

УДК 537.622.4

DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-1-65-70

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И
НОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА СПИНТРОНИКИ**© **З.В. Гареева, А.М. Трочина, Ш.Т. Гареев**

В работе обсуждаются новые логические устройства спинтроники и перспективы применения мультиферроиков перовскитного типа в качестве рабочих элементов магнитоэлектрических компонент МЭСО [1]. В основе принципа работы рассматриваемых логических устройств лежит использование двух компонент-магнитоэлектрической, в которой осуществляется запись магнитного состояния за счет энергоэффективного магнитоэлектрического взаимодействия и спин-орбитальной компоненты, в которой реализуется считывание информации на основе конвертирования спина в заряд за счет спин-орбитального взаимодействия электронов; обе компоненты соединяются между собой наноэлектродом. При проектировании новых спинтронных логических устройств необходимо учитывать эффективность механизмов магнитоэлектрических взаимодействий; особенности действия спин-поляризованных токов и связанных с ними вращательных моментов; а также другие факторы, влияющие на скорость переключения магнитных состояний и чувствительность устройства к внешним воздействиям. Мультиферроидные материалы, перспективные для использования в качестве элементов магнитоэлектрических компонент новых логических устройств должны отвечать ряду требований, наиболее существенными из которых являются величина коэффициента магнитоэлектрической связи и температура реализации магнитоэлектрических эффектов. В работе рассмотрены представители мультиферроиков со структурой перовскита, которые отвечают данным условиям, в некоторой степени частично, это высокотемпературный мультиферроик феррит висмута (BiFeO_3) и структуры Раддлесдена–Поппера, в которых уже реализованы высокотемпературные сегнетоэлектрические эффекты и при определенных условиях возможен магнитоэлектрический эффект. Рассмотрена кристаллическая структура данных соединений, проанализирована роль кристаллографических дисторсий, отвечающих за проявление магнитоэлектрических свойств. Получены выражения для тензора магнитоэлектрического эффекта как функции магнитных параметров порядка, показана принципиальная возможность реализации магнитоэлектрических эффектов в структурах Раддлесдена–Поппера, включающих магнитные катионы.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, мультиферроики, кристаллографические дисторсии, феррит висмута, структуры Раддлесдена–Поппера.

Введение. XXI в. – время новых ожиданий, больших возможностей, высоких скоростей и технологических прорывов. Достижения современной науки сложно представить без эпитетов фемто, атто-, мега- и нано, связанных с развитием цифровых и информационных технологий. В фарватере технологического прогресса идут спинтроника, скирмионика, орбитроника [1–6], новые направления физики магнетизма, использующие в своей основе многофункциональные магнитные элементы, для которых энергоэффективность, наноразмеры, высокая скорость реакции на внешние воздействия имеют приоритетное значение.

Многофункциональные магнитные элементы являются неотъемлемыми компонентами информационных устройств, обеспечивающих базу современных вычислительных схем, в которых можно выделить две основные составляющие – логические устройства, обеспечивающие непосредственно вычислительный процесс и устройства обработки и хранения информации, в которых осуществляется считывание, хранение и запись битов информации на основе определенных физических носителей [7].

В последние годы в векторе развития информационных технологических процессов можно выделить несколько направлений:

ГАРЕЕВА Зухра Владимировна – д.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
e-mail: gzv@anrb.ru

ТРОЧИНА Арина Михайловна, Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
e-mail: arina.trochina@bk.ru

ГАРЕЕВ Шамиль Тагирович, Университет им. Лóранда Этвёша (Будапешт),
e-mail: shamil.gareev27@gmail.com

1) технологии масштабирования, направленные на увеличения плотности упаковки носителей; 2) новые полупроводниковые технологии для создания процессоров с малыми энергетическими потерями, высокой скоростью переключения; 3) квантовые вычислительные схемы, использующие кремниевые транзисторы, позволяющие одновременно решать задачи масштабирования и энергоэффективности. Остановимся на последнем направлении более подробно.

Последние разработки компании Intel показали, что решение вопроса уменьшения энергетических затрат и миниатюризации устройств вычислительной техники может быть реализовано за счет объединения логических устройств и устройств записи и считывания битов информации в одном элементе за счет совместного использования магнитоэлектрических и спин-орбитальных эффектов [8–10]. При этом появляется возможность соединить устройства записи и считывания информации в одной логической схеме, что должно приводить к значительному выигрышу в энергии, скорости передачи и плотности упаковки информации. Запись магнитного состояния осуществляется за счет энергоэффективного магнитоэлектрического взаимодействия, считывание информации реализуется на основе конвертирования спина в заряд за счет спин-орбитального взаимодействия электронов.

Отметим, что с начала 1980-х гг. в большей части электроники используются технологии КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник), принцип работы которых основан на управлении потоками электронов. В отличие от схем КМОП, в новых спинтронных устройствах [8–10] логические операции осуществляются за счет переключения спина, а передача информации – за счет переноса заряда.

Энергоэффективность обеспечивается наличием магнитоэлектрической (МЭ) компоненты, так, в работе [11] показана возможность уменьшения рабочего диапазона напряжений до 500 и 100 мВ, что в 10–100 раз понижает энергию переключения магнитных состояний, которые являются носителями битов информации.

В соответствии с этим, в данной работе мы остановимся на аспектах, связанных с МЭ составляющими логических спинтронных устройств. МЭ-компонента состоит из пленок ферромагнетика и мультиферроика, связанных друг

с другом межслойным обменным взаимодействием. Намагниченность ферромагнитного слоя переключается электрическим воздействием за счет МЭ связи, реализованной в мультиферроидной компоненте. Большое значение имеют 1) величина магнитоэлектрической связи, определяемая коэффициентом МЭ взаимодействия и 2) температуры магнитного и сегнетоэлектрического упорядочения мультиферроика. Для работы логических устройств, используемых в компьютерах, требуются высокие, близкие к комнатным, температуры МЭ упорядочения и достаточно сильная магнитоэлектрическая связь. Основным претендентом на роль мультиферроика для МЭ компоненты является перовскитоподобный мультиферроик феррит висмута, поскольку в других известных соединениях для реализации МЭ свойств требуются низкие температуры. Тем не менее в настоящее время проводятся исследования других возможных мультиферроидных структур на основе перовскитов, в которых МЭ свойства могут быть реализованы при высоких температурах. Интересными представителями таких соединений являются слоистые структуры Раддлсдена–Поппера. Ниже мы обсудим мультиферроики, как класс МЭ материалов, акцентируя внимание на феррите висмута и структурах Раддлсдена–Поппера, МЭ свойствах и механизмах МЭ эффектов этих соединений.

Мультиферроики. Мультиферроики (МФ) – класс магнитоэлектрических материалов, в которых сосуществуют магнитное и сегнетоэлектрическое упорядочения, и за счет этого реализуются перекрестные эффекты, позволяющие осуществить переключение магнитного состояния электрическим полем и сегнетоэлектрического – магнитным. В целом МЭ материалы подразделяются на две основные группы: 1) однофазные МФ, в которых магнитное и сегнетоэлектрическое упорядочение реализуется в одной кристаллической фазе, в свою очередь, их разделяют на собственные (МФ 1 типа) и несобственные (МФ 2 типа), и 2) многофазные МФ – композиты или гетероструктуры, в которых МЭ эффект реализуется за счет комбинации МФ, пьезоэлектрических и ферромагнитных слоев, а также гетероэпитаксиально выращенных ферромагнитных мультиферроидных пленок с МЭ свойствами интерфейсов. Основными параметрами, определяющими эффективность магнитоэлектрического материала, являются коэффициент магнито-

электрического взаимодействия, электрическая поляризация и намагниченность. С этих позиций ниже мы рассмотрим и классифицируем основные типы мультиферроиков.

Большой интерес для исследований представляют однофазные мультиферроики, в которых магнитные и сегнетоэлектрические свойства реализуются в одной кристаллической фазе. В этом отношении перспективными материалами являются мультиферроидные структуры, полученные на основе ABO_3 – перовскитов [12]. Различие модификаций перовскитных структур связано с внутренней структурной неустойчивостью исходной кубической фазы ABO_3 , чувствительной к замещениям А и В – катионов, приводящим к кристаллографическим искажениям – дисторсиям. Магнитные и сегнетоэлектрические свойства МФ зависят от степени искажения кристаллической структуры. В связи с этим выявление механизмов, отвечающих за взаимодействие кристаллографической, сегнетоэлектрической и магнитной подсистем мультиферроиков ABO_3 -типа является важной задачей, решение которой необходимо для успешной реализации магнитоэлектрических эффектов.

Магнитоэлектрические эффекты в мультиферроиках со структурой перовскита. Рассмотрим МЭ свойства двух представителей МФ со структурой перовскита – классического мультиферроика $BiFeO_3$ и соединений Раддлсдена–Поппера, в которых ожидается реализация МЭ эффектов.

Феррит висмута $BiFeO_3$ является одним из наиболее известных высокотемпературных мультиферроиков, температуры сегнетоэлектрического и магнитного упорядочения в нем составляют $T_C = 1083$ К, $T_N = 643$ К [13]. $BiFeO_3$ кристаллизуется в группе симметрии $R3c$ (рис. 1), основные кристаллографические искажения (дисторсии) ABO_3 перовскита следующие: (i) смещение ионов Bi и Fe вдоль оси $\langle 111 \rangle$, (ii) деформации кислородных октаэдров FeO_6 и (iii) антивращение кислородных октаэдров вокруг оси $\langle 111 \rangle$. Именно с наличием перечисленных типов дисторсий связано возникновение сегнетоэлектрических и магнитных свойств $BiFeO_3$.

Величина спонтанной сегнетоэлектрической поляризации связана с дисторсиями вида (i), (ii) [14]

$$P_s = \frac{4e}{V} (3\zeta_{Bi} - 4\zeta_{O1} - 2\zeta_{O3}), \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, V – объем элементарной ячейки, ζ_{Bi} – смещение ионов Bi , соответствующее (i) дисторсии, ζ_{O1} и ζ_{O3} – смещения ионов кислорода, соответствующее (ii) – дисторсии.

В магнитном отношении $BiFeO_3$ является слабым ферромагнетиком с антиферромагнитным упорядочением G-типа, возникновение результирующей намагниченности связано с кристаллографическими дисторсиями – поворотом и деформацией кислородных октаэдров. Намагниченность определяется следующим образом [15]:

$$M = \frac{V_0 a^2}{6J} \Omega \times L + \frac{V_0 a^2}{6J} \sum_{n=1}^6 (n_n \times \zeta_{O_n}), \quad (2)$$

где V_0 – константа, a – параметр решетки, J – константа обмена, n_n – вектор направления, ориентированный вдоль одной из кристаллографических осей $\langle 100 \rangle$, L – вектор антиферромагнетизма, Ω , ζ_{O_n} – дисторсионные параметры порядка, определяющие поворот и деформацию октаэдров FeO_6 .

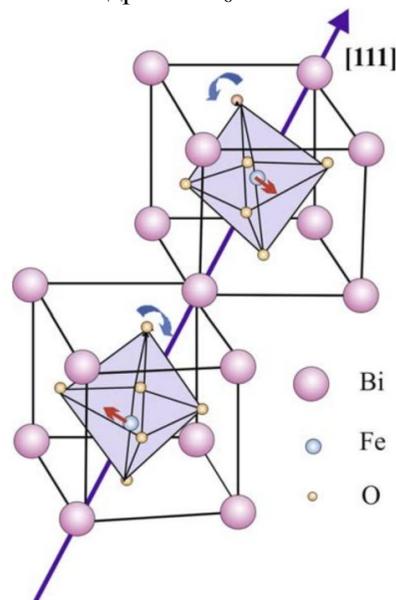


Рис. 1. Феррит висмута. Элементарная ячейка

Симметрия $BiFeO_3$ разрешает существование линейного магнитоэлектрического эффекта (МЭЭ), в частности, линейной зависимости электрической поляризации от магнитного поля, а также существование пространственно-модулированных структур, стабилизируемых взаимодействием Дзялошинского–Мория (вДМ). Зависимость электрической поляризации от магнитного поля $P_i = \alpha_{ij} H_j$ выражается через тензор

трических свойств, которые могут реализовываться при комнатных температурах и перспективами высокотемпературных МЭЭ. При изменении температуры в РР структурах имеют место фазовые переходы из тетрагональной $I4/mmm$ фазы в орторомбическую через серию промежуточных фаз. В соединениях вида $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ в интервале температур $T < T_N < T_{\text{RT}}$ ($T_N \sim 134\text{K}$) реализуется антиферромагнитное (АФМ) упорядочение G- или C-типа, в работе [17] было показано, что в них могут формироваться обменно-связанные структуры вида $(G_x F_y C_z)$, $(F_x G_y A_z)$, $(A_x C_y F_z)$. Можно показать, что в данных структурах симметрией разрешен линейный МЭЭ, и тензор α_{ij}^{R-P} имеет вид

$$\alpha_{ij}^{R-P} = \begin{pmatrix} \gamma_3 G_z & 0 & \gamma_2 G_x \\ 0 & \gamma_3 G_z & \gamma_2 G_y \\ \gamma_4 G_x & \gamma_4 G_y & \gamma_5 G_z \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Отметим, что экспериментальные исследования структур $[1-x](\text{Ca}_y\text{Sr}_{1-y})_{1.15}\text{Tb}_{1.85}\text{Fe}_2\text{O}_7$ [18] подтвердили наличие линейного МЭЭ в этих материалах при определенных концентрациях $0.0 \leq x \leq 0.30$, $y = 0.563$.

Заключение. Рассмотрены магнитоэлектрические эффекты (МЭЭ) и свойства мультиферроидных материалов, используемых в качестве элементов магнитоэлектрических компонент логических устройств спинтроники нового поколения, принцип работы которых основан на использовании магнитоэлектрических и спин-орбитальных эффектов. В данной работе рассмотрены МЭЭ в кристаллах мультиферроиков со структурой перовскита, в качестве характерных представителей выбраны классический высокотемпературный мультиферроик феррит висмута и структуры Раддлседена–Поппера, пока еще являющиеся кандидатами на высокотемпературные мультиферроики. Рассмотрена кристаллическая структура данных соединений, проанализирована роль кристаллографических дисторсий, отвечающих за проявление магнитоэлектрических свойств. Получены выражения для тензоров магнитоэлектрического эффекта как функции магнитных параметров порядка, с точки зрения симметрии показана возможность реализации линейного магнитоэлектрического эффекта в структурах Раддлседена–Поппера.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-22-00225.

Литература

1. Trier F. et al. Oxide spin-orbitronics: spin-charge interconversion and topological spin textures // *Nature Reviews Materials*. 2022. V. 7. № 4. P. 258–274.
2. Back C. et al. The 2020 skyrmionics roadmap // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. V. 53. № 36. P. 363001.
3. He Q.L. et al. Topological spintronics and magnetoelectronics // *Nature materials*. 2022. V. 21. № 1. P. 15–23.
4. Sinova J., Žutić I. New moves of the spintronics tango // *Nature materials*. 2012. V. 11. № 5. P. 368–371.
5. Grollier J. et al. Neuromorphic spintronics // *Nature electronics*. 2020. V. 3. № 7. P. 360–370.
6. Gradauskaite E. et al. Multiferroic heterostructures for spintronics // *Physical Sciences Reviews*. 2021. V. 6. № 2.
7. Столяров Ю.Д. ЭВМ и периферийные устройства. Ч. 1. 2022.
8. Manipatruni S., Nikonov D.E., Lin C.-C., Gosavi T.A., Liu H., Prasad B., Huang Y.-L., Bonturim E., Ramesh R., Young I.A. Scalable Energy-Efficient Magnetoelectric Spin–Orbit Logic // *Nature*. 2019. V. 565. P. 7737.
9. Zeng J., Yi P., Chen B., Huang C., Qi X., Qiu S., Fang L. MESO-ADC: The ADC Design Using MESO Device // *Microelectronics Journal*. 2021. V. 116. P. 105235.
10. Liu H., Manipatruni S., Morris, D.H., Vaidyanathan K., Nikonov D.E., Karnik T., Young I.A. Synchronous Circuit Design with Beyond-CMOS Magnetoelectric Spin–Orbit Devices Toward 100-MV Logic // *IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits*. 2019. V. 5 (1). P. 1–9.
11. Prasad B., Huang Y.-L., Chopdekar R.V., Chen Z., Steffes J., Das S., Li Q., Yang M., Lin C.-C., Gosavi T., Nikonov D.E., Qiu Z.Q., Martin L.W., Huey B.D., Young I., Iñiguez J., Manipatruni S., Ramesh R. Ultralow Voltage Manipulation of Ferromagnetism // *Advanced Materials*. 2020. V. 32. № 28. P. 2001943.
12. Dubrovin R.M., Alyabyeva L.N., Siverin N.V., Gorshunov B.P., Novikova N.N., Boldyrev K.N., Pisarev R.V. Incipient Multiferroicity in Pnma Fluoroperovskite NaMnF_3 // *Phys. Rev. B*. 2020. V. 2020. № 101 (18). P. 180403.
13. Spaldin N.A., Ramesh R. Advances in Magnetoelectric Multiferroics // *Nature Mater*. 2019. V. 18. № 3. P. 203–212.
14. Gabbasova Z.V. et al. $\text{Bi}1-x\text{R}_x\text{FeO}_3$ (R= rare earth): a family of novel magnetoelectrics // *Physics Letters A*. 1991. T. 158. № 9. P. 491–498.
15. Gareeva Z., Diéguez O., Iniguez J., Zvezdin A.K. Complex domain walls in BiFeO_3 // *Physical Review B*. 2015. V. 91. № 6. P. 060404.

16. Popov Y.F. et al. Linear magnetoelectric effect and phase transitions in bismuth ferrite, BiFeO_3 // JETP letters. 1993. V. 57. № 1. P. 69–73.

17. Pitcher M.J., Mandal P., Dyer M.S., Alaria J.; Borisov P., Niu H., Claridge J.B., Rosseinsky M.J. Tilt Engineering of Spontaneous Polarization and Magnetization above 300 K in a Bulk Layered Perovskite // Science. 2015. V. 347. № 6220. P. 420–424.

18. Lobanov M.V., Greenblatt M., Caspi E. ad N., Jorgensen J.D., Sheptyakov D.V., Toby B.H., Botez C.E., Stephens P.W. Crystal and Magnetic Structure of the $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ Ruddlesden–Popper Phase: Neutron and Synchrotron x-Ray Diffraction Study // J. Phys.: Condens. Matter. 2004. V. 16. № 29. P. 5339–5348.



MAGNETOELECTRIC EFFECTS AND NEW SPINTRONICS LOGIC DEVICES

© Z.V. Gareeva¹, A.M. Trochina¹, Sh.T. Gareev²

¹ Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
71, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

² Eötvös Loránd University (ELTE),
1518 Budapest, Pf. 120

The paper discusses new logic spintronic devices and the prospects for the use of perovskite-type multiferroics as working elements of magnetoelectric components. The principle of operation of the considered logical devices is based on the use of two components – a magnetoelectric, in which the magnetic state is recorded due to energy-efficient magnetoelectric interaction, and a spin-orbital component, in which information is read out based on the conversion of spin into charge due to the spin-orbital interaction of electrons; both components are interconnected by a nanoelectrode. When designing new logic spintronic devices, it is necessary to take into account the effectiveness of the mechanisms of ME interactions; features of spin – polarized currents and associated torques influencing magnetic moments; as well as other factors affecting the speed of switching magnetic states and the sensitivity of the device to external agents. Multiferroic materials that are promising for use as elements of ME components of new logic devices must meet a number of requirements, the most significant of which are the magnitude of the magnetoelectric coupling coefficient and the temperature at which ME effects occur. The paper considers representatives of multiferroics with a perovskite structure that meet these conditions, to some extent partially, these are high-temperature multiferroic bismuth ferrite (BiFeO_3) and Ruddlesden–Popper structures, in which high-temperature ferroelectric effects are already realized and under certain conditions an ME effect is possible. The crystal structure of these compounds is considered, and the role of crystallographic distortions responsible for the manifestation of magnetoelectric properties is analyzed. Expressions are obtained for the tensor of the magnetoelectric effect as functions of magnetic order parameters, and the fundamental possibility of realizing ME effects in Ruddlesden–Popper structures containing magnetic cations is shown.

Keywords: magnetoelectric effect, multiferroics, crystallographic distortions, bismuth ferrite, Ruddlesden–Popper structures.