

УДК 537.67

ГЕНЕРИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНЫМИ МУЛЬТИСЛОЙНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ С ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ

А.Р.Сафин****, Н.Н.Удалов*, М.И.Бичурин, Р.В.Петров, А.С.Татаренко

GENERATION OF MICROWAVE OSCILLATIONS BY MAGNETIC MULTILAYERED NANOSTRUCTURES WITH FERROELECTRIC SWITCHING

A.R.Safin****, N.N.Udalov*, M.I.Bichurin, R.V.Petrov, A.S.Tatarenko

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mirza.Bichurin@novsu.ru

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

***Национальный исследовательский университет «МГТУ им. Н.Э.Баумана», Москва*

Проведено исследование возможности генерации СВЧ-колебаний мультислойной наноструктурой под действием постоянного, протекающего через образец тока. Полученные рабочие и мощностные характеристики показывают возможность построения на базе таких образцов генераторов СВЧ-колебаний.

Ключевые слова: СВЧ-колебания, наноразмерные мультиферроики, мультислойные наноструктуры

This paper considers the generation of microwave oscillations by multilayered nanostructure, mediated by dc-current. Main obtained characteristics of this structure suggest a good prospect of using the specimens as microwave oscillators.

Keywords: microwave oscillations, nanosized multiferroics, multilayered nanostructures

Введение

Спинтроника является современным направлением нанотехнологий и физики твердого тела, исследующей класс устройств, управляемых не электронными свойствами носителей зарядов (преимущественно электронов), а собственным магнитным моментом (спином). Начав бурно развиваться с конца 90-х годов прошлого века, она уже привела к серьезным техническим приложениям, преимущественно в области магнитной памяти (например, головки считывания жестких дисков персональных компьютеров), что было отмечено Нобелевской премией по физике 2007 г. [1]. Одним из быстро развивающихся на данный момент направлений исследований спинтроники является магнитная опера-

тивная память — MRAM (Magnetic Random Access Memory), которая должна прийти на смену DRAM и SRAM и обладает рядом важных технических свойств, в первую очередь, возможностью сохранения того или иного состояния (памяти) даже при выключенном питании. Одним из направлений исследований спинтроники является генерация сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний широкого диапазона частот мультислойными наноразмерными структурами под действием спин-поляризованного тока за счет эффекта переноса спинового момента, так называемого «spin transfer torque» [1,2]. Осцилляторы, получившие название спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО), несмотря на достоинства, — широкий диапазон перестройки частот (от долей единиц до десятков гигагерц), низкие питающие

напряжения (десятки и сотни миллиампер), совместимость с технологией производства КМОП-структур — имеют и существенные недостатки, ограничивающие на данный момент их практическое использование. К основным стоит отнести низкие выходные мощности генерируемых колебаний (от пиковатт в первых образцах и до микроватт в современных) и большую ширину спектральной линии [2]. Предпринимались различные попытки исправить представленные трудности. Одной из них является использование нескольких осцилляторов для синхронизации и сложения их мощностей [2,3]. Другим путем исправления представленных трудностей является усложнение структуры слоев СТНО, позволяющих добиться высокого значения туннельного магнетосопротивления (Tunnel Magnetoresistance — TMR) и, соответственно, выходной мощности. Ряд исследований, проведенных за последние 10 лет (см. подробнее [4-22]), позволяет сделать вывод о возможности использования мультиферроиков в качестве барьерных слоев мультислойных наноструктур для повышения величины TMR. В данной работе исследуется возможность генерации СВЧ-колебаний мультислойной структурой, состоящей из двух наноразмерных слоев ферромагнетика $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ и Au , разделенных одним барьерным слоем мультиферроика $\text{La}_{0.1}\text{Bi}_{0.9}\text{MnO}_3$ (LBMO) толщиной 2 нм (подобно [22], в которой приведены эксперименты) под действием постоянного, протекающего через систему тока. Построенные рабочие и мощностные характеристики образца позволяют сделать вывод о хороших перспективах использования данных образцов как генераторов СВЧ-колебаний в широком диапазоне частот требуемой мощности.

Схема исследуемой структуры и математическая модель

На рис.1 представлена структура простейших туннельных образцов, применяемых в экспериментах, а также зависимости их сопротивлений от величины приложенных электрического/магнитного полей. В частности, на рис.1a показан магнитный туннельный переход (Magnetic Tunnel Junction — MTJ), применявшийся в большинстве работ по генерации спиновых волн и СВЧ-колебаний за счет эффекта переноса спинового момента. Сопротивление образца зависит от величины внешнего магнитного поля. При антипараллельной конфигурации намагниченностей ферромагнитных слоев сопротивление образца будет высоким (R_{AP}), а при параллельной — низким (R_{P}). Во втором случае на рис.1b взамен ферромагнитных слоев используются немагнитные, а взамен барьерного изолятора используется ферроэлектрический туннельный переход (Ferroelectric Tunnel Junction — FTJ), а управление происходит изменением величины электрического поля. На рис.1c показан мультиферротуннельный переход (Multiferroic Tunnel Junction — MFTJ), в котором два ферромагнитных слоя разделены слоем мультиферроика, а управление осуществляется за счет изменения как магнитного, так и электрического полей [14].

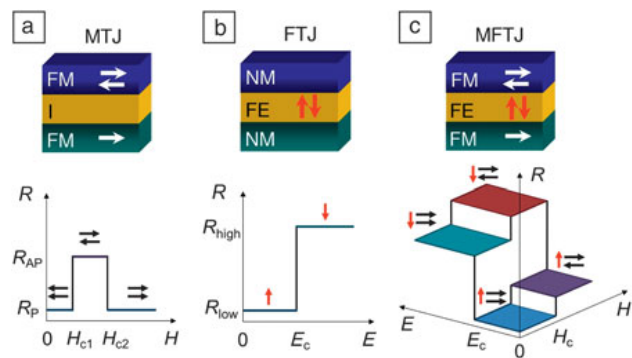


Рис.1. Структура простейших туннельных образцов и зависимости их сопротивлений от величины приложенных электрического/магнитного полей: а) магнитный туннельный переход (MTJ), б) ферроэлектрический туннельный переход (FTJ), в) мультиферротуннельный переход (MFTJ)

Отметим, что один из ферромагнитных слоев в MFTJ является закрепленным, т.е. его намагниченность жестко фиксирована, а второго может меняться под действием внешнего поля или протекающего тока. Сопротивление характерных структур MFTJ представлено на рис.2. Отметим, что величина TMR в данных образцах может достигать 80%, что является достаточно высоким для такого типа образцов (см. [22]).

Генерация СВЧ-колебаний такими структурами возникает при пропускании через систему постоянного электрического тока, электроны которого, поляризуясь по спине в закрепленном слое ферромагнетика, туннелируя через барьерный слой и взаимодействия с электронами кристаллической решетки ферромагнетика со свободной намагниченностью (sd-обменное взаимодействие), вызывают колебания намагниченности свободного слоя в микроволновом диапазоне. Описание движения намагниченности осуществляется с помощью теории Слончевского—Берже, которая заключается в решении уравнения Ландау—Лифшица—Гильберта для намагниченности свободного слоя $\mathbf{M}(t)$ с дополнительными членами, пропорциональными протекающему току в следующем виде [1,2]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\mu_0\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] - \sigma_\alpha[\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}]] + \sigma_1[\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{e}_p]] + \sigma_2[\mathbf{M} \times \mathbf{e}_p], \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $|\gamma|$ — гиромагнитное отношение, $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ — эффективное магнитное поле слоя со свободной намагниченностью, состоящее из поля анизотропии, внешнего магнитного поля, поля размагничивания, поля Эрстеда и т.д., σ_α — величина, пропорциональная коэффициенту Гильбертова затухания в ферромагнетике α , $\mathbf{e}_p$ — единичный орт вдоль направления намагниченности закрепленного слоя и $\sigma_{1,2}$ — константы, пропорциональные величине протекающего через систему тока I .

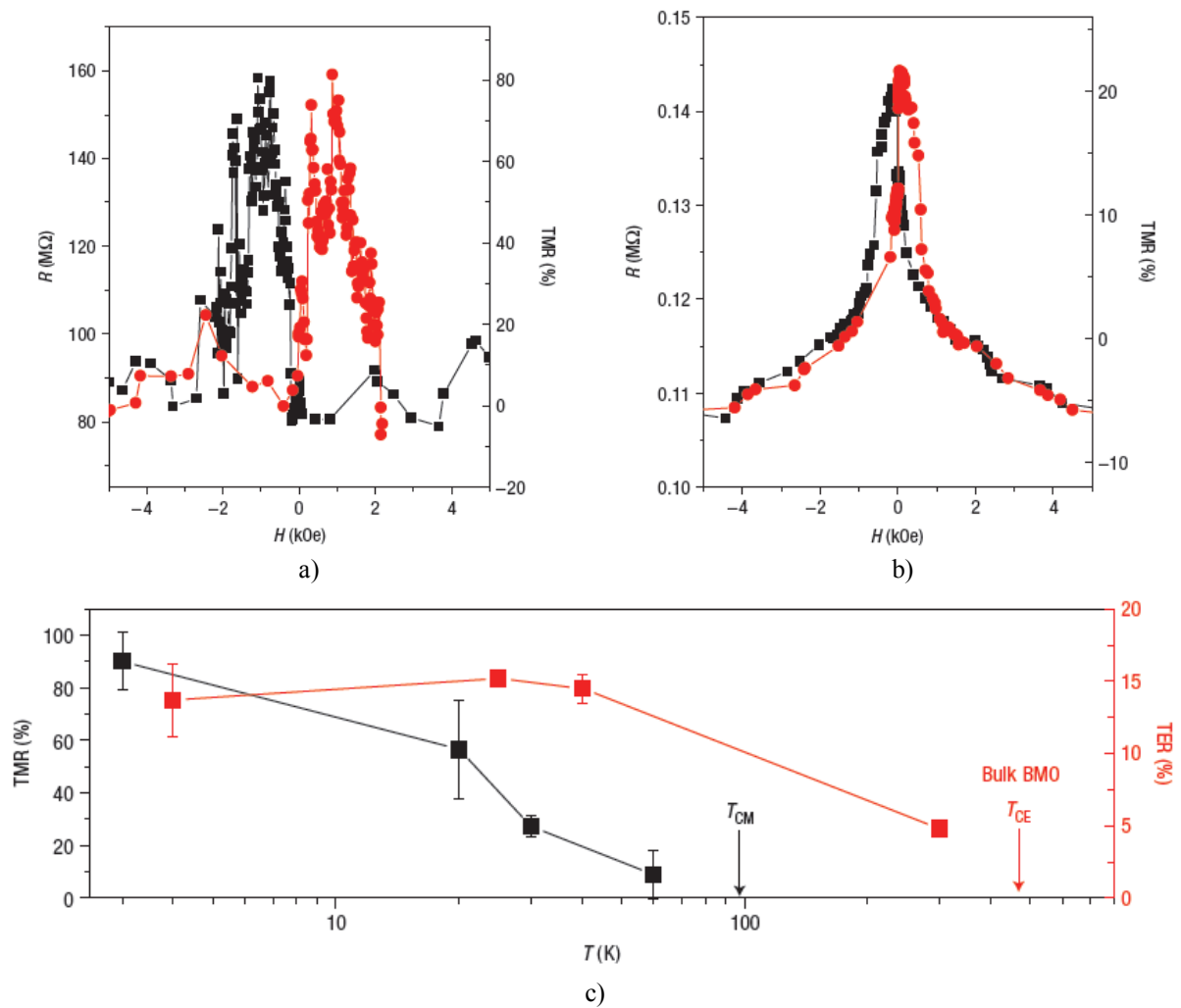


Рис.2. Туннельное магнетосопротивление TMR как функция величины приложенного магнитного поля H при $V_{dc} = 10$ мВ для переходов LSMO/STO(1.6 нм)/LBMO(4 нм)/Au (a) и LSMO/LBMO(2 нм)/Au (b), а также температурная зависимость LSMO/STO(1.6 нм)/LBMO(4 нм)/Au (c) из [22]

Обычно [2,3] от системы дифференциальных уравнений для $M_{x,y,z}$ переходят к комплексным амплитудам спиновых волн слоя со свободной намагниченностью $c_k(t)$, что позволяет свести задачу к так называемым «укороченным уравнениям» для определения частоты и амплитуды спиновых волн. Соответствующие переходы проводились ранее (см. обзор в [2]) и в данной работе не приводятся. Используя представленную методику для определения частоты и амплитуды стационарных колебаний спиновых волн в слое со свободной намагниченностью, рассчитывались рабочие характеристики, представленные ниже.

Рабочие и мощностные характеристики СТНО

Рассмотрим стандартную схему связи СТНО с источником тока I и сопротивлением нагрузки R_L через блокировочные элементы — индуктивность L и емкость C (см. рис.3). Для представленной схемы мощность выходных колебаний по первой гармонике на нагрузке задается выражением вида [23]:

$$P_{out}(I) = \frac{I^2 \Delta R^2 \cdot R_L}{(R_0 + R_L)^2} \cdot \frac{I - I_{th} Q_s}{I + I_{th} Q}, \quad (2)$$

где $\Delta R = (R_{ap} - R_p)/2$, $R_0 = (R_{ap} + R_p)/2$, I_{th} — критический ток, на котором стартуют колебания СТНО и Q_s, Q — параметры, характеризующие нелинейность системы (выводятся из (1)). Представленная зависимость (2) получена в одnogармоническом приближении в стационарном режиме генерации.

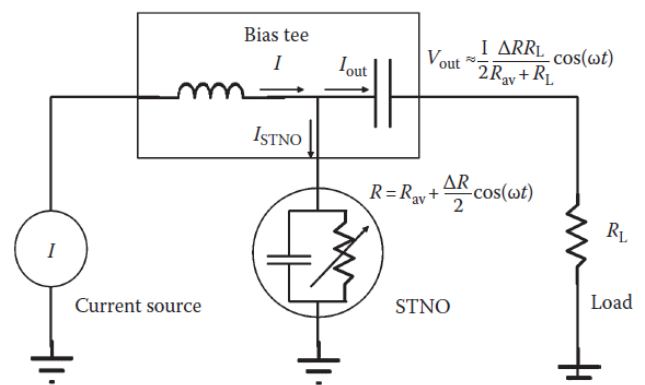


Рис.3. Стандартная схема связи СТНО с источником тока I и сопротивлением нагрузки R_L через блокировочные элементы — индуктивность L и емкость C

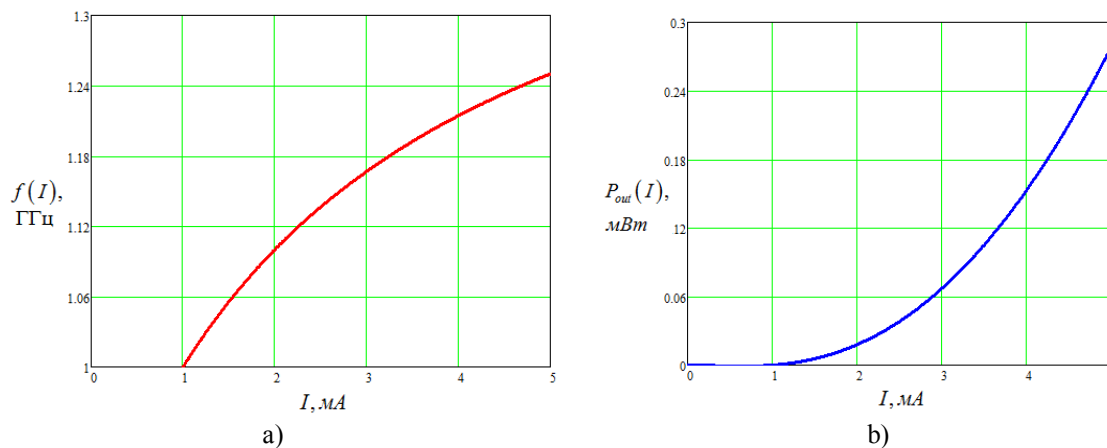


Рис.4. Зависимости частоты $f(I)$ и мощности по первой гармонике $P_{out}(I)$ выходных колебаний СТНО с барьером из мультиферроика от протекающего через систему тока

Зависимость частоты генерируемых колебаний от приложенного тока имеет следующий вид (см. [2,3]):

$$f(I) = f_0 + N \cdot \frac{I - I_{th} Q_s}{I + I_{th} Q}, \quad (3)$$

где N характеризует так называемую неизохронность системы, т.е. зависимость частоты генерируемых колебаний от амплитуды спиновой волны в стационарном режиме генерации, и зависит от угла приложения внешнего магнитного поля.

Используя зависимости (2), (3), были построены (см. рис.4) зависимости частоты $f(I)$ и мощности по первой гармонике $P_{out}(I)$ выходных колебаний СТНО с барьером из мультиферроика $\text{La}_{0.1}\text{Bi}_{0.9}\text{MnO}$ от протекающего через систему тока (для $R_{ap} = 160 \text{ МОм}$, $R_p = 80 \text{ МОм}$, $R_L = 50 \text{ Ом}$, $I_{th} = 1 \text{ мА}$, $Q_s = 1$, $Q = 1$, $f_0 = 1 \text{ ГГц}$ и $N = 0,5 \text{ ГГц}$). Полученная мощность выходных колебаний соответствует величине в доли милливатт, что при объединении в малый ансамбль из 10 осцилляторов и сложении их мощностей может дать до единиц милливатт, что уже может быть использовано в телекоммуникационных приложениях (см.[1]) для создания перестраиваемых СВЧ-генераторов. Вопрос о ширине спектральной линии выходных колебаний составляет предмет отдельного детального исследования и выходит за пределы данной работы.

Заключение

В работе приведены результаты теоретического исследования возможности генерации СВЧ-колебаний мультислойной структурой, состоящей из двух наноразмерных слоев ферромагнетика $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ и Au , разделенных одним барьерным нано-слоем мультиферроика $\text{La}_{0.1}\text{Bi}_{0.9}\text{MnO}_3$ (LBMO) под действием постоянного, протекающего через систему тока. Полученные рабочие и мощностные характеристики образца подтверждают возможность разработки на его основе генераторов СВЧ-колебаний в широком диапазоне частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-19-10036.

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т.178. №12. С.1336-1348.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current // IEEE Trans. On Magn. 2009. Vol.45. №4. P.1875-1918.
3. Safin A.R., Udlov N.N., Kapranov M.V. Mutual phase-locking of very nonidentical spin torque nanooscillators via spin wave interaction // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2014. Vol.67. No.20601.
4. Nan C.-W., Bichurin M.I., et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future direction // J. Appl. Phys. 2008. Vol.103. No.031101.
5. Useinov A., Kalitsov A., et al. Ferroelectric control of spin-transfer torque in multiferroic tunnel junctions // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 91. №094408.
6. Bune A.V., Fridkin V.M. et al. Two-dimensional ferroelectric films // Nature. 1998. Vol.391. P.874-877.
7. Ahn C.H., Rabe K.M., Triscone J.-M. Ferroelectricity at the nanoscale: local polarization in oxide thin films and heterostructures // Science. 2004. Vol. 303. P.488-491.
8. Choi K.J., Biegalski M., Li Y.L., et al. Enhancement of ferroelectricity in strained BaTiO_3 thin films // Science. 2004. Vol.306. P.1005-1009.
9. Zhuravlev M.Ye., Jaswal S.S. et al. Ferroelectric switch for spin injection // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. 222114.
10. Zhuravlev M.Ye., Sabirianov R.F., et al. Giant electroresistance in ferroelectric tunnel junctions // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94. №246802.
11. Gruverman A., Wu D. et al. Tunneling electroresistance effect in ferroelectric tunnel junctions at the nanoscale // Nano Lett. 2009. Vol.9. No.10. P.3539-3543.
12. Kim D.J., Lu H. et al. Ferroelectric tunnel memristor // Nano Lett. 2012. Vol. 12. P.5697-5702.
13. Kohlstedt H., Pertsev N.A. et al. Theoretical current-voltage characteristics of ferroelectric tunnel junctions // Phys. Rev. B. 2005. Vol.72. №125341.
14. Tsybmal E.Y., Gruverman A. et al. Ferroelectric and multiferroic tunnel junctions // MRS Bulletin. 2012. Vol.37. P.138-143.
15. Zhuravlev M.Y., Wang Y. et al. Tunneling electroresistance in ferroelectric tunnel junctions with a composite barrier // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. №052902.
16. Velev J., Duan C.-G. et al. Magnetic tunnel junctions with ferroelectric barriers: prediction of four resistance states from first principles // Nano. Lett. 2009. Vol.9. No.1. P.427-432.
17. Cherepov S., Khalili Amiri P., et al. Electric-field-induced spin wave generation using multiferroic magnetoelectric cells // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol.104. №082403.
18. Bea H., Gajek M., et al. Spintronics with multiferroics // J. Phys. Condens. Matter. 2008. Vol. 20. №434221.

19. Kulagina I., Linder J. Electric-field control over spin-wave and current induced domain wall motion and magnonic torques in multiferroics // arXiv:1411.3327v1. 2014.
20. Suzuki Y., Kubota H., et al. Spin control by application of electric current and voltage in FeCo-MgO junctions // Phil. Trans. R. Soc. A. 2011. Vol.369. P.3658-3678.
21. Garcia V., Bibes M. Ferroelectric tunnel junctions for information storage and processing // Nat. Comm. 2014. Vol.5. №4289.
22. Gajek M., Bibes M., et al. Tunnel junctions with multiferroic barriers // Nature materials. 2007. Vol.6. P.296-302.
23. Russek S., Rippard W. et al. Spin-transfer nano-oscillator / Handbook of nanophysics: Functional nanomaterials. 2010. CRC Press. ISBN 9781420075526.
9. Zhuravlev M.Ye., Jaswal S.S. et al. Ferroelectric switch for spin injection. Applied Physics Letters, 2005, vol. 87, no. 222114.
10. Zhuravlev M.Ye., Sabirianov R.F. et al. Giant electroresistance in ferroelectric tunnel junctions. Physical Review Letters, 2005, vol. 94, no. 246802.
11. Gruverman A., Wu D. et al. Tunneling electroresistance effect in ferroelectric tunnel junctions at the nanoscale. Nano Letters, 2009, vol. 9, no. 10, pp. 3539-3543.
12. Kim D.J., Lu H. et al. Ferroelectric tunnel memristor. Nano Letters, 2012, vol. 12, pp. 5697-5702.
13. Kohlstedt H., Pertsev N.A. et al. Theoretical current-voltage characteristics of ferroelectric tunnel junctions. Physical Review B, 2005, vol. 72, no. 125341.
14. Tsymbal E.Y., Gruverman A. et al. Ferroelectric and multiferroic tunnel junctions. MRS Bulletin, 2012, vol. 37, pp. 138-143.
15. Zhuravlev M.Y., Wang Y. et al. Tunneling electroresistance in ferroelectric tunnel junctions with a composite barrier. Applied Physics Letters, 2009, vol. 95, no. 052902.
16. Velev J., Duan C.-G. et al. Magnetic tunnel junctions with ferroelectric barriers: prediction of four resistance states from first principles. Nano Letters, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 427-432.
17. Cherepov S., Khalili Amiri P. et al. Electric-field-induced spin wave generation using multiferroic magnetoelectric cells. Applied Physics Letters, 2014, vol. 104, no. 082403.
18. Bea H., Gajek M. et al. Spintronics with multiferroics. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, vol. 20, no. 434221.
19. Kulagina I., Linder J. Electric-field control over spin-wave and current induced domain wall motion and magnonic torques in multiferroics. arXiv:1411.3327v1. 2014.
20. Suzuki Y., Kubota H. et al. Spin control by application of electric current and voltage in FeCo-MgO junctions. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2011, vol. 369, pp. 3658-3678.
21. Garcia V., Bibes M. Ferroelectric tunnel junctions for information storage and processing. Nature Communications, 2014, vol. 5, no. 4289.
22. Gajek M., Bibes M. et al. Tunnel junctions with multiferroic barriers. Nature Materials, 2007, vol. 6, pp. 296-302.
23. Russek S., Rippard W. et al. Spin-transfer nano-oscillator. Handbook of nanophysics: Functional nanomaterials. 2010. CRC Press. ISBN 9781420075526.

References

1. Fert A. Proiskhozhdenie, razvitiye i perspektivy spintroniki [The origin, development and future of spintronics]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences), 2008, vol. 178, no. 12, pp. 1336-1348.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1875-1918.
3. Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V. Mutual phase-locking of very nonidentical spin torque nanooscillators via spin wave interaction. European Physical Journal Applied Physics, 2014, vol. 67, no. 20601.
4. Nan C.-W., Bichurin M.I. et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future direction. Journal of Applied Physics, 2008, vol. 103, no. ID 031101.
5. Useinov A., Kalitsov A., et al. Ferroelectric control of spin-transfer torque in multiferroic tunnel junctions. Physical Review B, 2015, vol. 91, no. 094408.
6. Bune A.V., Fridkin V.M. et al. Two-dimensional ferroelectric films. Nature, 1998, vol. 391, pp. 874-877.
7. Ahn C.H., Rabe K.M., Triscone J.-M. Ferroelectricity at the nanoscale: local polarization in oxide thin films and heterostructures. Science, 2004, vol. 303, pp. 488-491.
8. Choi K.J., Biegalski M., Li Y.L. et al. Enhancement of ferroelectricity in strained BaTiO₃ thin films. Science, 2004, vol. 306, pp. 1005-1009.