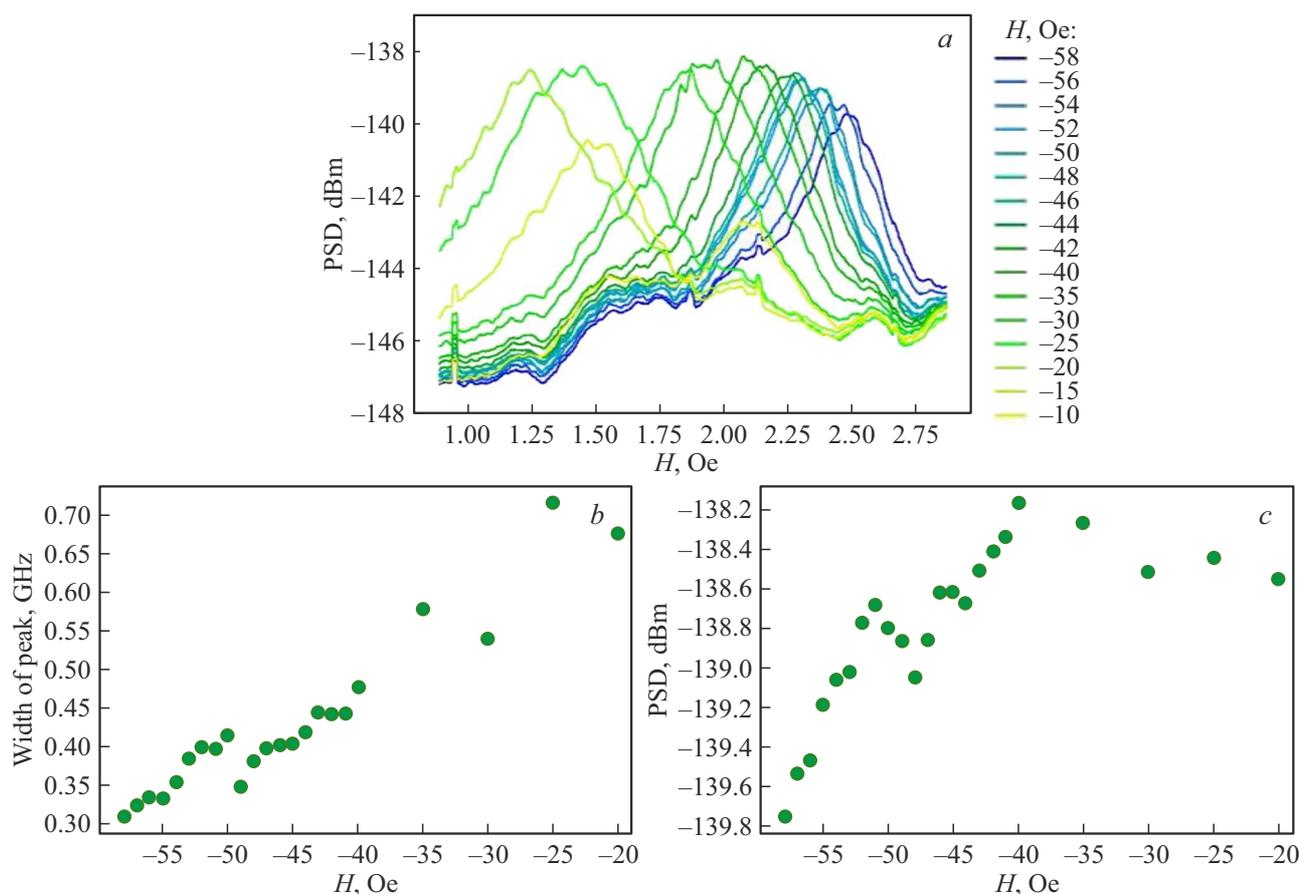
В работе мы изучали, как режим автогенерации зависит от ориентации и величины внешнего магнитного поля. Наноосцилляторы изучались в образцах различной геометрии и структуры слоев при различных условиях.

## 2. Описание эксперимента

В статье изучается зависимость влияния геометрии образца, взаимного направления поля магнита, поляризатора и свободного слоя на режим автогенерации. Исследовались образцы, состоящие из следующих слоев: IrMn (6)/CoFe30 (2.6)/Ru (0.7)/CoFe40B20 (1.8)/MgO/CoFe40B20 (2.0)/Ta (0.21)/NiFe (3) (рис. 1). Структура CoFe/Ru/CoFeB представляет собой антиферромагнит-



**Рис. 3.** *a), b)* График типичного экспериментального поведения кривой магнетосопротивления эллиптических образцов. *c)* График зависимости спектральной плотности мощности (PSD) от частоты и внешнего поля при  $25^\circ$  поворота относительно SAF.



**Рис. 4.** *a)* Зависимость значения PSD от частоты, на которой наблюдался пик генерации при фиксированном значении магнитного поля ( $25^\circ$ ). *b)* График зависимости ширины пика генерации от значений поля. *c)* График зависимости значения PSD от значений поля.

но связанные три слоя: (SAF) выступает в качестве и референсного (RL) и закрепленного слоев (PL) [7]. MgO выступает туннельным барьером и верхний слой CoFeB является свободным слоем (FL), в котором прецессия намагниченности может возбуждаться спин-поляризованным током (spin transfer torque STT [8]). В данной работе измерения проводились на образцах размеров  $100 \times 300$  nm,  $200 \times 300$  nm и  $250 \times 300$  nm. Рассматривались образцы эллиптической формы под углами  $0, 15, 30, 90^\circ$  относительно закрепленного слоя. Принципиальная схема установки и структура образца представлены на рис. 1.

Усредненное распределение мощности сигнала по частотам (PSD) регистрировалось спектральным анализатором (RFSA). Сигнал исследовался в диапазоне частот  $f = 100$  MHz–4 GHz. Внешнее магнитное поле создавалось электромагнитом, который можно было вращать. Диапазон по полю составлял  $\pm 300$  Oe.

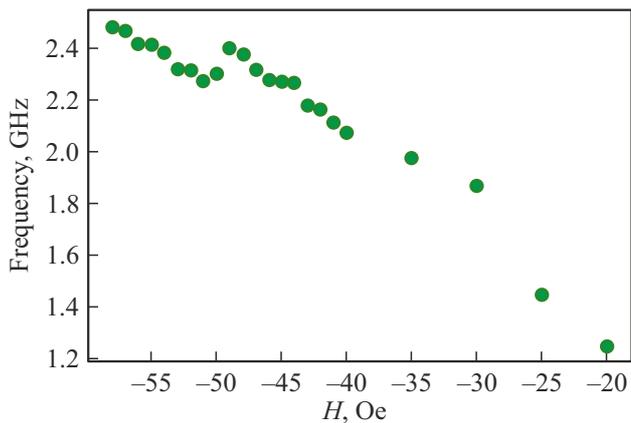
### 3. Обсуждение

Исследуемые образцы имеют сложную структуру намагниченности. Из графика магнетосопротивления

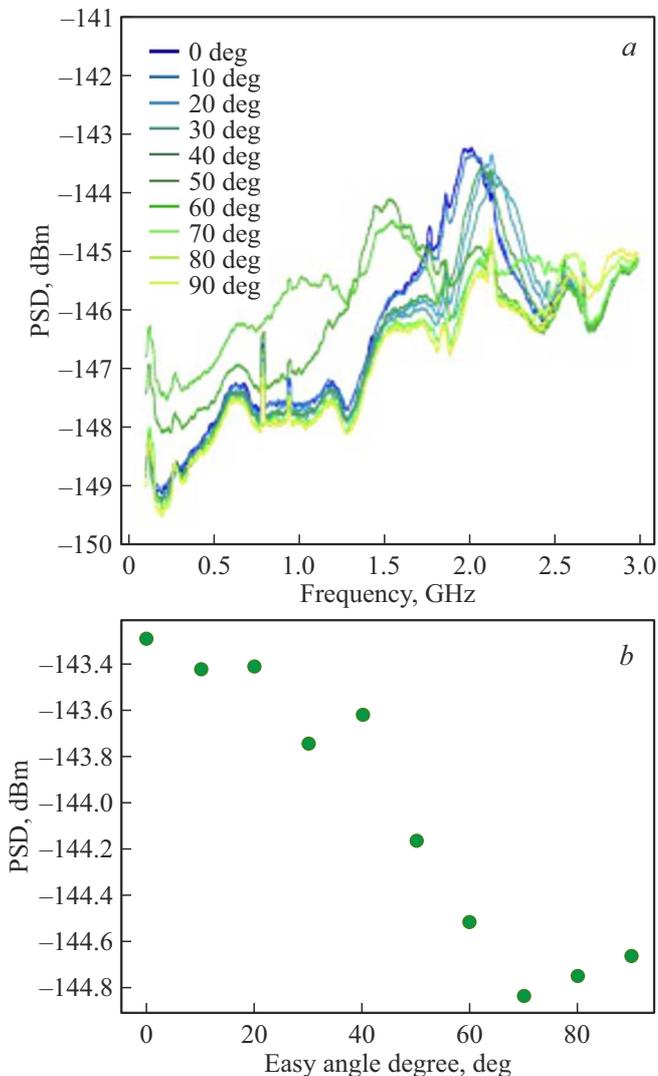
(рис. 2) можно видеть, что помимо антипараллельного и параллельного состояний свободного слоя наблюдаются также дополнительные сложные состояния в диапазоне полей  $H_{\text{ext}} = [0, 120]$  Oe.

Среди исследованных образцов внимание следует уделить образцам, где эллипс направлен под углом  $90^\circ$  относительно SAF, так как на этих образцах режим автогенерации наблюдался в среднем чаще, чем на всех остальных образцах. Среди этих образцов генерация наблюдалась в среднем чаще на образцах с размером  $250 \times 300$  nm, чем на вытянутых образцах размера  $100 \times 300$  nm. Так для эллиптического образца с данной геометрией максимальное значение спектральной плотности мощности наблюдается при ориентации магнитного поля относительно SAF в диапазоне  $[0^\circ, 55^\circ]$ . Максимальное значение генерации наблюдалось при  $25^\circ$  и в диапазоне внешних полей  $H_{\text{ext}} = [-58; -10]$  Oe.

Значение магнетосопротивления в антипараллельном состоянии для углов  $[0^\circ, 20^\circ]$  относительно сравнимы и составляют  $\pm 300$  Ohm, но к  $\sim 50^\circ$  максимальное значение падает до  $\pm 260$  Ohm (рис. 3, *a*). При дальнейшем увеличении угла поворота наблюдается постепенное перемещение образца, которое окончательно



**Рис. 5.** График зависимости частоты, на которой наблюдалось максимальное значение спектральной плотности мощности для разных значений магнитного поля.



**Рис. 6.** *a)* Зависимости PSD режима автогенерации от частоты при фиксированной величине магнитного поля  $-45$  Oe. *b)* Зависимость максимального значения PSD от угла.

происходит при  $90^\circ$  относительно главной оси эллипса. Аналогичная тенденция наблюдается для отрицательных углов поворота поля, за исключением того, что требуется больший угол для перемагничивания (рис. 3, *b*).

На графике зависимости PSD от частоты и внешнего поля (рис. 3, *c*) представлен широкий диапазон полей, где эффект автогенерации явно наблюдается в отрицательных полях и малых положительных полях и для частот выше 2 GHz. Максимальные значения PSD наблюдались при низких частотах. После подачи поля  $H < -10$  Oe значение PSD снизилось до  $-144$  dBm, что совпадает со значениями, найденными при изучении спектров для каждого значения магнитного поля при фиксированной ориентации поля на  $25^\circ$  (рис. 4, *a*).

Из графика на рис. 4 видно, что при увеличении значения магнитного поля пик генерации изменял свою ширину и смещался в сторону больших частот. Максимальное значение автогенерации наблюдалась при значении поля  $-40$  Oe. При последующем уменьшении поля пик автогенерации смещался в сторону низких частот, ширина пика увеличивалась. После значения поля  $-20$  Oe пик генерации пропадает.

В диапазоне полей  $[-50, -48]$  Oe наблюдается скачкообразное изменение ширины пика генерации (рис. 4, *b*), максимального значения PSD (рис. 4, *c*). На графике гистерезиса для  $25^\circ$  (рис. 3, *a*) эта область полей соответствует границе между переходом из одного состояния в другое.

Максимальное значение спектральной плотности мощности наблюдалось на частоте, определяемой формулой Киттеля для ферромагнитного резонанса [9]:

$$f = \gamma \sqrt{\frac{(M(N_z - N_x) + B_0 \cos(\theta_{\text{ext}}))}{(M(N_y - N_x) + B_0 \cos(\theta_{\text{ext}}))}}. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  — это гиромагнитное соотношение,  $M$  — это намагниченность свободного слоя,  $B_0$  — это величина внешнего магнитного поля.  $N_x, N_y, N_z$  — коэффициенты размагничивания, для измеренного эллиптического образца с  $250 \times 300$  nm они равны 0.024, 0.042, 0.934 соответственно [10]. Пик генерации смещался в сторону низких частот при уменьшении значения поля (рис. 5).

При изменении ориентации внешнего магнитного поля и фиксированной величины магнитного поля на  $-45$  Oe режим автогенерации наблюдался в диапазоне частот  $f = [1.8-2.2]$  GHz. Максимальное значение PSD =  $-143.5$  dBm оставалось постоянным при углах ориентации поля меньше  $45^\circ$ , при больших углах пик генерации смещался в сторону низких частот и исчез при  $70^\circ$ . На рис. 6 представлены графики зависимости спектральной плотности мощности для разной ориентации магнитного поля относительно легкой оси.

#### 4. Заключение

В статье был изучен режим автогенерации в эллиптических МТП разной геометрии при различных значениях

и ориентации магнитного поля. Чаще всего генерация наблюдалась на образцах размера  $250 \times 300$  nm, где эллипс повернут под углом  $90^\circ$  относительно SAF. Режим автогенерации наблюдался в момент перехода из одного состояния свободного слоя в другое вне зависимости от ориентации магнитного поля. Обнаружено также, что при линейном распределении магнитосопротивления от поля наблюдаются минимальные значения PSD. Максимальное значение PSD наблюдалось вблизи переключения, после чего пик генерации исчезал. В момент переключения МТП наблюдается скачкообразное изменение пика генерации. При фиксированной ориентации магнитного поля частота генерации уменьшается с уменьшения величины поля. Наиболее выраженный и стабильный эффект автогенерации наблюдался в области отрицательных полей при угле поворота магнита  $25^\circ$  относительно большей оси эллипса. При фиксированном значении магнитного поля пик генерации не изменял свое положение при ориентации магнитного поля меньше  $45^\circ$ . При больших углах пик смещался в сторону низких частот и исчезал вблизи  $90^\circ$ .

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 19–12–00432).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] T. Wada, T. Yamane, T. Seki, T. Nozaki, Y. Suzuki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Machara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D.D. Djayaprawira, N. Watanabe. *Phys. Rev. B* **81**, 104410 (2010).
- [2] S. Bonetti, P. Muduli, F. Mancoff, J. Åkerman. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 102507 (2009).
- [3] M. Tareqzaman, T. Böhnert, M. Decker, J.D. Costa, J. Borme, B. Lacoste, E. Paz, A.S. Jenkins, S. Serrano-Guisan, C.H. Back, R. Ferreira, P.P. Freitas. *Phys. Commun.* **2**, 20 (2019).
- [4] S. Ning, H. Liu, J. Wu, F. Luo. *Fund. Res.* **2**, 535 (2022).
- [5] A. Helmer, S. Cornelissen, T. Devolder, J.-V. Kim, W. van Roy, L. Lagae, C. Chappert. *Phys. Rev. B* **81**, 094416 (2010).
- [6] D. Vodenicarevic, N. Locatelli, A. Mizrahi, J.S. Friedman, A.F. Vincent, M. Romera, A. Fukushima, K. Yakushiji, H. Kubota, S. Yuasa, S. Tiwari, J. Grollier, D. Querlioz. *Phys. Rev. Appl.* **8**, 054045 (2017).
- [7] P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin. *Ann. Phys.* **532**, 6, 12 (2020).
- [8] M.D. Stiles, A. Zangwill. *Phys. Rev. B* **66**, 014407 (2002).
- [9] C. Kittel. *J. Phys. Rad.* **12**, 3, 291 (1951).
- [10] O. Kohmoto. *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 6875 (2003).

Редактор Т.Н. Василевская