

4. Структурные и термоэлектрические свойства оптически прозрачных тонких пленок на основе одностенных углеродных нанотрубок / И.А. Тамбасов [и др.] // Физика твердого тела. – 2018. – Т.60, вып. 12. — С. 2456-2462.
5. Thermoelectric properties of WS₂ nanotube networks / H. Kawai [et al.] // Appl. Phys. Expr. — 2017. — Vol. 10 — P. 015001 (3 pp.).
6. Enhanced thermoelectric properties of tungsten disulfide-multiwalled carbon nanotube composites / Daewoo Suh [et al.] // Journal of Materials Chemistry. — 2012. — Vol. 22, № 40. — P. 21376-21381.
7. Enhanced Thermoelectric Properties of WS₂/Single-Walled Carbon Nanohorn Nanocomposites / J.H. Kim [et al.] // Crystals. — 2020. — Vol. 10, №. 4. — P. 140-150.
8. Electrical properties of carbon nanotubes/WS₂ nanotubes (nanoparticles) hybrid films / V.K. Ksenevich [et al.] // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. — 2016. — Vol. 7, № 3. — P. 37—43.
9. Комбинационное рассеяние света и механизмы электропроводности в гибридных пленках из углеродных и неорганических нанотрубок / В.К. Кseneвич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. — Минск : БГУ, 2020. — С. 452–457.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА ЗАТУХАНИЯ НА КОЛЕБАНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ

А. В. Кухарев, Г. А. Неверовский, А. В. Петраковская

*Витебский государственный университет имени П.М. Машерова,
Московский пр-т 33, 210038 Витебск, Беларусь,
e-mail: kukharev.av@gmail.com*

Получены результаты микромагнитного моделирования колебаний намагниченности, возбуждаемых спин-поляризованным током по механизму переноса спина Слончевского-Берже в цилиндрической гетерогенной наноструктуре кобальт/медь/кобальт (5 нм/2 нм/5 нм) в отсутствии внешних магнитных полей. Определены конфигурации структуры, при которых колебания намагниченности в диске кобальта являются устойчивыми и незатухающими. Изучено влияние параметра затухания Гильберта на частоту колебаний и на пороговые токи, необходимые для возбуждения периодических (незатухающих) колебаний.

Ключевые слова: перенос спина; спинтронный наноосциллятор; колебания намагниченности; ферромагнетная наноструктура.

INFLUENCE OF THE DAMPING PARAMETER ON MAGNETIZATION OSCILLATIONS EXCITED IN FERROMAGNETIC NANOSTRUCTURES BY SPIN-POLARIZED CURRENT

A. V. Kukharev, G. A. Neverovsky, A. V. Petrakovskaya

*Vitebsk State University named after P.M. Masherov, Moskovskiy Avenue, 33,
210038 Vitebsk, Belarus
Corresponding author: A. V. Kukharev (kukharev.av@gmail.com)*

The results of micromagnetic simulation of magnetization oscillations excited by a spin-polarized current through the Slonczewski-Berger spin transfer mechanism in a cylindrical heterogeneous cobalt/copper/cobalt (5 nm/2 nm/5 nm) nanostructure in the absence of external magnetic fields are obtained. We have determined the configurations of the structure for which magnetization oscillations in a cobalt disk are stable and undamped. The influence of the Gilbert damping parameter on the frequency of oscillations and on the threshold currents required for the excitation of periodic (undamped) oscillations has been studied.

Key words: spin transfer; spintronic nano-oscillator; magnetization oscillations; ferromagnet nanostructure.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект передачи спинового крутящего момента (spin-transfer torque effect) в ферромагнитных многослойных наноструктурах был предсказан Слончевским и Берже в 1996 г. [1–2] и в последующем подтвержден экспериментально. Данный эффект наблюдается в наноструктуре ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик при пропускании через нее электрического тока за счет поляризации потока электронов в первом ферромагнитном слое, имеющем закрепленную намагниченность, и рассеивании этого потока на втором ферромагнитном слое со свободной намагниченностью. На основе эффекта переноса спина могут создаваться такие приборы как спинтронные наноосцилляторы STNO (spin torque nano-oscillator) [3], а также элементы магнитной памяти с переключением намагниченности электрическим током. Спинтронные наноосцилляторы позволяют генерировать электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне узкой полосы. Одной из основных проблем устройств на эффекте переноса спина является высокая плотность тока, необходимая для переключения или генерации колебаний намагниченности. Кроме того, в большинстве работ изучение устойчивых периодических колебания намагниченности проводилось при приложении к структуре некоторого постоянного внешнего магнитного поля, которое служит для задания ориентации прецессии вектора намагниченности и обеспечивает устойчивость этой прецессии. Возможность возбуждения колебаний в отсутствие внешнего магнитного поля изучалась в работах [4–5] в рамках модели «макроспина», то есть в предположении однородности намагниченности свободного слоя. В этом случае ориентация прецессии зависит от направления магнитной кристаллографической анизотропии. Недостатком модели макроспина является то, что предсказанная частота может значительно отличаться от реальной частоты [6]. В настоящем исследовании возбуждение колебаний намагниченности спинполяризованным током в отсутствие внешнего магнитного поля изучается с помощью микромагнитного моделирования в пакете Mumax3, что позволяет получить более достоверные результаты. Кроме того, изучается влияние параметра затухания на частоту колебаний и пороговые токи, необходимые для генерации колебаний намагниченности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая структура представляет собой многослойную структуру вида ферромагнетик/ диамагнитный металл/ ферромагнетик ($\Phi 1/\text{ДМ}/\Phi 2$) со слоями в форме дисков нанометровой толщины, через которую пропускается электрический ток перпендикулярно слоям, так что электроны движутся в направлении от слоя $\Phi 1$ к слою $\Phi 2$. Направление намагниченности s слоя $\Phi 1$ закреплено с помощью вспомогатель-

ного антиферромагнитного слоя АФ. Направление намагниченности слоя Ф2 считается свободным.

В слое Ф1 поток электронов приобретает определенную спиновую поляризацию и при попадании в слой Ф2 спины электронов проводимости вынуждены адаптироваться к направлению намагниченности этого слоя. Благодаря локальному сохранению момента количества движения возникает вращающий момент, действующий на атомы слоя Ф2. Диамагнитная прослойка ДМ нанометровой толщины между ферромагнитными дисками сохраняет спиновую поляризацию электронов и служит для уменьшения обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями.

В качестве материала ферромагнитных слоев будем использовать кобальт со следующими параметрами: намагниченность насыщения $M_S = 1.43 \cdot 10^6$ А/м, обменная константа $A_{ex} = 1.54 \cdot 10^{-11}$ Дж/м, константа магнитокристаллической анизотропии $K_1 = 5.2 \cdot 10^4$ Дж·м³ и степень спиновой поляризации $P = 0,37$. Диаметр слоя Ф2 равен $D = 20$ нм, толщина $d = 5$ нм.

Моделирование намагниченности диска кобальта Ф2 будем проводить с помощью программы микромагнитного моделирования MuMax3 [7], в котором прецессия вектора намагниченности \mathbf{m} свободного слоя Ф2 описывается уравнением Ландау-Лифшица с учетом вращающего момента Слончевского-Берже:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ([\mathbf{m} \times \mathbf{H}] + \alpha [\mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times \mathbf{H}]]) + \beta \frac{\epsilon - \alpha \epsilon'}{1 + \alpha^2} [\mathbf{m} \times [\mathbf{s} \times \mathbf{m}]] - \beta \frac{\epsilon' - \alpha}{1 + \alpha^2} [\mathbf{m} \times \mathbf{s}],$$

где α – параметр затухания Гильберта, γ – гиромангнитное отношение, \mathbf{H} – эффективное магнитное поле, которое включает в себя внешнее поле, размагничивающее поле, обменное поле и поле магнитной кристаллографической анизотропии, $\beta = \hbar / (M_S e d)$, e – заряд электрона. Параметр ϵ определяется по формуле:

$$\epsilon = \frac{P \Lambda^2}{(\Lambda^2 + 1) + (\Lambda^2 - 1)(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s})},$$

где Λ – параметр Слончевского, характеризующий диамагнитную прослойку [8], и ϵ' – вторичный параметр спинового вращающего момента Слончевского. При моделировании будем полагать $\Lambda = 0,2$ и $\epsilon' = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования устойчивые колебания намагниченности диска кобальта в отсутствие внешнего магнитного поля были обнаружены только в случае, когда направление намагниченности \mathbf{s} слоя Ф1 и направление кристаллографической анизотропии \mathbf{n} слоя Ф2 направлены вдоль оси структуры. При направлениях векторов \mathbf{s} и \mathbf{n} вдоль других координатных осей колебания намагниченности были неустойчивыми и быстро затухали независимо от плотности пропускаемого тока и при любом значении параметра затухания α в диапазоне от 0,01 до 1,0. Поэтому дальнейшие результаты моделирования представлены для случая, когда \mathbf{s} и \mathbf{n} коллинеарны и направлены вдоль оси структуры.

На рисунке 1 показана зависимость частоты колебаний от параметра затухания α . Из результатов моделирования видно, что частота колебаний намагниченности уменьшается с ростом параметра затухания α и увеличивается с ростом плотности

тока j . При $\alpha \geq 0,2$ плотности тока $0,5 \times 10^{12}$ А/м² оказывается уже недостаточной для возбуждения устойчивых периодических колебаний (поэтому на графике данная кривая обрывается в точке $\alpha = 0,1$).

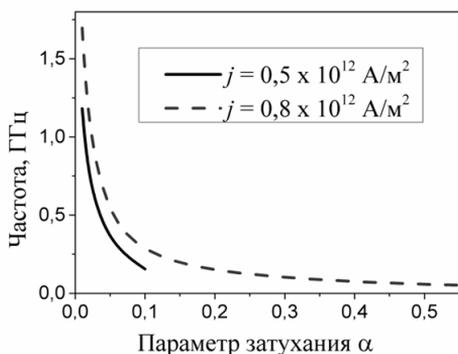


Рисунок 1. Влияние параметра затухания α на частоту колебаний намагниченности

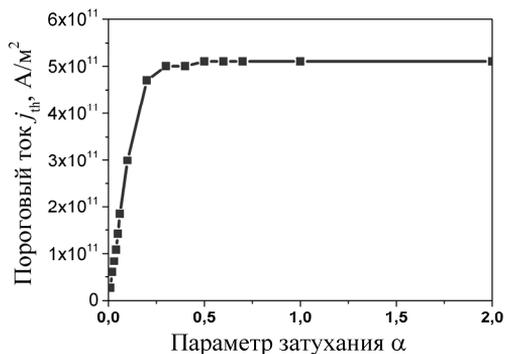


Рисунок 2. Зависимость плотности порогового тока, необходимого для возбуждения колебаний намагниченности, от параметра затухания α

На рисунке 2 показана зависимость минимального порогового тока j_{th} , необходимого для возбуждения колебаний намагниченности, от параметра затухания α . Из рисунка видно, что в диапазоне значений α от 0,01 до 0,2 пороговый ток j_{th} практически линейно зависит от параметра затухания. Так, при $\alpha = 0,01$ пороговый ток равен $0,027 \times 10^{12}$ А/м², а при $\alpha = 0,1$ соответственно $0,30 \times 10^{12}$ А/м². Однако при $\alpha > 0,2$ пороговый ток практически не зависит от α и имеет постоянное значение $(0,51 \pm 0,01) \times 10^{12}$ А/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством микромагнитного моделирования установлено, что в цилиндрической гетерогенной наноструктуре кобальт/медь/кобальт (5 нм/2 нм/5 нм) могут возбуждаться колебания намагниченности по механизму переноса спина Слончевского-Берже в отсутствие внешнего магнитного поля, когда намагниченность закрепленного ферромагнитного слоя и ось легкого намагничивания свободного ферромагнитного слоя коллинеарны и направлены вдоль оси структуры (параллельно направлению тока). Частота колебаний намагниченности существенно зависит от параметра затухания Гильберта и составляет десятки мегагерц при больших значениях параметра затухания ($\alpha \sim 1$) и единицы гигагерц при малых значениях параметра затухания ($\alpha \sim 0,01$). Зависимость минимального порогового тока, необходимого для возбуждения колебаний намагниченности, от параметра затухания близка к линейной при малых значениях $\alpha \leq 0,1$. Таким образом, с целью снижения плотностей токов для возбуждения колебаний намагниченности необходимо выбирать ферромагнитные материалы с низким параметром затухания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Slonczewski, J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. C. Slonczewski // J. Magn. Mater. – 1996. – Vol. 159. – P. L1–L7.

2. Berger, L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current / L. Berger // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 54, № 13. – P. 9353–9358.
3. Lv, G. Modeling of magnetization precession in spin-torque nano-oscillators with a tilted polarizer / G. Lv [et al.] // AIP Advances. – 2015. – Vol 5. – P. 077171.
4. Micromagnetic modeling of nanocontact spin-torque oscillators with perpendicular anisotropy at zero bias field / V. Puliafito [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 2008. – Vol. 44. – P. 2512–2515.
5. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/ немагнитный металл/ ферромагнетик под действием поляризованного по спину тока / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 9–19.
6. Звездин, А. К. Обобщенное уравнение Ландау–Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах / А. К. Звездин, К. А. Звездин, А. В. Хвальковский // УФН. – 2008. – Т. 178, № 4. – С. 436–442.
7. Vansteenkiste A. The design and verification of MuMax3 / A. Vansteenkiste [et al.] // AIP Advances. – 2014. – Vol 4. – P. 107133.
8. Xiao, J. Boltzmann test of Slonczewski's theory of spin-transfer torque / J. Xiao, A. Zangwill, M. Stiles // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 70. – P. 172405.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ИЗ CuO И Cu_2O , ЛЕГИРОВАННЫХ Zn ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ И ЦИНКА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

**М. Н. Коваленко¹, Н. А. Алексеенко², Е. С. Воропай¹,
Л. С. Рутковская¹, А. П. Зажогин¹**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4,
220030, Минск, Беларусь, e-mail: zajogin_an@mail.ru*

²⁾ *Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени
академика О.В. Романа» ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Беларусь
e-mail: alekseenkon@rambler.ru*

Изучено влияние энергии и количества сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового состава лазерной плазмы методом лазерной искровой спектроскопии (спектрометр LSS-1). Изучены возможности получения газочувствительных нанопленочных резисторов из CuO и Cu_2O легированных ZnO , с достаточно хорошими механическими и чувствительными характеристиками, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами на гибридную мишень, состоящую из склеенных между собой пластинок из меди М2 и цинка Ц0 на подложку из стеклотекстолита в атмосфере воздуха. Резистор напыляется на дорожку шириной 300 мкм, изготовленную в медной фольге на мишени из фольгированного стеклотекстолита. Проведены исследования влияния количества импульсов на процессы при целенаправленном формировании компонентного и зарядового составов лазерного факела направляемого на подложку. Оценены параметры чувствительности сенсора на аммиак, воду, уксусную кислоту.

Ключевые слова: оксиды меди; оксиды цинка; газочувствительные сенсоры; импульсное лазерное распыление; лазерная плазма; лазерная искровая спектроскопия.