

07

Функциональный преобразователь сигналов на основе композитного мультиферроика

© Л.М. Крутянский, В.Л. Преображенский

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
E-mail: leonid.krut@kapella.gpi.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 10 мая 2023 г.

Принято к публикации 2 июня 2023 г.

С помощью численного и аналитического моделирования исследованы нелинейные передаточные характеристики преобразователя напряжения, реализуемые в стрейнтронной композитной структуре пьезоэлектрик–магнетик в области спиновой переориентации. Показано, что в критической точке спиновой переориентации передаточная характеристика имеет вид обращенной сигмоиды. С ослаблением намагничивающего поля характеристика трансформируется в обратимую гистерезисную петлю. При импульсном воздействии реализуется пороговый эффект генерации импульса обратной полярности с последующим восстановлением исходного состояния системы. Под действием последовательности коротких импульсов, критической по времени воздействия, происходит переключение системы между бистабильными спиновыми состояниями со сменой полярности выходного напряжения. Качественно различные функции нелинейного преобразования напряжения реализуются в одной структуре за счет управления напряженностью намагничивающего поля и параметрами входных сигналов.

Ключевые слова: структура пьезоэлектрик–магнетик, передаточная характеристика, нелинейность, пороговые переключения.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55862.19594

Функциональные преобразователи сигналов являются элементами аналоговых вычислительных систем, систем программного управления, автоматического и экстремального регулирования. В последние годы интерес к нелинейным функциональным преобразованиям значительно возрос в связи с развитием аналоговых нейроморфных сетей. Типичные нейроморфные элементы объединяют функции взвешенного суммирования входных сигналов и нелинейного преобразования суммарного сигнала [1]. Нелинейное преобразование может включать в себя функцию порогового элемента, вырабатывающего сигнал реакции на превышение заданных параметров воздействия. Для реализации нейроподобных преобразований сигналов с помощью электронных компонентов используются различные физические принципы и технологии, представленные, в частности, в обзоре [2]. В ряде случаев к проблеме нейроморфных сетей адаптируются подходы, ранее разработанные применительно к системам памяти с произвольным доступом (RAM) [3–6]. Один из перспективных физических принципов реализации RAM, отличающийся ультранизким энергопотреблением, основан на магнитоэлектрическом взаимодействии в твердотельных структурах. Значительный прогресс в последние годы достигнут в области создания композитных стрейнтронных магнитоэлектрических структур пьезоэлектрик–магнетик, магнитоэлектрическая связь в которых возникает за счет совместного деформирования пьезоэлектрических и магнитострикционных компонентов [7–9]. Наиболее эффективно магнитоэлектрическое взаимодействие ре-

ализуется в условиях спин-переориентационных (СП) переходов в магнитной системе [10–12]. Предпосылкой к рассмотрению стрейнтронной структуры в качестве функционального преобразователя сигналов служит предложенная и детально проработанная схема полностью магнитоэлектрической записи и считывания информации [9,13]. Если системы памяти не предъявляют специальных требований к функциональной связи сигналов записи и считывания, то для преобразователей сигналов передаточная функция является основной характеристикой.

В настоящей работе исследуются передаточные функции композитной структуры пьезоэлектрик–магнетик–диэлектрик, магнитная подсистема которой претерпевает СП-переход. Схема структуры приведена на рис. 1, а. В качестве пьезоэлектрика рассматривается кристалл $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$ (PMN–PT) среза $\langle 011 \rangle$ размером $4 \times 4 \times 0.3$ mm по направлениям x , y , z соответственно, анизотропно деформируемый в плоскости xu при приложении нормального электрического поля. В качестве материала магнитных слоев рассматривается интерметаллическая гетероструктура $\text{TbCo}_2/\text{FeCo}$ толщиной 150 nm с наведенной в процессе изготовления одноосной магнитной анизотропией по технологии [8]. Спиновая система редкоземельного соединения TbCo_2 обеспечивает гигантскую магнитострикцию $\lambda_S \approx 10^{-4}$. Обменная связь между слоями TbCo_2 и FeCo формирует общее ферромагнитное упорядочение структуры. Приложение магнитного поля в плоскости структуры перпендикулярно оси легкого намагничивания (EA)

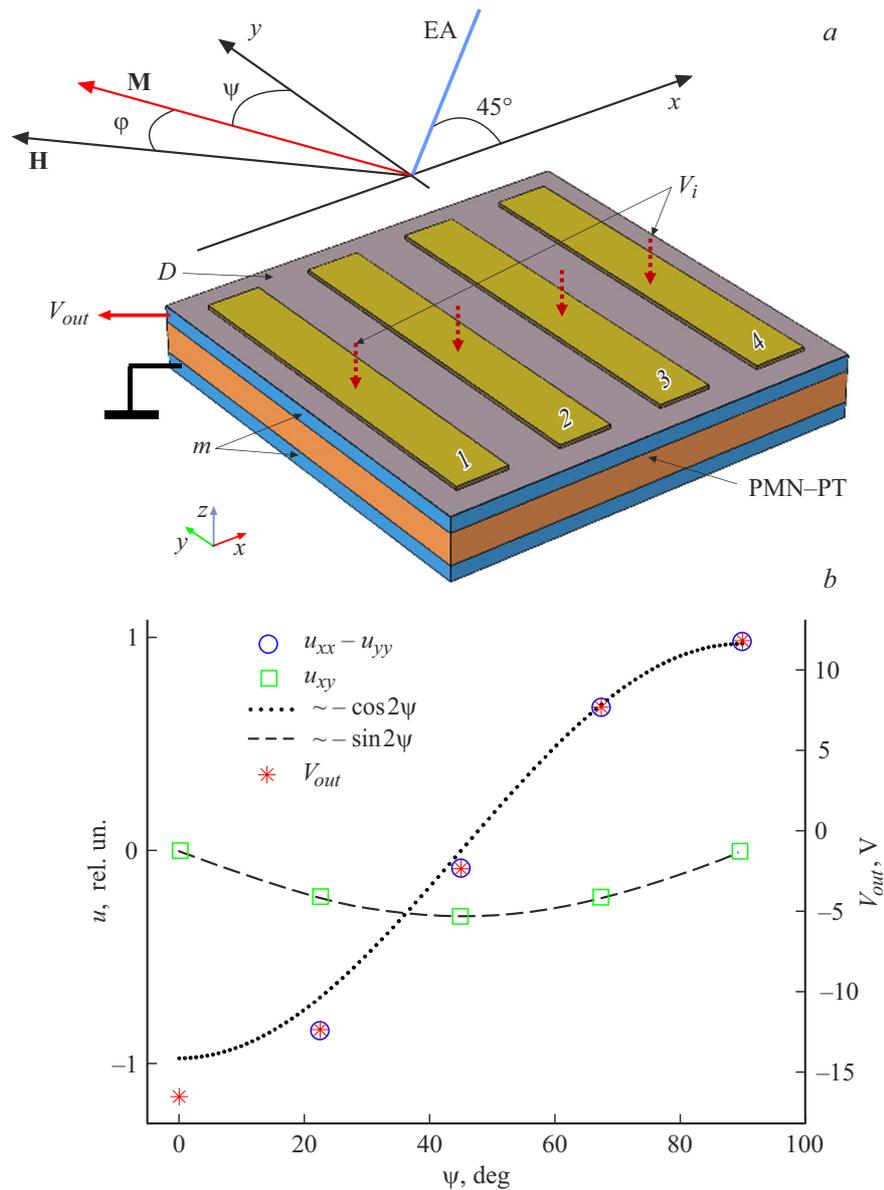


Рис. 1. *a* — схема композитной структуры. PMN–PT — слой пьезоэлектрика, *m* — магнитострикционные слои, *D* — слой диэлектрика, 1–4 — входные электроды, V_i — потенциалы на входных электродах, V_{out} — напряжение на выходе. Векторная диаграмма указывает направления оси легкого намагничивания (EA), магнитного момента \mathbf{M} и намагничивающего поля \mathbf{H} . *b* — результаты расчета зависимости деформаций и выходного напряжения на пьезоэлектрике от угла ориентации.

обеспечивает условия СП-перехода. Наряду с функцией нелинейного преобразования сигналов магнитные слои играют роль электродов для регистрации выходного напряжения V_{out} . Слой диэлектрика толщиной $5\mu\text{m}$ обеспечивает развязку напряжений по входу и взвешенное суммирование входных сигналов для многоэлектродной схемы возбуждения, имитирующей функции дендритов в нейроморфных элементах. В этом случае верхний магнитный электрод имитирует функцию аксона. В качестве параметров диэлектрика приняты параметры TiO_2 . Равенство по величине суммарного заряда на входных электродах обратному по знаку заряду на верхней обкладке пьезоэлектрика определяет

входное напряжение как сумму: $V_{in} = \sum_i V_i c_i / \sum_i c_i$, где V_i — напряжение на электроде с номером i , а c_i — парциальная емкость между электродом и верхней обкладкой.

Нелинейные передаточные характеристики, связывающие напряжение на выходе структуры с напряжением на входе, формируются в результате упругого взаимодействия магнитной и пьезоэлектрической подсистем. В приближении изотропной магнитоэластики, характеризуемой константой B , магнитоупругая энергия определяется соотношением

$$F_{me} = -B \sin 2\varphi (u_{xx} - u_{yy}) - 2B \cos 2\varphi u_{xy}, \quad (1)$$

где u_{ij} — компоненты тензора деформаций, φ — угол отклонения намагниченности от магнитного поля, показанный на рис. 1, *a*. Магнитная система слоев с эффективным полем одноосной магнитной анизотропии H_A описывается уравнением состояния

$$\frac{H}{H_A} \sin \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi - \frac{2B}{MH_A} \times \left[(u_{xx} - u_{yy}) \cos 2\varphi - 2u_{xy} \sin 2\varphi \right] = 0. \quad (2)$$

Пьезоэлектрическая часть плотности энергии кристалла PMN–PT среза $\langle 011 \rangle$ в нормально ориентированном электрическом поле \mathbf{E} имеет вид

$$F_p = -E_3(e_{31}u_{xx} + e_{32}u_{yy} + e_{33}u_{zz}), \quad (3)$$

где e_{ij} — пьезоэлектрические модули. Отметим, что модули e_{31} и e_{32} в PMN–PT имеют противоположный знак, что обеспечивает анизотропию пьезодеформаций в плоскости, необходимую для связи пьезоэлектрической и магнитной подсистем.

Линейность уравнений упругости позволяет независимо рассчитать вклад в деформации от пьезоэффекта и магнитострикции. На рис. 1, *b* приведены результаты расчета зависимости деформаций, усредненных по магнитному объему, от направления намагниченности. Моделирование выполнено с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Параметры материалов заимствованы из работ [14–17]. Функция суммирования входных сигналов была продемонстрирована посредством расчета значений выходного напряжения (5.15, 10.33, 15.52 и 20.67 V) при приложении напряжения 25 V к входным электродам от одного до четырех соответственно.

С учетом вклада от напряжения на пьезоэлектрике V_{out} для деформаций получены соотношения

$$\begin{aligned} \langle u_{xx} - u_{yy} \rangle - g_p V_{out} + g_m^{(1)} \sin 2\varphi, \\ \langle u_{xy} \rangle = g_m^{(2)} \cos 2\varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$g_p = -0.07 \cdot 10^{-5} \text{ V}^{-1}, \quad g_m^{(1)} = -10^{-4}, \quad g_m^{(2)} = -3.1 \cdot 10^{-5}.$$

Напряжение V_{out} , создаваемое входным сигналом V_{in} и магнитострикцией, получено в виде

$$V_{out} = g_V V_{in} + g_m^{(3)} \sin 2\varphi + V_Q, \quad (5)$$

где $g_m^{(3)} = -14 \text{ V}$, $g_V = 0.78$.

Численные коэффициенты в равенствах (4) и (5) определены из расчетных данных, приведенных на рис. 1, *b*. Величина V_Q представляет собой отношение переменного заряда на верхней обкладке пьезоэлектрика к суммарной емкости пьезоэлектрика и диэлектрика. Заряд обусловлен конечным сопротивлением утечки в диэлектрике и пьезослое. Учет сопротивлений утечки

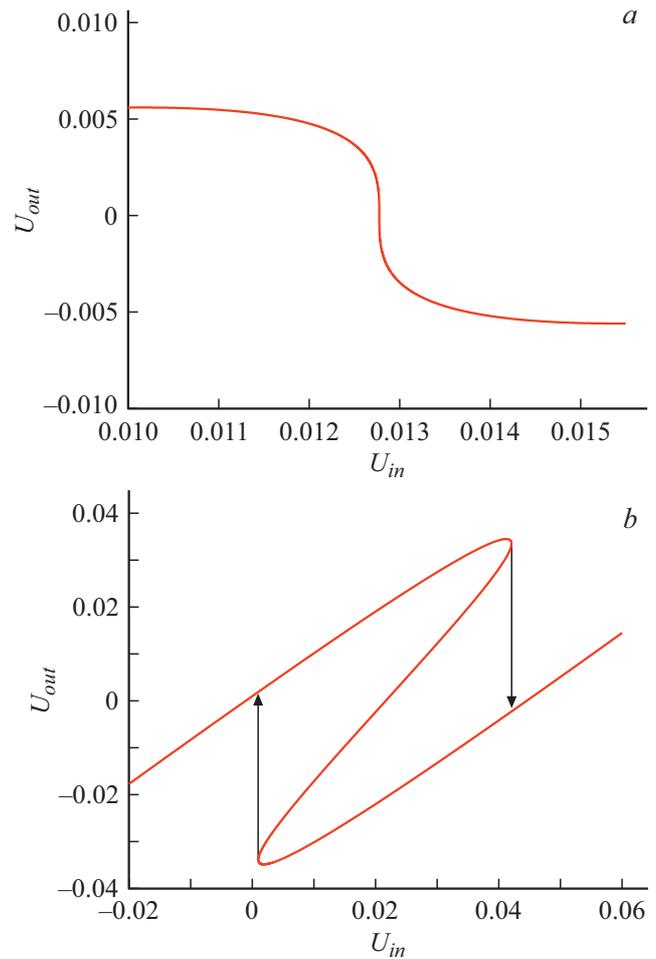


Рис. 2. Передаточные функции структуры при двух значениях намагничивающего поля и соответствующих равновесных углах ориентации магнитного момента. *a* — $H = 1.18 H_A$, $\varphi_0 = -0.22$; *b* — $H = 1.05 H_A$, $\varphi_0 = -0.43$. Стрелками указаны направления переключения выходного напряжения.

необходим для определения равновесного состояния магнитной системы в отсутствие входного сигнала. Уравнение релаксации заряда имеет вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} (P - \kappa \sin 2\varphi) - U_{in} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_1} \right), \quad (6)$$

где безразмерные переменные $P = 2V_Q g_p B / MH_A$, $U_{in} = 2V_{in} g_p g_V B / MH_A$, $\kappa = -2g_p g_m^{(3)} B / MH_A$, τ и τ_1 — времена релаксации заряда в пьезо- и диэлектрическом слоях соответственно. Далее в расчетах использовано отношение $2B / MH_A = -3 \cdot 10^3$. В тех же переменных $U_{out} = 2V_{out} g_p B / MH_A$, а уравнение (2) преобразуется к виду

$$\frac{H}{H_A} \sin \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi = [P + U_{in} - (\kappa + \eta) \sin 2\varphi] \cos 2\varphi, \quad (7)$$

где $\eta = -(g_m^{(1)} - 2g_m^{(2)}) 2B / MH_A$.

Результаты совместного решения системы (5)–(7) приведены на рис. 2, 3. В дальнейшем анализе реше-

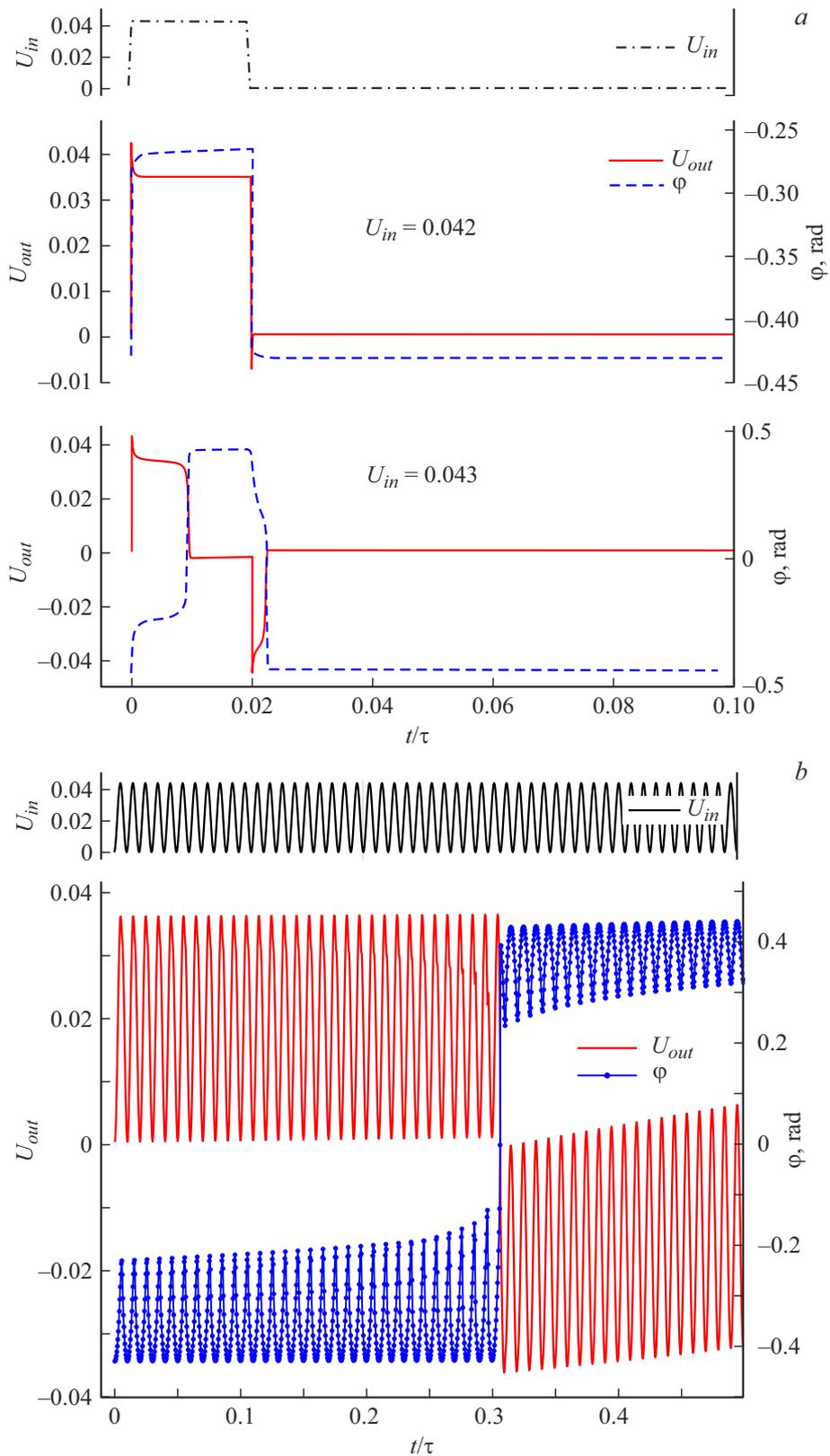


Рис. 3. Импульсные передаточные характеристики структуры и зависимости угла ориентации намагниченности от времени при $H = 1.05 H_A$, $\varphi_0 = -0.43$. *a* — входные импульсы малой длительности по сравнению со временем релаксации заряда (верхняя диаграмма), подпороговый режим $U_{in} < 0.043$ (диаграмма в центре), запороговый скачок напряжения отрицательной полярности, обусловленный движением намагниченности в условиях бистабильности при $U_{in} = 0.043$ (нижняя диаграмма). *b* — входной сигнал в виде последовательности коротких импульсов (верхняя диаграмма), пороговое по времени переключение направления намагниченности и полярности выходного напряжения (нижняя диаграмма).

ний под входным и выходным напряжениями понимаются безразмерные величины U_{in} и U_{out} . Без учета магнитострикции критическая напряженность поля для СП-перехода равна $H_c = H_A$. Устойчивому равновесию в отсутствие входного сигнала, согласно уравнению (6), соответствует равенство $P_0 = \kappa \sin 2\varphi_0$, связывающее заряд на верхней обкладке пьезоэлектрика с направлением намагниченности. При этом вследствие спонтанных магнитострикционных деформаций в структуре при $\varphi_0 = 0$ и $\eta \neq 0$ критическое поле СП-перехода возрастает до $H_c = 1.24 H_A$. В критической точке восприимчивость спиновой системы по отношению к напряжению на пьезоэлектрике U_{out} аномально возрастает, что характерно для фазовых переходов второго рода. Однако по отношению к входному сигналу U_{in} , изменяющемуся достаточно быстро по сравнению со скоростью релаксации заряда, спиновая система сохраняет устойчивость, а передаточная функция становится кубической.

Неустойчивость с аномальным ростом восприимчивости смещается в область более слабых полей $H = 1.18 H_A$, а равновесная намагниченность отклоняется от намагничивающего поля на угол $\varphi_0 = -0.22$. Передаточная функция приобретает вид обращенной сигмоиды, представленной на рис. 2, а. Дальнейшее уменьшение намагничивающего поля приводит к формированию гистерезисной передаточной характеристики, приведенной на рис. 2, б для $H = 1.05 H_A$ ($\varphi_0 = -0.43$). Возрастание входного сигнала до порогового уровня $U_{in} = 0.04 H_A$ приводит к отрицательному скачку выходного напряжения. Выключение входного сигнала переводит систему в равновесное состояние.

В случае импульсных входных сигналов с характерными временами, малыми по сравнению с временами релаксации заряда, представленном на рис. 3, а, выходное напряжение монотонно нарастает с ростом входного и имеет близкую к нему величину (средний график). По окончании входного импульса система возвращается в исходное состояние. При превышении порогового значения входного напряжения $U_{in} > 0.04$ формируется скачок выходного сигнала отрицательной полярности, после которого система также восстанавливает исходное состояние (нижний график на рис. 3, а).

При возбуждении последовательностью коротких импульсов, аппроксимированной периодической функцией, система демонстрирует эффект накопления и порогового переключения на временах, сравнимых с временами релаксации заряда (рис. 3, б). В этом случае спиновая система необратимо переходит из одного бистабильного состояния в другое. Обратный переход достигается сменой полярности входных импульсов.

Приведенные результаты демонстрируют широкие функциональные возможности нелинейного преобразования сигналов с помощью стрейнтронного мультиферроика, изменение передаточной функции в котором реализуется за счет управления намагничивающим полем без изменения конструктива устройства.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ № 075-15-2022-1131.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O. Deperlioglu, U. Kose, *Comput. Electr. Eng.*, **37**, 392 (2011). DOI: 10.1016/j.compeleceng.2011.03.010
- [2] Z. Li, X. Geng, J. Wang, F. Zhuge, *Front. Neurosci.*, **15**, 717947 (2021). DOI: 10.3389/fnins.2021.717947
- [3] A. Mehonic, A.J. Kenyon, *Front. Neurosci.*, **10**, 57 (2016). DOI: 10.3389/fnins.2016.00057
- [4] J. Woo, D. Lee, Y. Koo, H. Hwang, *Microelectron. Eng.*, **182**, 42 (2017). DOI: 10.1016/j.mee.2017.09.001
- [5] K. Kondo, J.Y. Choi, J.U. Baek, H.S. Jun, S. Jung, T.H. Shim, J.G. Park, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 504002 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aad592
- [6] D.W. Kim, W.S. Yi, J.Y. Choi, K. Ashiba, J.U. Baek, H.S. Jun, J.J. Kim, J.G. Park, *Front. Neurosci.*, **14**, 309 (2020). DOI: 10.3389/fnins.2020.00309
- [7] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов, *УФН*, **188** (12), 1288 (2018). DOI: 10.3367/UFN.2018.01.038279 [A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Yu.K. Fetisov, *Phys. Usp.*, **61**, 1175 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279].
- [8] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, S. Giordano, V. Preobrazhensky, P. Pernod, *J. Appl. Phys.*, **113**, 17C719 (2013). DOI: 10.1063/1.4795440
- [9] A. Klimov, N. Tiercelin, Y. Dusch, S. Giordano, T. Mathurin, P. Pernod, V. Preobrazhensky, A. Churbanov, S. Nikitov, *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 222401 (2017). DOI: 10.1063/1.4983717
- [10] А.А. Климов, Н. Тирселлин, В.Л. Преображенский, А.С. Сигов, Ф. Перно, *Изв. РАН. Сер. физ.*, **83** (7), 973 (2019). DOI: 10.1134/S0367676519070202 [A.A. Klimov, N. Tiercelin, V.L. Preobrazhensky, A.S. Sigov, P. Pernod, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **83**, 888 (2019). DOI: 10.3103/S1062873819070207].
- [11] N. Tiercelin, V. Preobrazhensky, P. Pernod, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 062904 (2008). DOI: 10.1063/1.2841656
- [12] N. Tiercelin, Y. Dusch, S. Giordano, A. Klimov, V. Preobrazhensky, P. Pernod, in *Nanomagnetic and spintronic devices for energy-efficient memory and computing*, ed. by J. Atulashimha, S. Bandyopadhyay (John Wiley & Sons, Ltd., 2016), ch. 8. DOI: 10.1002/9781118869239.ch8
- [13] В.Л. Преображенский, Л.М. Крутянский, N. Tiercelin, P. Pernod, *Письма в ЖТФ*, **46** (1), 43 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48864.18056 [V.L. Preobrazhensky, L.M. Krutyansky, N. Tiercelin, P. Pernod, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 38 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020010113].

- [14] F. Wang, L. Luo, D. Zhou, X. Zhao, H. Luo, Appl. Phys. Lett., **90**, 212903 (2007). DOI: 10.1063/1.2743393
- [15] A. Mazzamurro, Y. Dusch, P. Pernod, O. Bou Matar, A. Addad, A. Talbi, N. Tiercelin, Phys. Rev. Appl., **13**, 044001 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044001
- [16] X. Liu, J. Fu, Optik, **206**, 164342 (2020). DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164342
- [17] M. Takeuchi, T. Itoh, H. Nagasaka, Thin Solid Films, **51**, 83 (1978). DOI: 10.1016/0040-6090(78)90215-8