

УДК 537.6/8

Коломоєць Д.І.¹, студ.
Прокопенко О.В.², к.ф.-м.н.

Детектування мікрохвильових сигналів пороговим спітронним магнітним нанодетектором в умовах сильного гістерезису

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м.Київ, пр-т. Глушкова 4г. E-mail: amerlyq@gmail.com

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м.Київ, пр-т. Глушкова 4г, E-mail: Oleksandr.Prokopenko@gmail.com

D.I. Kolomoiets¹, stud.,
O.V. Prokopenko², Ph.D.

Detection of microwave signals by a threshold spin-torque microwave detector operating in the regime of a strong hysteresis

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Glushkova av., 4g. E-mail: amerlyq@gmail.com

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Glushkova av., 4g. E-mail: Oleksandr.Prokopenko@gmail.com

Числовими методами досліджено ефективність роботи порогового спітронного магнітного нанодетектора в області амплітуд вхідних НВЧ струмів, що відповідають сильному гістерезису на залежності вихідної постійної напруги детектора від вхідного НВЧ струму. Показано, що в даному режимі роботи ширина гістерезису несуттєво збільшується із збільшенням частоти зовнішнього сигналу та нелінійно залежить від амплітуди поля підмагнічування. Отримані результати можуть бути корисними для розробки мікрохвильових систем обробки даних на основі спітронних магнітних наноструктур.

Ключові слова: спітронний магнітний нанодетектор, пороговий детектор, сильний гістерезис, ширина гістерезису.

Performance of a threshold spin-torque microwave detector (STMD) operating in a strong hysteresis regime with applied dc magnetic field is investigated numerically. The analysis is done in the case when amplitude of input microwave current corresponds to the hysteresis area on the dependence of output dc voltage of the detector on input microwave current. The hysteresis width is slightly increasing with frequency of an input signal and nonlinearly depends on the amplitude of an external bias dc magnetic field with different scale for high and low hysteresis threshold. Obtained results are important for development of STMD-based microwave systems for signal processing purposes.

Key Words: spin-torque microwave detector, threshold detector, strong hysteresis, hysteresis width.

Статтю представив д.ф.-м.н., доц. Савенков С.М.

Вступ

Після передбачення Слончевським та Берже [1–2] ефекту переносу спінового магнітного моменту (the spin transfer torque effect, STT ефект) у шаруватих (т.зв. спітронних) магнітних наноструктурах (МНС), цей ефект привернув до себе увагу дослідників усього світу. Сьогодні існує значна кількість як експериментальних [3–14], так і теоретичних робіт [15–19], в яких запропоновані різні способи використання цього ефекту на практиці: зокрема, створення систем динамічної та статичної магнітної пам'яті [3, 20], розробка наногенераторів НВЧ [4–10, 17, 18] та детекторів НВЧ [11–14, 19] тощо.

Принцип дії запропонованих детекторів НВЧ

на основі шаруватих спітронних МНС (далі – просто МНС) базується на ефекті STT та т.зв. діодному ефекті [11]. Останній полягає у тому, що під дією зовнішнього НВЧ струму $I(t) = I_{RF} \sin(\omega t)$ у вільному магнітному шарі (free magnetic layer, FL) структури виникають коливання намагніченості на частоті зовнішнього НВЧ сигналу ω . Відповідно, магнітоопір МНС $R(t) = R_{DC} + R_{RF} \sin(\omega t + \varphi)$ також змінюється з частотою ω . Отже, на детекторі виникає постійна напруга $U_{DC} = \langle I(t)R(t) \rangle = 0.5 I_{RF} R_{RF} \cos \varphi$, де $\langle \dots \rangle$ означає операцію усереднення по часу за період коливань НВЧ сигналу $2\pi/\omega$, φ – початкова фаза коливань магнітоопору (рис. 1).

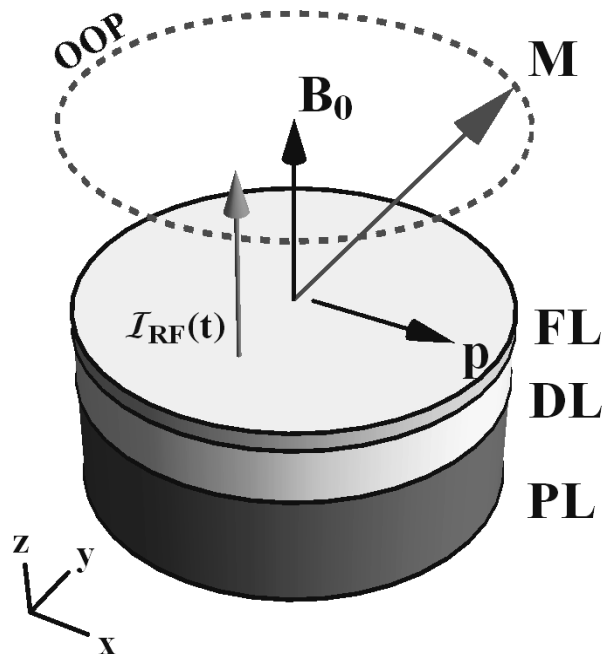


Рис. 1 Модель трьохшарової циліндричної МНС радіуса R : FL – «вільний» магнітний шар, DL – немагнітний прошарок – металевий (Cu) або діелектричний (MgO), PL – «закріпленний» магнітний шар. Під дією електричного струму $I(t) = I_{DC} + I_{RF}(t)$ у FL збуджується прецесія вектора намагніченості \mathbf{M} . Тут \mathbf{p} – одиничний вектор, що визначає напрямок намагніченості у PL; \mathbf{B}_0 – зовнішнє постійне магнітне поле підмагнічування

Відомі два суттєво різних режими роботи спітронних магнітних нанодетекторів (СМНД): резонансний квадратичний режим [11, 12, 16, 19, 21] та нерезонансний пороговий режим роботи детектора [22]. Перший режим роботи реалізується за умов збудження слабким зовнішнім НВЧ сигналом малих коливань намагніченості у FL і характеризується квадратичною залежністю U_{DC} від I_{RF} . Другий режим роботи детектора, який розглядається нижче, відповідає випадку збудження зовнішнім НВЧ сигналом позаплощинної (out-of-plane, OOP) прецесії намагніченості з великим кутом прецесії у FL. Цей режим роботи СМНД був вперше відкритим для МНС, поміщених у слабке перпендикулярне постійне магнітне поле ($B_0 < \mu_0 M_0$, μ_0 – магнітна стала, M_0 – намагніченість насичення FL) (див. рис. 1). Як було показано в [21, 22] у цьому режимі роботи детектор працює як нерезонансний пороговий детектор низькочастотних мікрохвильових сигналів.

Метою даної роботи є дослідження впливу частоти зовнішнього НВЧ сигналу та амплітуди постійного поля підмагнічування на ширину гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$ у згаданому нерезонансному пороговому режимі роботи СМНД. Тут I_{th}^{high} – верхній поріг гістерезису, а I_{th}^{low} – нижній поріг гістерезису на типовій залежності вихідної напруги детектора U_{DC} від амплітуди вхідного НВЧ струму I_{RF} (рис. 2).

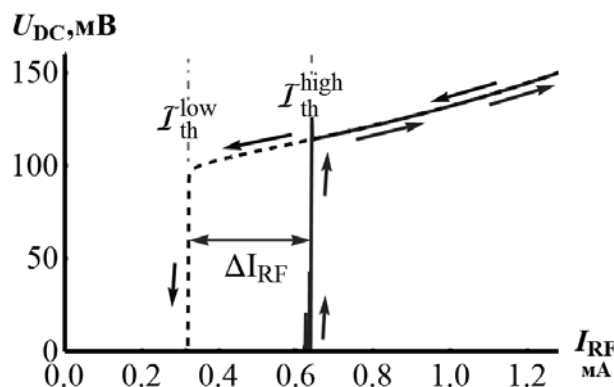


Рис. 2 Типова залежність вихідної напруги детектора U_{DC} від амплітуди вхідного НВЧ струму I_{RF} , яка ілюструє наявність гістерезису з шириною $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$

Числова модель

У роботі розглядався СМНД на основі циліндричного наностовпчика з поперечним перерізом круглої форми (див. рис. 1). Постійне магнітне поле підмагнічування було направлено перпендикулярно до площини магнітних шарів структури, а його амплітуда B_0 могла змінюватись у межах від 100 мТл до 800 мТл. Геометричні та магнітні параметри структури були обрані виходячи з типових експериментальних значень [11, 13]: радіус FL $R = 50$ нм, товщина FL $L = 1$ нм, намагніченість насичення FL $\mu_0 M_0 = 800$ мТл, стала згасання Гільберта для матеріалу FL $\alpha = 0.01$. Ефективність спінової поляризації носіїв заряду $P = 0.7$.

Припускалось, що намагніченість закріпленого магнітного шару структури (pinned magnetic layer, PL) є нерухомою, а рух намагніченості у FL може бути описаним у наближенні «макроспіну». Вплив температури та шумів на динаміку намагніченості у FL не враховувалось.

Динаміка намагніченості FL $\mathbf{M} = m\mathbf{M}_0$ описувалась рівнянням Ландау–Ліфшиця–Гільберта–Слончевського [1, 2, 15]:

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma \mathbf{B}_{\text{eff}} \times \mathbf{m} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} + \sigma I(t) \mathbf{m} \times \mathbf{m} \times \mathbf{p}, \quad (1)$$

де $\gamma \approx 2\pi \cdot 28 \text{ ГГц/Тл}$, \mathbf{B}_{eff} – ефективне магнітне поле, яке є суперпозицією зовнішнього постійного магнітного поля $\mathbf{z}B_0$ та поля розмагнічування $-\mathbf{z}\mu_0 M_0$ (наближення тонкої плівки). Коефіцієнт σ задавався як

$$\sigma = \frac{\sigma_{\perp}}{1 + P^2 \cos \beta}, \quad \sigma_{\perp} = \frac{\gamma \hbar}{2e} \frac{P}{M_0 \pi R^2 L}, \quad (2)$$

де $\beta = \mathbf{m} \cdot \mathbf{p}$, $\hbar = h / 2\pi$, h – стала Планка, e – елементарний електричний заряд, \mathbf{p} – одиничний вектор у напрямку намагніченості закріпленого шару – вважалось, що $\mathbf{p} = \mathbf{x}$. $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ – орти картезіанської системи координат x, y, z .

Рівняння (1) розв'язувалось числовими методами в пакеті Mathematica. Як результат було визначено залежність $\mathbf{m} \equiv \mathbf{m}(t)$. Далі, використовуючи вираз для мікрохвильового магнітоопору наноструктури (при $R_{DC} = 0$),

$$R(t) = \frac{R_{\perp}}{1 + P^2 \cos \beta}, \quad (3)$$

числовими методами було розраховано постійну напругу на виході детектора:

$$U_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{RF} \sin(\omega t) R(t) dt. \quad (4)$$

У формулах (3)–(4): R_{\perp} – характерний опір структури при $\beta = \pi / 2$, $T = 2\pi / \omega$.

Результати та їх аналіз

На рис. 2 показана типова залежність вихідної напруги детектора від вхідного НВЧ струму $U_{DC}(I_{RF})$, розрахована для випадку $R_{\perp} = 1 \text{ кОм}$, $B_0 = 200 \text{ мТл}$, $\omega / 2\pi = f = 3 \text{ ГГц}$. Видно, що на залежності $U_{DC}(I_{RF})$ спостерігається сильний гістерезис. При повільному зростанні амплітуди НВЧ струму I_{RF} ненульова вихідна напруга на детекторі з'являється лише при $I_{RF} > I_{th}^{\text{high}}$, де I_{th}^{high} – верхній поріг гістерезису. В той же час, якщо в режимі стабільної динаміки (тобто при $I_{RF} > I_{th}^{\text{high}}$) почати зменшувати амплітуду зовнішнього сигналу, ненульова вихідна напруга на детекторі буде існувати поки амплітуда струму I_{RF} буде більшою за нижній поріг гістерезису I_{th}^{low} ($I_{RF} > I_{th}^{\text{low}}$). Характерним

параметром такого гістерезису є його ширина $\Delta I_{RF} = I_{th}^{\text{high}} - I_{th}^{\text{low}}$.

У пороговому режимі роботи детектора зовнішній сигнал збуджує позаплощинну прецесію намагніченості навколо напрямку ефективного поля $\mathbf{B}_{\text{eff}} = \mathbf{z}B_{\text{eff}} = \mathbf{z}(B_0 - \mu_0 M_0)$. Відповідно, величини порогів I_{th}^{high} та I_{th}^{low} виявляються залежними від амплітуди поля підмагнічування B_0 . Крім того, враховуючи, що пороговий режим роботи детектора можливий лише в області частот $f^{\text{low}} < f < f^{\text{high}}$, де $f^{\text{low}} \approx 1 \text{ ГГц}$, $f^{\text{high}} \approx \gamma B_0 / 2\pi$, ширина гістерезису має залежати від частоти НВЧ сигналу f та амплітуди поля підмагнічування B_0 .

Характерні залежності $I_{th}^{\text{high}}(B_0)$, $I_{th}^{\text{low}}(B_0)$ показані на рис. 3. Видно, що із збільшенням амплітуди поля підмагнічування B_0 величини верхнього та нижнього порогів гістерезису зменшуються за різним законом. Відповідно, ширина гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{\text{high}} - I_{th}^{\text{low}}$ зростає із збільшенням амплітуди поля в області малих полів ($B_0 < 200 \text{ мТл}$), але при полях $B_0 > 200 \text{ мТл}$ ширина гістерезису ΔI_{RF} фактично перестає залежати від B_0 . Це свідчить про те, що вже при амплітудах поля $B_0 \approx \mu_0 M_0 / 4$ створюються належні сприятливі умови для збудження ООР прецесії намагніченості. Відповідно, подальше збільшення амплітуди поля не призводить до зміни умов збудження коливань намагніченості при $I_{RF} \geq I_{th}^{\text{high}}$ порівняно з умовами зникнення таких коливань при $I_{RF} \leq I_{th}^{\text{low}}$.

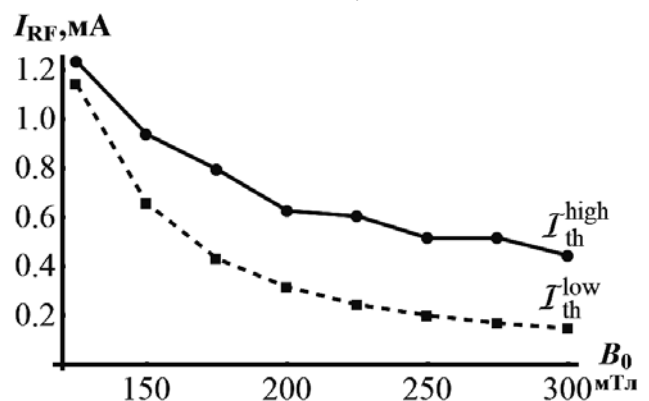


Рис. 3 Залежність порогових струмів детектора від амплітуди зовнішнього поля підмагнічування

З рис. 3 також випливає, що абсолютні значення порогів гістерезису I_{th}^{high} , I_{th}^{low}

зменшуються із збільшенням амплітуди поля підмагнічування B_0 , оскільки велике поле підмагнічування сприяє збудженню саме ООР прецесії намагніченості. При малих амплітудах поля B_0 величини порогів є доволі великими, а ширина гістерезису досить малою, оскільки умови збудження ООР прецесії намагніченості при $B_0 < 150$ мТл суттєво погіршуються. Отже, величиною порогів збудження I_{th}^{high} , I_{th}^{low} , як і шириною гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$ можна керувати шляхом зміни амплітуди постійного поля підмагнічування B_0 .

На рис. 4 показано залежності порогів $I_{th}^{high}(f)$, $I_{th}^{low}(f)$ від частоти НВЧ струму f . Видно, що величини цих порогів монотонно зростають із збільшенням частоти f , оскільки більшій частоті прецесії f відповідає більший кут прецесії, що означає необхідність збудження такої прецесії більшим НВЧ струмом. Видно також, що ширина гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$ майже не залежить від частоти сигналу в зазначеному діапазоні частот. З іншого боку, виходячи з того факту, що режим ООР прецесії є стабільним лише за умови $f < \gamma B_0 / 2\pi$ [21, 22], можна припустити, що в околі $f \sim \gamma B_0 / 2\pi \sim 5.6$ ГГц величини порогів та ширина гістерезису можуть зазнати суттєвих змін.

Таким чином, залежності представлені на рис. 3, 4 дозволяють оцінити величини порогів I_{th}^{high} , I_{th}^{low} та ширини гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$ для заданих частоти НВЧ сигналу та амплітуди поля підмагнічування. Величинами цих порогів та шириною гістерезису можна керувати шляхом зміни величини постійного поля підмагнічування.

Список використаних джерел

1. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J.C. Slonczewski // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1996. – **159**. – P. L1–L7.
2. Berger L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current / L. Berger // *Phys. Rev.* – 1996. – **B54**. – P. 9353–9358.
3. Katine J.A. Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co/Cu/Co pillars / J.A. Katine, F.J. Albert, R.A. Buhrman, E.B. Mayers, D.C. Ralph // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – **84**. – P. 3149–3152.

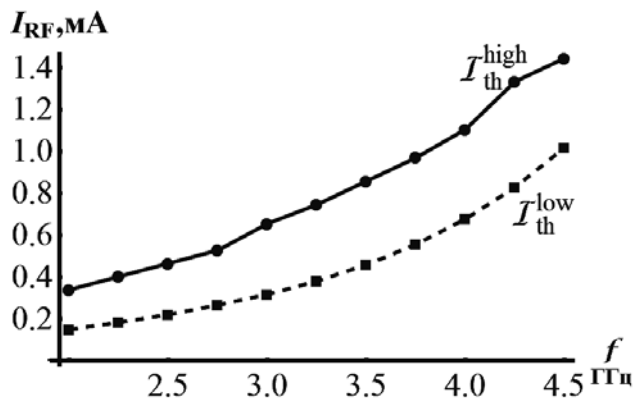


Рис. 4 Поведінка порогових струмів детектора при збільшенні частоти НВЧ струму f

Висновки

В роботі показано, що верхній та нижній порогові гістерезису нерезонансного порогового СМНД, I_{th}^{high} та I_{th}^{low} відповідно, нелінійним чином залежать від частоти НВЧ сигналу, що детектується, та амплітуди поля підмагнічування B_0 . В свою чергу, ширина гістерезису $\Delta I_{RF} = I_{th}^{high} - I_{th}^{low}$ помітно зростає із збільшенням амплітуди поля в області малих полів ($B_0 < 200$ мТл), але при полях $B_0 > 200$ мТл фактично перестає залежати від B_0 . Це передбачає можливість керування величинами порогів I_{th}^{high} та I_{th}^{low} , а також величиною ΔI_{RF} за рахунок зміни амплітуди постійного поля підмагнічування B_0 , що може бути корисним при розробці та оптимізації мікрохвильових систем обробки даних на основі спінтронних МНС.

Робота була підтримана грантом UU34/008 Державного фонду фундаментальних досліджень України.

References

1. SLONCZEWSKI, J.C. (1996) Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magn. and Magn. Materials*. 159 (1-2). p.L1–L7.
2. BERGER, L. (1996) Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current. *Physical Review B*. 54 (13). p. 9353-9358.
3. KATINE, J.A., ALBERT, F.J., BUHRMAN, R.A., MAYERS, E.B. and RALPH, D.C. (2000) Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co/Cu/Co pillars. *Physical Review Letters*. 84 (14). p. 3149-3152.

4. Urazhdin S. Current-Driven Magnetic Excitations in Permalloy-Based Multilayer Nanopillars / S. Urazhdin, N.O. Birge, W.P. Pratt, Jr., J. Bass // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – **91**. – P. 146803-1 – 146803-3.
5. Kiselev S.I. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current / S.I. Kiselev, J.C. Sankey, I.N. Krivorotov, N.C. Emley, R.J. Schoelkopf, R.A. Buhrman, D.C. Ralph // *Nature*. – 2003. – **425**. – P. 380–383.
6. Lee K.J. Excitations of incoherent spin waves due to spin-transfer torque / K.J. Lee, A. Deac, O. Redon, J.-P. Nozieres, B. Dieny // *Nature Mater.* – 2004. – **3**. – P. 877–881.
7. Krivorotov I.N. Time-domain measurements of nanomagnet dynamics driven by spin-transfer torques / I.N. Krivorotov, N.C. Emley, J.C. Sankey, S.I. Kiselev, D.C. Ralph, R.A. Buhrman // *Science*. – 2005. – **307**. – P. 228–231.
8. Kaka S. Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators / S. Kaka, M.R. Pufall, W.H. Rippard, T.J. Silva, S.E. Russek, J.A. Katine // *Nature*. – 2005. – **437**. – P. 389–392.
9. Mancoff F.B. Phase-locking in double-point-contact spin-transfer devices / F.B. Mancoff, N.D. Rizzo, B.N. Engel, S. Tehrani // *Nature*. – 2005. – **437**. – P. 393–395.
10. Ruotolo A. Phase-locking of magnetic vortices mediated by antivortices / A. Ruotolo, V. Cros, B. Georges, A. Dussaux, J. Grollier, C. Deranlot, R. Guillemet, K. Bouzehouane, S. Fusil, A. Fert // *Nature Nanotech.* – 2009. – **4**. – P. 528–532.
11. Tulapurkar A.A. Spin torque diode effect in magnetic tunnel junctions / A.A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Djayaprawira, N. Watanabe, S. Yuasa // *Nature*. – 2005. – **438**. – P. 339–342.
12. Ishibashi S. Large diode sensitivity of CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions / S. Ishibashi, T. Seki, T. Nozaki, H. Kubota, S. Yakata, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D.D. Djayaprawira, // *Appl. Phys. Express*. – 2010. – **3**. – P. 073001-1 – 073001-3.
13. Cheng X. Nonadiabatic stochastic resonance of a nanomagnet excited by spin torque / X. Cheng, C.T. Boone, J. Zhu, I.N. Krivorotov // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – **105**. – P.047202.
14. Cheng X. Spin Torque Diode Detectors with Sensitivity Exceeding that of Schottky Diodes / X. Cheng, C.T. Boone, J. Zhu, I.N. Krivorotov // Abstracts of the 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, **EC-3**, Atlanta, Georgia, USA, November 2010.
4. URAZH DIN, S., BIRGE, N.O., and BASS, J. (2003) Current-Driven Magnetic Excitations in Permalloy-Based Multilayer Nanopillars. *Phys. Rev. Lett.* 91 (14). p. 146803-1 – 146803-3.
5. KISELEV, S.I., SANKEY, J.C., KRIVOROTOV, I.N., EMLEY, N.C., and RALPH, D.C. (2003) Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current. *Nature*. 425 (September). p. 380-383.
6. LEE, K.J., DEAC, A., REDON, O., NOZIERES, J.-P. and DIENY, B. (2004) Excitations of incoherent spin waves due to spin-transfer torque. *Nature Materials*. 3 (12). p. 877-881.
7. KRIVOROTOV, I.N., EMLEY, N.C., SANKEY, J.C., RALPH, D.C. and BUHRMAN, R.A. (2005) Time-domain measurements of nanomagnet dynamics driven by spin-transfer torques. *Science*. 307 (5707). p. 228-231.
8. KAKA, S., PUFALL, M.R., RIPPARD, W.H., SILVA, T.J., and KATINE, J.A. (2005) Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators. *Nature*. 437 (7057). p. 389-392.
9. MANCOFF, F.B., RIZZO, N.D., ENGEL, B.N. and TEHRANI, S. (2005) Phase-locking in double-point-contact spin-transfer devices. *Nature*. 437 (7057). p.393-395.
10. RUOTOLO, A., CROS, V., GEORGES, B., DUSSAUX, A., GROLLIER, J., DERANLOT, C., GUILLEMET, R., BOUZEHOUE, K., FUSIL, S. and FERT, A. (2009) Phase-locking of magnetic vortices mediated by antivortices. *Nature nanotechnology*. 4 (8). p. 528-532.
11. TULAPURKAR, A.A., SUZUKI, Y., FUKUSHIMA, A., KUBOTA, H., MAEHARA, H., TSUNEKAWA, K., DJAYAPRAWIRA, D.D., WATANABE, N. and YUASA, S. (2005) Spin torque diode effect in magnetic tunnel junctions. *Nature*. 438 (7066). p. 339-342.
12. ISHIBASHI, S., SEKI, T., NOZAKI, T., KUBOTA, H., YAKATA, S., FUKUSHIMA, A., YUASA, S., MAEHARA, H. and SUZUKI, Y. (2010) Large diode sensitivity of CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. *Applied Physics Express*. 3 (7). p. 073001-(1-3).
13. CHENG, X., BOONE, C.T., ZHU, J. and KRIVOROTOV, I.N. (2010) Nonadiabatic stochastic resonance of a nanomagnet excited by spin torque. *Phys. Rev. Lett.* 105 (4). p. 047202.
14. CHENG, X., BOONE, C.T., ZHU, J. and KRIVOROTOV, I.N. (2010) Spin Torque Diode Detectors with Sensitivity Exceeding that of Schottky Diodes. In *Abstracts of the 55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials*. Atlanta, Georgia, November 2010.

15. *Ralph D.C.* Spin transfer torques / D.C. Ralph, M.D. Stiles // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2008. – **320**. – P. 1190–1216.
16. *Wang C.* Sensitivity of spin-torque diodes for frequency tunable resonant microwave detection / C. Wang, Y.-T. Cui, J.Z. Sun, J.A. Katine, R.A. Buhrman, D.C. Ralph // *J. Appl. Phys.* – 2009. – **106**. – P. 053905-1 – 053905-7.
17. *Slavin A.* Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current / A. Slavin, V. Tiberkevich // *IEEE Trans. on Magn.* – 2009. – **45**, № 4. – P. 1875–1918.
18. *Prokopenko O.* Spin-torque nano-oscillator as a microwave signal source / O. Prokopenko, E. Bankowski, T. Meitzler, V. Tiberkevich, A. Slavin // *IEEE Magnetics Letters.* – 2011. – № 2. – P. 3000104-1 – 3000104-3.
19. *Prokopenko O.* Noise properties of a resonance-type spin-torque microwave detector / O. Prokopenko, G. Melkov, E. Bankowski, T. Meitzler, V. Tiberkevich, A. Slavin // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – **99**. – P. 032507-(1-3).
20. *Tang D.D.* Magnetic Memory. Fundamentals and Technology. / D.D. Tang, Y.-J. Lee. – N.-Y.: Cambridge University Press, 2010. – 208 p.
21. *Prokopenko O.V.* Spin-Torque Microwave Detectors / O.V. Prokopenko, I.N. Krivorotov, T.J. Meitzler, E. Bankowski, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin // In book: *Magnonics: From Fundamentals to Applications. Topics in Applied Physics (Vol. 125)* / Ed. S.O. Demokritov and A.N. Slavin. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – P. 143-161.
22. *Prokopenko O.V.* Spin-torque microwave detectors with out-of-plane precessing magnetic moment / O.V. Prokopenko, I.N. Krivorotov, E. Bankowski, T. Meitzler, S. Jaroch, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin // *Journal of Applied Physics.* – 2012. – Vol. 111. – P. 123904-(1-6).
15. RALPH, D.C. & STILES, M.D. (2008) Spin transfer torques. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 320 (7). p. 1190-1216.
16. WANG, C., CUI, Y.-T., SUN, J.Z., KATINE, J.A., BUHRMAN, R.A. and RALPH, D.C. (2009) Sensitivity of spin-torque diodes for frequency tunable resonant microwave detection. *Journal of App. Phys.*. 106 (5). p. 053905-(1-7).
17. SLAVIN, A. & TIBERKEVICH, V. (2009) Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current. *IEEE Transactions on Magnetics.* 45 (4). p.1875-1918.
18. PROKOPENKO, O., BANKOWSKI, E., MEITZLER, T., TIBERKEVICH, V. and SLAVIN, A. (2011) Spin-torque nano-oscillator as a microwave signal source. *IEEE Magnetics Letters.* 2 (January). p. 3000104-1 – 3000104-3.
19. PROKOPENKO, O., MELKOV, G., BANKOWSKI, E., MEITZLER, T., TIBERKEVICH, V. (2011) Noise properties of a resonance-type spin-torque microwave detector. *Applied Physics Letters.* 99 (3). p. 032507-(1-3).
20. TANG, D.D. & LEE, Y.-J. (2010) *Magnetic Memory. Fundamentals and Technology.* New York: Cambridge University Press.
21. PROKOPENKO, O.V., KRIVOROTOV, I.N., MEITZLER, T.J., BANKOWSKI, E., TIBERKEVICH, V.S. and SLAVIN, A.N. (2013) Spin-Torque Microwave Detectors. In: Demokritov, S.O. & Slavin, A.N. (eds.). *Magnonics: From Fundamentals to Applications. Topics in Applied Physics.* 125. Berlin: Springer-Verlag.
22. PROKOPENKO, O.V., KRIVOROTOV, I.N., BANKOWSKI, E., MEITZLER, T., JAROCH, S., TIBERKEVICH, V.S. and SLAVIN, A.N. (2012) Spin-torque microwave detectors with out-of-plane precessing magnetic moment. *Journal of Appl. Phys.* 111 (12). p. 123904-(1-6).

Надійшла до редколегії 10.04.2014