

07

## Функциональное преобразование случайных сигналов в композитной магнитоэлектрической ячейке

© 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 13 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 11 марта 2025 г.

Принято к публикации 17 марта 2025 г.

Представлены результаты расчета переходных характеристик композитной магнитоэлектрической ячейки при воздействии случайных последовательностей импульсных сигналов. Комбинированным численно-аналитическим методом определены пороговые условия генерации одиночных spike-импульсов и случайных импульсных последовательностей фиксированной амплитуды. При этом вероятность переключения состояний магнитной подсистемы управляется намагничивающим полем. Продемонстрированы эффекты накопления и порогового изменения состояния типа Integrate-and-fire с переключением поляризации для униполярных и биполярных случайных последовательностей входных сигналов. Показано, что в случае биполярных входных сигналов реализуется стационарный режим генерации стохастической последовательности spike-импульсов со случайной задержкой магнитной подсистемы в устойчивых состояниях. Результаты ориентированы на приложения в области разработки стохастических нейроморфных систем.

**Ключевые слова:** функциональный магнитоэлектрический преобразователь, случайные сигналы, стохастические spike-импульсы, порог возбуждения, эффект накопления и переключения.

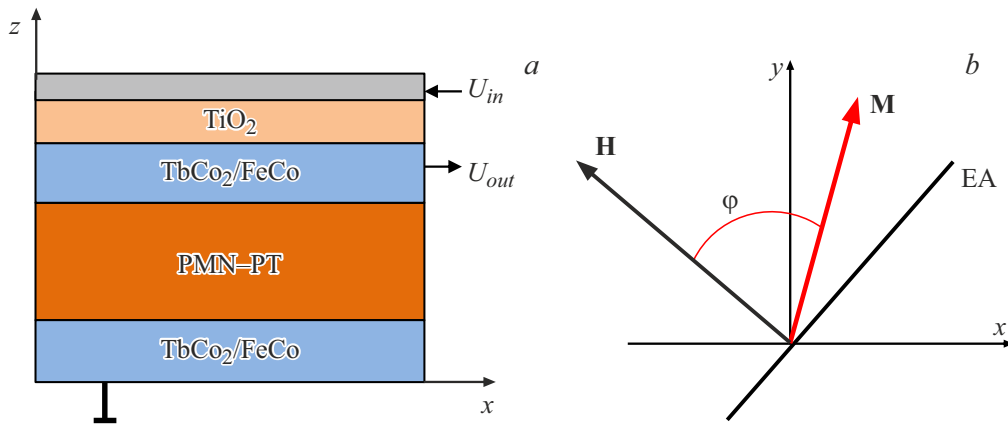
DOI: 10.61011/PJTF.2025.12.60605.20282

Развитие систем искусственного интеллекта стимулирует интерес к аналоговым элементам нейроморфных сетей, реализующим определенные функциональные преобразования сигналов. Преобразования, имитирующие функции нейронов, включают в себя взвешенное суммирование входных сигналов, поступающих от разных элементов сети, нелинейное преобразование суммы и формирование выходного сигнала, играющего роль функции активации [1]. В нейроморфных сетях, оперирующих импульсными последовательностями (spiking neural networks, SNN), искусственный нейрон при определенных пороговых условиях на входе вырабатывает одиночный импульс (spike), передаваемый в сеть. При обработке импульсных сигналов нейрон может выполнять функцию накопления информации с пороговым изменением состояния (Integrate-and-fire) и последующей релаксацией. Различные физические принципы реализации искусственных нейронов на основе полупроводниковых, сегнетоэлектрических, фотонных, спинтронных, фазово-переходных, электрохимических технологий продемонстрированы в обзоре [2]. В работе [3] предложен стрейнтронный функциональный преобразователь сигналов в виде магнитоэлектрического композита в области спин-переориентационного перехода, выполняющий функции суммирования сигналов с многоканального входа, формирования нелинейной функции активации, порогового spike-отклика и эффекта накопления и сброса потенциала типа Integrate-and-fire. При этом различные функции нелинейного преобразования сигналов реализуются в данном случае в рамках одной структуры путем управ-

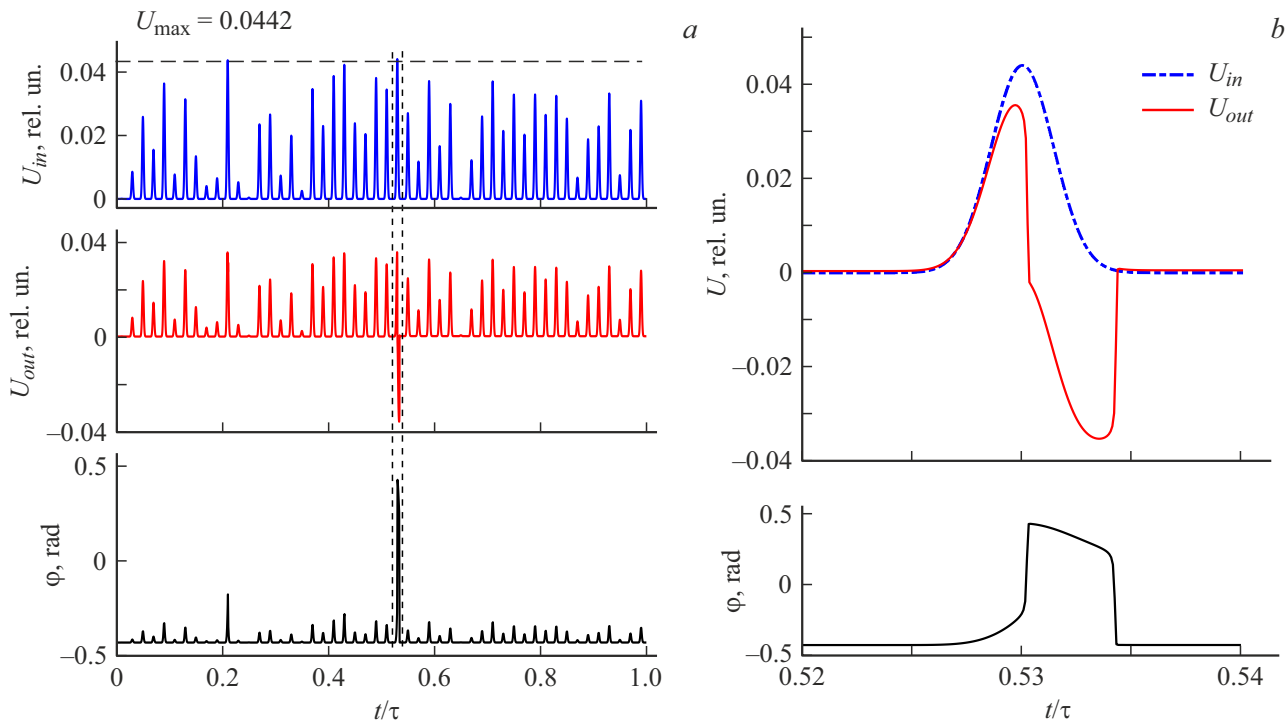
ления параметрами намагничивающего поля и входных сигналов.

В стохастических SNN, оперирующих случайными импульсными сигналами, стохастичность может быть заложена как во временную последовательность импульсов фиксированной амплитуды [4–9], так и в амплитуду импульсов с эквидистантной последовательностью [10]. В настоящей работе комбинированным методом численного и аналитического моделирования исследованы функциональные характеристики стрейнтронного преобразователя в условиях обработки последовательности импульсных входных сигналов случайной амплитуды. Определены контролируемые магнитным полем пороговые условия генерации случайных последовательностей spike-импульсов с фиксированной амплитудой.

Упрощенная схема стрейнтронного магнитоэлектрического преобразователя приведена на рис. 1, *a*. На пластину пьезоэлектрика размером  $4 \times 4 \times 0.3$  mm с двух сторон нанесены слои магнитного металла общей толщиной  $150 \mu\text{m}$ . Помимо участия в формировании магнитоэлектрической связи слои играют роль электродов выхода и массы. Входной и выходной электроды разделены слоем диэлектрика ( $\text{TiO}_2$ ) толщиной  $5 \mu\text{m}$ . Электроды соединены сопротивлениями утечки (или нагрузки). В роли пьезоэлектрика рассматривается сегнетоэлектрик PMN–PT среза  $\langle 011 \rangle$  [11], а в качестве магнитного металла — слоистые наноструктуры  $\text{TbCo}_2/\text{FeCo}$  с гигантской магнитострикцией [12–14]. Предполагается, что в процессе нанесения магнитных слоев в них наведена одноосная магнитная анизотропия. На рис. 1, *b* показана



**Рис. 1.** Схематическое изображение композитной магнитоэлектрической ячейки (а) и диаграмма взаимной ориентации векторов намагниченности  $\mathbf{M}$ , намагничивающего поля  $\mathbf{H}$  и оси „легкого намагничивания“  $\mathbf{EA}$  (b). Входной электрод расположен сверху.



**Рис. 2.** а — диаграммы случайного распределения амплитуд входных импульсных сигналов  $U_{in}$ , выходных сигналов  $U_{out}$  и угла ориентации намагниченности  $\varphi$  в условиях генерации одиночного spike-сигнала. Штриховой линией показан уровень порога spike-генерации. б — форма входного импульса (штрихпунктир), spike-сигнала (сплошная линия) и угла ориентации намагниченности. Пунктиром на части а выделена область, показанная подробно на части б.

взаимная ориентация оси легкого намагничивания (EA), кристаллографических осей пьезоэлектрика, векторов намагниченности и управляющего магнитного поля. Магнитоэлектрическая связь в структуре реализуется за счет совместного деформирования пьезоэлектрического и магнитных слоев. Расчет, выполненный численно с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, определил зависимость квазистатических деформаций, усредненных по магнитному объему, от напряжения на пьезоэлектрике  $V_{out}$  и угла ориентации намагниченности

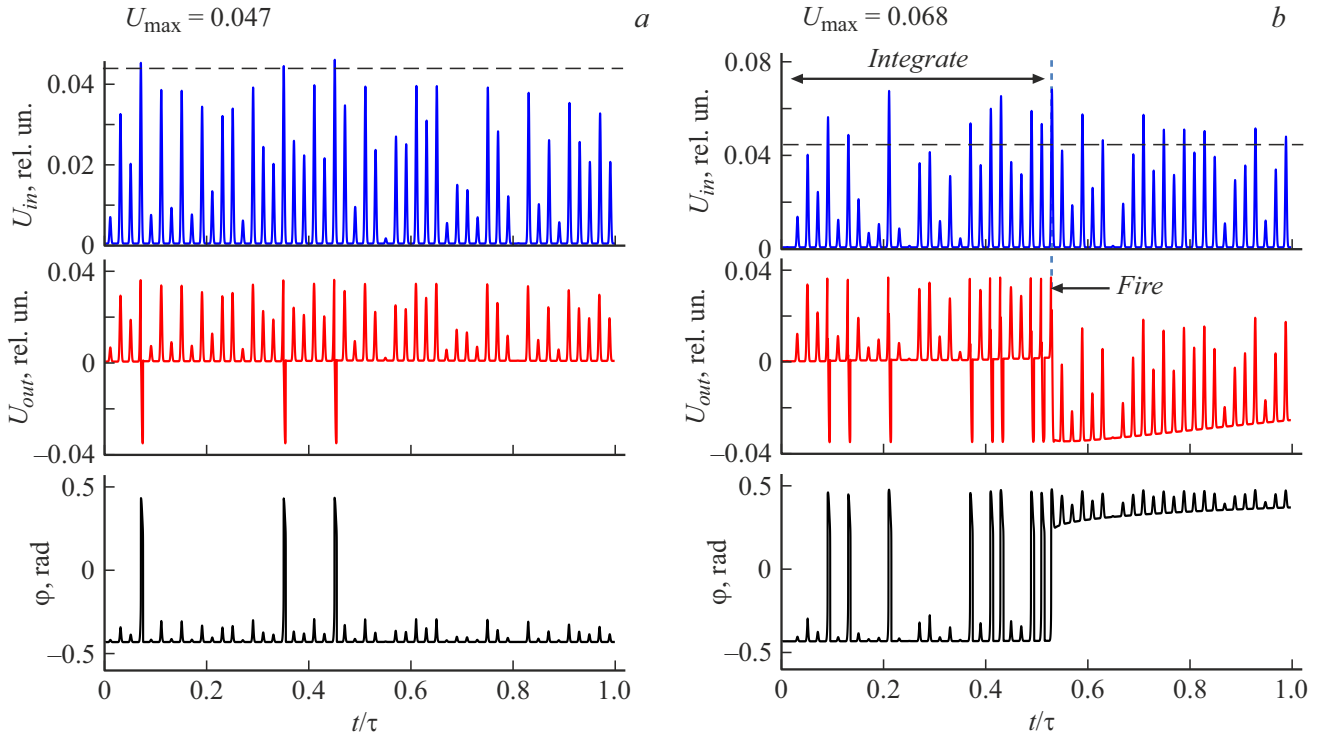
$\varphi$  в виде [3]:

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

где

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

— результат численного расчета.



**Рис. 3.** Диаграммы распределения амплитуд входных импульсных сигналов  $U_{in}$ , выходных сигналов  $U_{out}$  и угла ориентации намагниченности  $\varphi$  в условиях генерации случайной последовательности spike-сигналов (а) и в режиме накопления и порогового переключения направления намагниченности (б). Штриховой линией показан пороговый уровень spike-генерации.

Динамика процессов, медленных по сравнению со временем спиновой релаксации, описывается связанной системой уравнения состояния магнитной системы и уравнения релаксации нормированного заряда  $P$  на обкладке пьезоэлектрика [3]:

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} (P - \kappa \sin 2\varphi) - U_{in} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_1} \right), \quad (3)$$

где безразмерная переменная  $U_{in} = 2V_{in}g_p \cdot 0.78B/MH_A$ ,  $B$  — константа магнитоупругого взаимодействия (порядка  $-10$  МПа для структур  $TbCo_2/FeCo$  [12]),  $V_{in}$  — входное напряжение,  $\kappa = -2g_p g_m^{(3)} B/MH_A$ ,  $\eta = -(g_m^{(1)} - 2g_m^{(2)})2B/MH_A$ ,  $g_m^{(3)} = -14$  В,  $\tau$  и  $\tau_1$  — времена релаксации заряда в пьезо- и диэлектрическом слоях соответственно. В расчетах использовано отношение  $2B/MH_A = -3 \cdot 10^3$ .

В тех же переменных нормированное выходное напряжение  $U_{out} = 2V_{out}g_p B/MH_A$  определяется напряжением на входе и решениями системы уравнений (2) и (3) в виде

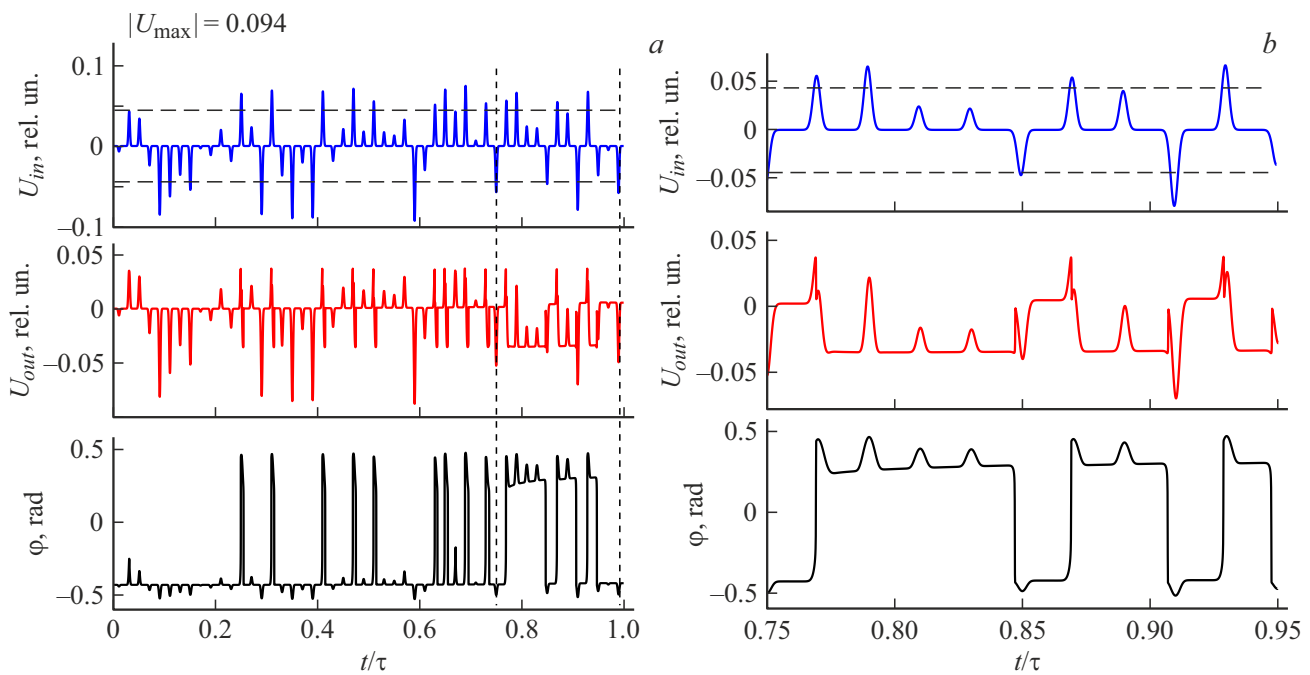
$$U_{out} = U_{in} + P - \kappa \sin 2\varphi. \quad (4)$$

Устойчивому равновесию в отсутствие входного сигнала, согласно уравнению (3), соответствует равенство

$P_0 = \kappa \sin 2\varphi_0$ , связывающее заряд на верхней обкладке пьезоэлектрика с направлением намагниченности.

Реакция структуры на случайное воздействие моделировалась применительно к бистабильному состоянию магнитной системы в намагничивающем поле  $H = 1.05H_A$  ( $\varphi_0 = -0.43$ ) ниже поля спин-переориентационного перехода  $H = 1.18H_A$ . В качестве воздействия рассматривалась эквидистантная последовательность входных импульсов гауссовой формы длительностью  $2.8 \cdot 10^{-3} \tau$  со случайной амплитудой, равномерно распределенной либо на интервале  $0 < U_{in} < U_{max}$ , либо  $-U_{max} < U_{in} < U_{max}$ . Период следования импульсов выбран равным  $0.02 \tau$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета выходного напряжения и углового отклонения намагниченности от исходного равновесного положения при величине  $U_{max} = 0.0442$ , близкой к порогу  $U_{th} = 0.044$  переключения бистабильной магнитной системы между равновесными состояниями. Видно, что при появлении в случайной последовательности импульса с амплитудой выше порогового уровня на выходном электроде генерируется spike-импульс обратной полярности (рис. 2, а). При этом в течение действия импульса магнитная система находится в переключенном состоянии, после чего возвращается к исходному равновесию (рис. 2, б). Переключение состояний гетероструктуры формируется одновременным действием пьезоэлектрического и маг-



**Рис. 4.** Диаграммы распределения амплитуд входных импульсных сигналов  $U_{in}$ , выходных сигналов  $U_{out}$  и угла ориентации намагниченности  $\varphi$  в условиях биполярной случайной последовательности сигналов на входе ячейки. *a* — распределения в интервале времени, равном времени релаксации заряда  $\tau$ ; *b* — фрагмент диаграммы *a* на интервале времени от  $0.75\tau$  до  $0.95\tau$ . Диаграммы *b* иллюстрируют случайное время задержки магнитной подсистемы в устойчивых состояниях. Штриховыми линиями показаны пороговые уровни амплитуд входных сигналов. Пунктиром на части *a* выделена область, показанная подробно на части *b*.

нитострикционного механизмов. Импульсная деформация, создаваемая в структуре электрическим полем, приложенным к пьезоэлектрику, генерирует в магнитном слое эффективное магнитострикционное поле анизотропии. Когда напряженность магнитострикционного поля превышает пороговое значение, бистабильная магнитная подсистема переключается из одного устойчивого состояния в другое. В свою очередь процесс переключения сопровождается генерацией неравновесных магнитострикционных напряжений, оказывающих обратное воздействие на пьезоэлектрический слой, и формирует скачок выходного напряжения, противофазный входному.

Отметим, что величина порога и вероятность переключения управляются напряженностью магнитного поля. Так, изменение напряженности поля от  $H = 1.03H_A$  до  $H = 1.07H_A$  изменяет пороговую амплитуду от  $U_{th} = 0.049$  до  $U_{th} = 0.039$ .

С ростом надкритичности (т. е. превышения величиной  $U_{max}$  порогового уровня  $U_{th} = 0.044$ ) частота генерации spike-импульсов возрастает (рис. 3, *a*), амплитуда практически не изменяется от импульса к импульсу, однако случайной становится последовательность их генерации подобно вероятностному биту (p-bit) [8,9]. Дальнейший рост надкритичности обнаруживает на времени релаксации заряда проявление эффекта накопления с пороговым переходом магнитной системы в новое устойчивое состояние типа Integrate-and-fire (рис. 3, *b*). Исходное состояние восстанавливается приложением импульса от-

рицательной полярности достаточной амплитуды (reset pulse).

В системах биполярных искусственных нейронов на их вход подаются импульсные сигналы разного знака [15]. При воздействии случайной последовательности биполярных импульсов в магнитоэлектрической ячейке реализуется квазистационарный стохастический режим spike-генерации (рис. 4, *a*) со случайным временем пребывания магнитной подсистемы в стационарных состояниях (рис. 4, *b*). Время пребывания магнитной системы в устойчивых состояниях случайно, поскольку обратное переключение происходит только при появлении импульса обратной полярности с амплитудой выше порогового значения. Момент появления такого импульса случаен в силу амплитудной стохастичности входных импульсных последовательностей.

Приведенные результаты демонстрируют возможности функционального преобразования случайных импульсных сигналов, характерные для композитной магнитоэлектрической ячейки со спин-переориентационным переходом. В частности, ячейка реализует пороговое преобразование сигналов со случайной амплитудой в сигналы типа „случайный бит“. При этом порог преобразования управляется внешним магнитным полем, что может быть использовано в процессах обучения нейроморфных систем. Обратное преобразование с измененной статистикой может быть реализовано в слоистых сетях типа упрощенной машины Больцмана (RBM) [16].

Полученные характеристики наряду с эффектами накопления и переключения представляют интерес для приложений в стохастических нейроморфных системах.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ № 25-79-30019.

### 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] Л.М. Крутянский, В.Л. Преображенский, *Письма в ЖТФ*, **49** (15), 33 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55862.19594 [L.M. Krutyansky, V.L. Preobrazhensky, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (8), 28 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56683.19594].
- [4] W. Yi, K.K. Tsang, S.K. Lam, X. Bai, J.A. Crowell, E.A. Flores, *Nat. Commun.*, **9** (1), 4661 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-07052-w
- [5] H. Liu, T. Wu, X. Yan, J. Wu, N. Wang, Z. Du, H. Yang, B. Chen, Z. Zhang, F. Liu, W. Wu, J. Guo, H. Wang, *Nano Lett.*, **21**, 3465 (2021). DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00108
- [6] А.Ю. Морозов, К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников, *Рос. нанотехнологии*, **16** (6), 799 (2021). DOI: 10.1134/S1992722321060157 [A.Y. Morozov, K.K. Abgaryan, D.L. Reviznikov, *Nanotechnol. Russ.*, **16**, 767 (2021). DOI: 10.1134/S263516762106015X].
- [7] J.J. Wang, S.G. Hu, X.T. Zhan, Q. Yu, Z. Liu, T.P. Chen, Y. Yin, S. Hosaka, Y. Liu, *Sci. Rep.*, **8**, 12546 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-30768-0
- [8] W.A. Borders, A.Z. Pervaiz, S. Fukami, K.Y. Camsari, H. Ohno, S. Datta, *Nature*, **573**, 390 (2019). DOI: 10.1038/s41586-019-1557-9
- [9] J. Deng, V.P.K. Miriyala, Z. Zhu, X. Fong, G. Liang, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **41** (7), 1102 (2020). DOI: 10.1109/led.2020.2995874
- [10] I. Chakraborty, G. Saha, A. Sengupta, K. Roy, *Sci. Rep.*, **8**, 12980 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-31365-x
- [11] F. Wang, L. Luo, D. Zhou, X. Zhao, H. Luo, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 212903 (2007). DOI: 10.1063/1.2743393
- [12] N. Tiercelin, V. Preobrazhensky, P. Pernod, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 062904 (2008). DOI: 10.1063/1.2841656
- [13] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, S. Giordano, V. Preobrazhensky, P. Pernod, *J. Appl. Phys.*, **113**, 17C719 (2013). DOI: 10.1063/1.4795440
- [14] 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
- [15] T. Kim, S.-H. Kim, J.-H. Park, J. Park, E. Park, S.-G. Kim, H.-Y. Yu, *Adv. Electron. Mater.*, **7** (1), 2000410 (2020). DOI: 10.1002/aelm.202000410
- [16] A. Fischer, C. Igel, *Pattern Recogn.*, **47**, 25 (2014). DOI: 10.1016/j.patcog.2013.05.025