

УДК 537.612

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В НАНОСТРУКТУРЕ CoFeB/Cu/CoFeB
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ТОКА

Кухарев А.В., Господарик Е.А.

Витебский государственный университет имени П.М. Машерова, Витебск, Республика Беларусь,
kukharev.av@gmail.com

Аннотация: Получены результаты моделирования колебаний намагниченности, возникающие в наноструктуре CoFeB/Cu/CoFeB (5 нм/2 нм/5 нм) цилиндрической формы с перпендикулярной намагниченности закрепленного ферромагнитного слоя за счет эффекта переноса спина при больших плотностях пропускаемого электрического тока в отсутствие и наличии внешнего магнитного поля. В результате было показано, что в отсутствие внешнего магнитного поля зависимость частоты колебаний от плотности пропускаемого тока в такой структуре близка к линейной в диапазоне до 17 ГГц.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Эффект переноса спина, открытый Слончевским и Берже [1-2], наблюдается в многослойных наноструктурах ферромагнетик/диамангнитный металл/ферромагнетик при пропускании через них электрического тока. За счет поляризации потока электронов в первом ферромагнитном слое с закрепленной намагниченностью и рассеивании этого потока на кристаллической решетке второго ферромагнитного слоя со свободной намагниченностью происходит передачи спиного крутящего момента атомам решетки этого слоя. В результате в ферромагнитном слое могут возбуждаться колебания намагниченности. На основе эффекта переноса спина могут разрабатываться такие приборы как спинтронные наноосцилляторы (spin torque nano-oscillator) с возможностью генерации электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне узкой полосы [3], а также элементы магнитной памяти с переключением намагниченности электрическим током. Спинтронные наноосцилляторы позволяют генерировать электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне узкой полосы.

В ранних исследованиях эффекта переноса спина устойчивые периодические колебания намагниченности удавалось получить только при приложении к структуре некоторого постоянного внешнего магнитного поля, которое служит для задания ориентации прецессии вектора намагниченности. Позже была предложена конфигурация структуры с перпендикулярной намагниченности закрепленного ферромагнитного слоя, в которой генерация колебаний возможна и в отсутствие внешнего магнитного поля [4-5]. В такой структуре ориентация прецессии вектора намагниченности определяется направлением магнитной кристаллографической анизотропии.

Одним из важных вопросов при разработке спинтронных наноосцилляторов на основе эффекта переноса спина является управление частотой колебаний намагниченности, а также синхронизация отдельных наноосцилляторов для получения сигнала достаточной мощности. На частоту колебаний могут влиять как внутренние параметры самой структуры, так и внешние факторы, например напряженность внешнего магнитного поля.

Целью настоящего исследования является установление зависимости частоты колебаний намагниченности в наноструктуре CoFeB/Cu/CoFeB цилиндрической формы с перпендикулярной намагниченности закрепленного ферромагнитного слоя от плотности пропускаемого через структуру спин-поляризованного тока, а также определение максимальной и минимальной плотности тока, при которой возможны устойчивые колебания намагниченности.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая наноструктура представляет собой многослойную структуру вида ферромагнетик/диамангнитный металл/ферромагнетик (Ф1/ДМ/Ф2) со слоями в форме дисков нанометровой толщины. Через структуру пропускается электрический ток перпендикулярно слоям. Направление намагниченности слоя Ф1 закреплено с помощью вспомогательного антиферромагнитного слоя АФ. Направление намагниченности слоя Ф2 считается свободным. Поток электронов, проходя через слой Ф1, приобретает спиновую поляризацию. При попадании в слой Ф2 спины электронов проводимости адаптируются к направлению намагниченности этого слоя, что благодаря локальному сохранению момента количества движения приводит к возникновению вращающего момента, действующего на

атомы слоя Ф2. Нанометровая диамагнитная прослойка ДМ служит для уменьшения обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями.

Моделирование изменения направления намагниченности свободного слоя Ф2 под действием поляризованного по спину тока будем проводить в приближении макроспина (когерентного вращения магнитных моментов) с использованием уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта-Слончского-Берже [6], записанного в сферической системе координат (r, θ, φ) следующим образом:

$$\begin{cases} \sin \theta \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\alpha h_\varphi - h_\theta}{1 + \alpha^2} - g(\theta, \varphi) J s_\theta \\ \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{h_\varphi + \alpha h_\theta}{1 + \alpha^2} - g(\theta, \varphi) J s_\varphi \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} s_\theta &= s_x \cos \theta \cos \varphi + s_y \cos \theta \sin \varphi - s_z \sin \theta, \\ s_\varphi &= -s_x \sin \varphi + s_y \cos \varphi. \end{aligned}$$

Здесь α – параметр затухания Гильберта, \mathbf{h} – суммарное магнитное поле, \mathbf{s} – единичный вектор вдоль направления намагниченности закрепленного слоя Ф1. Выражения для h_θ и h_φ в сферической системе координат имеют такой же вид как и для s_θ и s_φ . Безразмерная величина $J = j\hbar/(\mu_0 e d M^2)$ пропорциональна плотности тока j (μ_0 – магнитная постоянная, e – элементарный заряд, d – толщина слоя Ф2, M – намагниченность насыщения).

Функция

$$g(\theta, \varphi) = [(3 + \mathbf{m}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{s})\beta - 4]^{-1}$$

называется коэффициентом передачи спина Слончского-Берже [1], где $\beta = (1 + P)^3 / (4P^{3/2})$, P – степень спиновой поляризации ферромагнетика закрепленного слоя.

Магнитное поле \mathbf{h} включает в себя размагничивающее поле и поле магнитной кристаллографической анизотропии $\mathbf{h}_a = k_a(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})\mathbf{n}$, где $k_a = 2K_a/(\mu_0 M^2)$, K_a – константа магнитной кристаллографической анизотропии и \mathbf{n} – направление оси легкого намагничивания ферромагнетика Ф2.

В ходе моделирования в качестве ферромагнитного материала свободного слоя Ф2 использовался $(\text{Co}_{35}\text{Fe}_{65})_{85}\text{B}_{15}$ с намагниченностью насыщения $M = 1,08 \times 10^6$ А/м, степенью спиновой поляризации $P = 0,5$ и нормированной константой магнитокристаллической анизотропии $k_a = 0,0088$, рассчитанной по данным экспериментальной работы [7]. Толщина ферромагнитного слоя Ф2 – 5 нм. Материал промежуточного диамагнитного слоя – медь, толщина слоя – 2 нм. Параметр затухания α зависит от материала и от размеров образца. Для материала CoFeB значение α лежит в пределах от 0,002 до 0,2 [7].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что устойчивые колебания намагниченности в свободном ферромагнитном слое Ф2 при отсутствии внешних магнитных полей возникают в том случае, когда направление намагниченности закрепленного слоя Ф1 и направление кристаллографической анизотропии слоя Ф2 параллельны и направлены вдоль оси структуры. Поэтому моделирование частоты колебаний будем проводить только для такой конфигурации. В других случаях колебания намагниченности являются неустойчивыми и быстро затухают.

На рис. 1 показана зависимость частоты F колебаний намагниченности от плотности пропускаемого тока j при параметрах затухания α , равном 0,02 и 0,2, в структуре CoFeB/Cu/CoFeB (5 нм/2 нм /5 нм). Видно, что зависимость частоты колебаний намагниченности от плотности пропускаемого тока в такой структуре близка к линейной при плотностях тока ниже некоторого критического значения. При $\alpha = 0,02$ максимальная частота колебания составляет 16,7 ГГц и достигается при плотности тока $0,025 \times 10^{12}$ А/м², а при $\alpha = 0,2$ соответственно 17,3 ГГц при плотности тока $0,204 \times 10^{12}$ А/м². При этом колебания являются устойчивыми и близки к гармоническим. Однако при дальнейшем увеличении плотности тока колебания намагниченности перестают быть гармоническими, а их частота начинает уменьшаться. При некоторой максимальной критической плотности тока устойчивых колебаний намагниченности не возникает вовсе. Это объясняется тем, что структура переходит в режим переключения направления намагниченности, когда эффективного магнитного поля оказывается достаточно для удерживания вектора намагниченности в определенном положении.

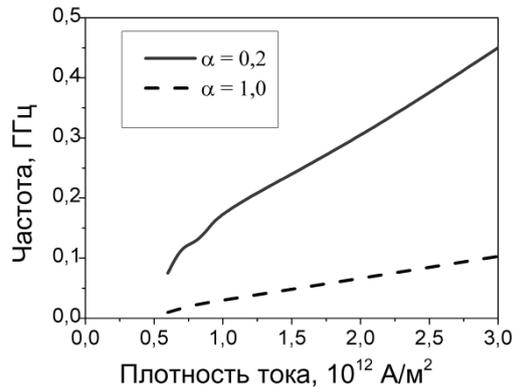


Рисунок 1. Зависимость частоты колебаний намагниченности от плотности пропускаемого тока в наноструктуре CoFeB/Cu/CoFeB при значениях параметра затухания 0,02 и 0,2

Такое поведение частоты колебаний намагниченности наблюдается при разных значениях параметра затухания Гильберта. Значение параметра затухания влияет только на угол наклона линейной части графика функции $F(j)$. При малых значениях параметра затухания для достижения максимальной частоты колебаний требуются меньшие плотности тока.

Изучено также влияние внешнего магнитного поля на колебания намагниченности при фиксированном параметре $J = 0,01$. Приложение внешнего магнитного поля вдоль оси y приводит к потере устойчивости колебательного процесса, в результате чего колебания намагниченности становятся затухающими. Периодические колебания имеют место только при приложении внешнего магнитного вдоль осей x и z .

При приложении внешнего магнитного поля вдоль оси x периодические колебания намагниченности наблюдаются при параметре затухания $\alpha = 0,02$ и не наблюдаются при $\alpha = 0,2$. При этом частота колебаний растет линейно от 8 до 62 ГГц при изменении величины магнитного поля от 0 до 1 отн. ед. При дальнейшем увеличении напряженности поля периодических колебаний намагниченности не наблюдается. При приложении внешнего магнитного поля вдоль оси z возможны колебания намагниченности от 0 до 62 ГГц. При этом при параметре затухания $\alpha = 0,02$ частота колебаний растет линейно при изменении величины поля от 1 до 3 отн. ед., а при дальнейшем увеличении напряженности поля частота колебаний остается постоянной. При параметре же затухания $\alpha = 0,02$ зависимость частоты колебаний намагниченности от величины поля имеет более сложный характер и требует дальнейшего изучения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что в наноструктуре CoFeB/Cu/CoFeB (5 нм/2 нм/5 нм) могут возникать устойчивые гармонические колебания намагниченности в отсутствие внешних магнитных полей при пропускании через структуру электрического тока за счет механизма переноса спина Слончевского-Берже. При этом частота колебаний намагниченности растет линейно с увеличением плотности пропускаемого тока до некоторого порогового значения. Максимальная частота колебаний составляет $17,0 \pm 0,3$ ГГц. При дальнейшем увеличении плотности тока частота колебаний начинается уменьшаться, а при плотности тока выше некоторого критического значения колебаний намагниченности не возникает. При приложении внешнего магнитного поля и фиксированном параметре $J = 0,01$ максимальная частота колебаний намагниченности для данной ферромагнитной структуры составила 62 ГГц.

Полученные результаты о частотных характеристиках колебаний намагниченности в многослойных ферромагнитных наноструктурах могут использоваться при разработке передатчиков микроволнового излучения на основе эффекта переноса спина. Наличие верхнего предела частоты колебаний намагниченности накладывает определенные ограничения на область применения таких устройств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Slonczewski, J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. C. Slonczewski // J. Magn. 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] Sato, R. Current-dependent linewidth of a spin-transfer nano-oscillator / R. Sato, Y. Saito, K. Mizushima // JMMM. – 2009. – Vol. 321. – P. 990–995.

SIMULATION OF MAGNETIZATION OSCILLATIONS IN CoFeB/Cu/CoFeB NANOSTRUCTURE
UNDER THE INFLUENCE OF SPIN-POLARIZED CURRENT

A. Kukharev, E. Gaspodarik

Vitebsk State University named after P.M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus, kukharev.av@gmail.com

Abstract: The simulation results of magnetization oscillations occurring in a cylindrical CoFeB/Cu/CoFeB (5 nm/2 nm/5 nm) nanostructure with perpendicular magnetization of the pinned ferromagnetic layer due to the spin-transfer effect at high current densities in the absence and presence of an external magnetic field have been obtained. The results showed that, in the absence of an external magnetic field, the dependence of the oscillation frequency on the current density in such a structure is nearly linear in the range up to 17 GHz.

Keywords: spintronic nano-oscillator; magnetization oscillations; ferromagnet nanostructure.