

# **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЛИПТИЧНОСТИ В СПИН-ТРАНСФЕРНЫХ НАНО-ОСЦИЛЛЯТОРАХ, СИНХРОНИЗОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

**Устинов К.А.**

магистр кафедры магнетизма Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Стрелков Н.В.**

к.ф.м.н., с.н.с. кафедры магнетизма Физического факультета МГУ имени  
М.В. Ломоносова

**Котельникова О.А.**

к.ф.м.н., доцент кафедры магнетизма Физического факультета МГУ имени  
М.В. Ломоносова

***Аннотация.** В настоящее время большой интерес представляют устройства на основе спинтроники – науки на стыке магнетизма и электроники. Нано-гетероструктуры с магнитным туннельным переходом (МТП) обычно имеют свободный слой в форме тонкого диска толщиной менее 10 нанометров и диаметром в несколько десятков. Использование спин-поляризованного тока, протекающего перпендикулярно гетероструктуре, позволяет, при определенных значениях тока, компенсировать диссипацию энергии за счет спин-трансферного эффекта и вызвать стационарную прецессию намагниченности свободного слоя. МТП-структуры такого типа называются спин-трансферными нано-осцилляторами (СТНО) и могут быть использованы в качестве источников СВЧ-излучения. Использование массивов СТНО позволяет увеличить излучаемую мощность. Важной особенностью таких гетероструктур является линейная зависимость частоты колебаний от приложенного напряжения. В данной работе исследуется влияние эллиптичности формы свободного слоя пары СТНО на качество синхронизации.*

**Ключевые слова:** спинтроника, спиновый торк, спин-трансферные нано-осцилляторы

## **ON INFLUENCE OF ELLIPTICITY IN SPIN-TRANSFER NANO-OSCILLATORS SYNCHRONIZED VIA DIPOLE-DIPOLE INTERACTION.**

**Ustinov K.A.**

5<sup>th</sup> year student at magnetism department of faculty of physics at Lomonosov MSU

**Strelkov N.V.**

Ph.D, lead scientist at magnetism department of faculty of physics at Lomonosov MSU

**Котельникова О.А.**

Ph.D, docent at magnetism department of faculty of physics at Lomonosov MSU

**Abstract.** Currently, devices based on spintronics, a science at the intersection of magnetism and electronics, are of great interest. Nano-heterostructures with a magnetic tunnel junction (MTJ)

usually have a free layer in the form of a thin disk with a thickness of less than 10 nanometers and a diameter of several tens. The use of a spin-polarized current flowing perpendicular to the heterostructure allows, at certain current values, to compensate for energy dissipation due to the spin-transfer effect and cause stationary precession of the magnetization of the free layer. MTJ structures of this type are called spin-transfer nano-oscillators (STNO) and can be used as sources of microwave radiation. The use of STNO arrays allows you to increase the radiated power. An important feature of such heterostructures is the linear dependence of the oscillation frequency on the applied voltage. This paper examines the influence of the ellipticity of the shape of the free layer of a STNO pair on the quality of synchronization.

**Keywords:** spintronics, spin-transfer torque, spin-transfer-nano-oscillators.

Исследование прецессии, возникающей из-за компенсации диссипации энергии прецессии намагниченности за счёт эффекта спинового торка, представляет большой интерес как с точки зрения фундаментального изучения динамики нано-размерных магнитных систем, так и с точки зрения создания модулируемых по частоте СВЧ-генераторов.

Однако мощность, создаваемая одиночным СТНО, находится в диапазоне от пикодо нановатт, чего недостаточно для каких-либо практических приложений. Увеличение выходной мощности СТНО необходимо их для успешного применения в качестве источников высокочастотного магнитного поля.

Перспективным методом усиления мощности генерируемого ВЧ-поля СТНО является использование массивов (десятков или сотен) когерентных нано-осцилляторов, синхронизируемых с помощью диполь-дипольного взаимодействия. Большая выгода этого метода заключается в том, что так как плотность энергии электромагнитного поля пропорциональна квадрату напряженности поля (то есть квадрату амплитуды), следовательно, мощность пропорциональна квадрату числа СТНО, прецессирующих синфазно. Этот массив позволяет создавать не только ВЧ-сигнал большой мощности, но и использовать эту систему для нейроморфных вычислений.

Для более детального понимания свойств массивов взаимодействующих СТНО необходимо рассмотреть взаимодействие двух СТНО. Ранее были рассмотрены: уединенный СТНО с эллиптичностью[1] и система из двух взаимодействующих круглых СТНО[2]. Наша идея заключается в объединении этих подходов.

Свободная энергия свободного слоя одиночной МТП-структуры, через которую течет ток с поляризацией  $\mathbf{p}$  выражается следующим образом:

$$E = -\mu_0 M_s \vec{H}_{ext} * \vec{m} + \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 \sum_{i=x,y,z} N_i^2 m_i \quad (0.1)$$

где  $\mathbf{m}$  – единичный вектор вдоль намагниченности свободного слоя,  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $\mathbf{H}_{ext}$  – внешнее однородное магнитное поле,  $N_i$  – диагональные компоненты тензора размагничивания. Динамика намагниченности описывается уравнением Ландау-Лифшица с релаксационным членом в форме Гильберта с дополнительными слагаемыми:

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma(\vec{m} \times \mu_0 \vec{H}_{eff}) + \alpha(\vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt}) - \gamma a_{||} V[\vec{m} \times [\vec{m} \times \vec{p}]] \quad (0.2)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение свободных электронов,  $\alpha$  – константа затухания Гильберта,  $a_{||}$  – феноменологическая спин-транспортная константа и  $V$  – приложенное напряжение,  $\xi_0$  – средний угол стационарной прецессии.

Эффективное поле рассчитывается из свободной энергии:

$$\vec{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\delta E}{\delta \vec{m}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H_z \end{pmatrix} - M_s \begin{pmatrix} N_x m_x \\ N_y m_y \\ N_z m_z \end{pmatrix} \quad (0.3)$$

Принимая во внимание постоянство по модулю вектора  $\mathbf{m}$ , в сферических координатах получим:

$$\omega_0 = \dot{\phi} = \gamma \frac{a_{\parallel} V}{\alpha} \quad (0.4)$$

Формула частоты стационарной прецессии одиночного СТНО с учетом его эллиптичности была получена ранее в работе 2022 года [1]:

$$f \approx \frac{1}{2\pi} (\omega_0 - N_{\parallel}^2 \frac{\omega_M^2}{\omega_0} \times [1 - \frac{\xi_0}{2} \frac{N_p \omega_M}{2\omega_0} + \frac{1}{2} (\frac{N_p \omega_M}{2\omega_0})^2]) \quad (0.5)$$

$$\omega_M = \gamma_0' M_s; \xi_0 = \cos \theta_0 = \frac{\alpha \omega_H + \omega_J}{\alpha N_p \omega_M}; \omega_J = \gamma_0' \frac{a_{\parallel} V}{\mu_0}; \omega_H = \gamma_0' H_z; \gamma_0' = \frac{\gamma \mu_0}{1 + \alpha^2};$$

$$N_p = N_z - \frac{N_x + N_y}{2}; N_{\parallel} = \frac{N_y - N_x}{2};$$

Если рассматривать систему из двух взаимодействующих СТНО, можно получить систему уравнений, которая решается численно:

$$\frac{d\vec{m}_{1,2}}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} ([\vec{m}_{1,2} \times \vec{H}_{eff1,2}] + \alpha [\vec{m}_{1,2} \times [\vec{m}_{1,2} \times \vec{H}_{eff1,2}]]) \quad (0.6)$$

$$\vec{H}_{eff1,2} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} + \frac{a_{\parallel} V}{\mu_0} [\vec{m}_{1,2} \times \vec{p}] - M_s \begin{pmatrix} N_x m_{x1,2} \\ N_y m_{y1,2} \\ N_z m_{z1,2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} D_x m_{x2,1} \\ D_y m_{y2,1} \\ D_z m_{z2,1} \end{pmatrix} \quad (0.7)$$

Численное решение проводилось в пакете Wolfram Mathematica. Исследовалась система из двух СТНО с эллиптичностью, ориентированных относительно друга двумя способами: длинными сторонами друг к другу и короткими сторонами друг к другу. В случае, когда частоты стационарной прецессии свободных слоев СТНО совпадали, система считалась синхронизованной.

Расстоянием синхронизации называется максимальное расстояние между краями пары СТНО, при которой прецессии их свободных слоев когерентны.

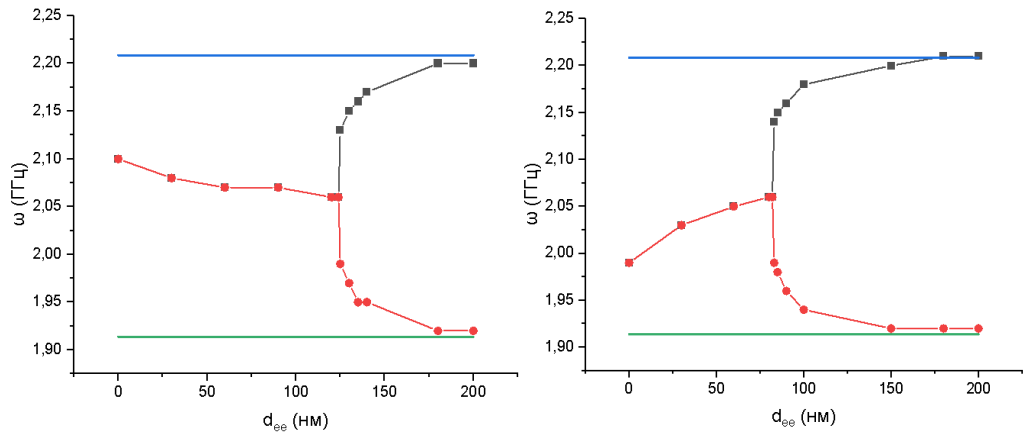
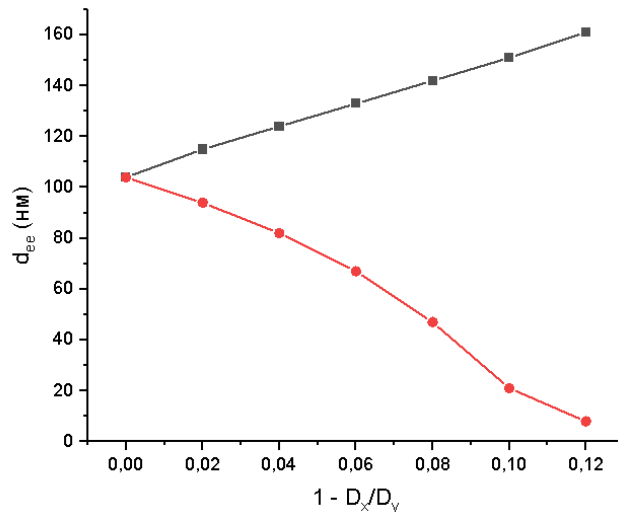


Рис. 1. График зависимости частоты синхронизации пары СТНО, повернутых длинными (слева) и короткими (справа) сторонами друг к другу. Чёрным обозначена частота первого СТНО, красным второго. Синяя и зеленая прямые обозначают стационарную прецессию с учетом эллиптичности для первого и второго изолированных СТНО соответственно, рассчитанные по формуле (1.5). Параметры системы:  $D_x = 50$  нм,  $D_y = 52$  нм,  $t = 3$  нм,  $V = 0.05$  В,  $\alpha = 0.01$ ,  $M_s = 10^6$  А/м,  $H_z = 0$  А/м,  $a_{\parallel 1} = 16$  мТл/В,  $a_{\parallel 2} = 14$  мТл/В

Из полученных данных (рис.1) следует, что способ расположения пары СТНО влияет на получаемое расстояние синхронизации (124 и 83 нм, для расположения длинными

сторонами друг к другу и короткими соответственно) и что лучший результат достигается при ориентации их длинными сторонами друг к другу.

На рис. 2 изображен график зависимости расстояния синхронизации от эллиптичности СТНО для 2х конфигураций. Согласно полученным данным, увеличение эллиптичности пары СТНО при их ориентации длинными сторонами друг к другу положительно сказывается на качестве синхронизации, а ориентация короткими сторонами негативно.



*Рис. 2: График зависимости расстояния синхронизации для пары СТНО с различной эллиптичностью. Черным цветом – СТНО, расположенные длинными сторонами друг к другу, красным цветом – короткими сторонами друг к другу. Остальные параметры системы такие же, как и на рис.1*

С помощью разработанной в работе модели рассчитаны зависимости частот стационарных прецессий свободных слоев двух СТНО с эллиптичностью, синхронизованных с помощью диполь-дипольного взаимодействия в различных конфигурациях. Анализируя полученные зависимости необходимо сделать вывод о предпочтительности ориентаций СТНО длинными сторонами друг к другу, так как такая конфигурация улучшает стабильность и критическое расстояние системы.

В рамках предложенной модели рассчитаны зависимости критических расстояний пары СТНО для конфигураций длинными и короткими сторонами друг к другу от эллиптичности пары СТНО. Было показано, что увеличение эллиптичности СТНО в конфигурации длинными сторонами улучшает стабильность и критическое расстояние, а в конфигурации короткими сторонами ухудшает.

#### **Список использованной литературы:**

1. Ю.Н. Шубин, М.Х. Машаев, А.В. Ведяев, Н.В. Стрелков. Частота спинтрансферного наноосциллятора на основе перпендикулярной туннельной наногетероструктуры с ненулевой эллиптичностью. ЖЭТФ, 161(5):746–752, 2022
2. Hao-Hsuan Chen, Ching-Ming Lee, Zongzhi Zhang, Yaowen Liu, Jong-Ching Wu, Lance Horng, and Ching-Ray Chang. Phase locking of spin-torque nano-oscillator pairs with magnetic dipolar coupling. Physical Review B, 93(22):224410, 2016.

