

ДИНАМИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ МАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ В СПИН-ВЕНТИЛЬНОМ НАНОСТОЛБЧАТОМ ГЕНЕРАТОРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЧ СИГНАЛА

А.Е. Екомасов, А.В. Хвальковский, К.А. Звездин, Е.Г. Екомасов

Спинтроника – область нанoeлектроники, исследующая магнитостатические и магнитодинамические свойства и спин-зависящий электронный транспорт в наноразмерных гетероструктурах. В 2007 году открытие эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС), положившее начало активным исследованиям в этой области, было удостоено Нобелевской премии по физике (А.Ферт, П.Грюнберг). В настоящее время эффекты магнитосопротивления уже используют в индустрии жёстких дисков. Большой интерес вызывает недавно обнаруженное явление переключения и возбуждения осцилляций намагниченности с помощью тока, поляризованного по спину. Эти явления обусловлены эффектом переноса спина, предсказанным Дж. Слончевским и Л. Берже в 1996 г. [1-2]. Необходимо отметить, что применение в подобных исследованиях методов микромагнетизма имеет принципиальное значение и открывает широкие возможности для анализа динамики магнитных структур, т.к. более точные ab-initio квантовые расчеты наноструктур практически невозможны из-за огромного числа степеней свободы. Поэтому индуцированная спиновым током динамика неоднородно намагниченной системы приближенно может быть описана обобщённым уравнением Ландау-Лифшица (ОУЛЛ), содержащим дополнительный вращательный момент $T_{s.t.} \equiv \gamma T$ (γ – гиромагнитное отношение) [3]:

$$\dot{\mathbf{M}} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M_s}[\mathbf{M} \times \dot{\mathbf{M}}] + T_{s.t.},$$

где \mathbf{M} – вектор намагниченности, M_s – намагниченность насыщения, α – параметр затухания Гильберта, эффективное поле \mathbf{H}_{eff} представляет собой сумму внешнего магнитного поля и полей магнитостатического, обменного взаимодействий и анизотропии. ОУЛЛ представляет собой сложное интегродифференциальное уравнение [3]. Возможности аналитических методов решения ОУЛЛ сильно ограничены из-за сложного вида спин-волновых возбуждений. Применение численных методов в общем случае здесь является адекватной техникой, а т.к. решение уравнения требует больших вычислительных ресурсов то очень подходит для применения суперкомпьютеров.

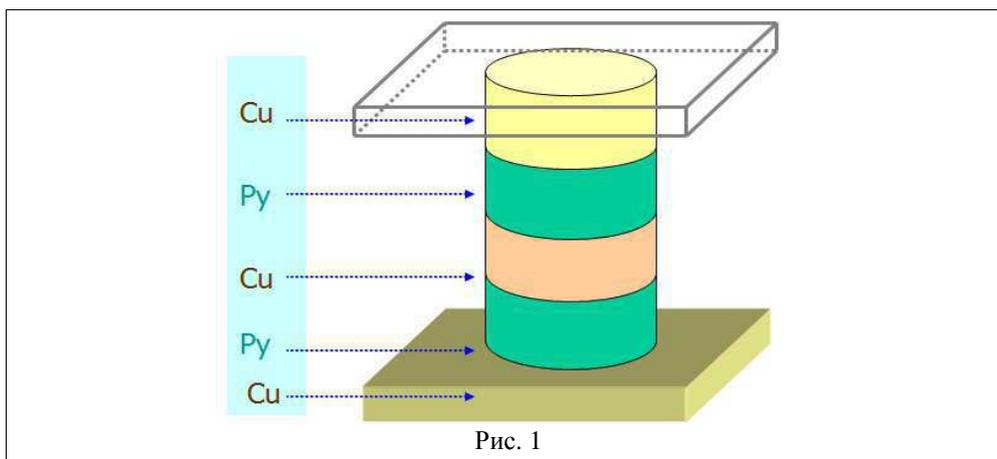
Возбуждённые с помощью переноса спинового момента осцилляции намагниченности в магнитных наноструктурах могут бы использованы для создания перспективных микроволновых приложений с перенастраиваемыми с помощью полей и токов частотами. Одним из перспективных приложений этих явлений является так называемый Спин-Трансферный Наногенератор (СТНГ) СВЧ, основанный на эффекте переноса спина. Большинство таких структур имеет два магнитных слоя, разделенных немагнитной прослойкой. При течении через них тока достаточно большой плотности в этой системе возникают осцилляции намагниченности на частоте порядка 0.3-3 ГГц. Благодаря эффекту ГМС или туннельного магнитосопротивления, сопротивление системы изменяется на той же частоте, что может быть использовано для создания наноразмерных генераторов СВЧ электрической энергии.

В данной работе для численного расчета магнитной структуры СТНГ и процессов перемагничивания используется уникальный пакет программ для микромагнитного моделирования SpinPM, созданный в группе из ИОФ РАН под руководством проф. А.К. Звездина и сочетающий мощный и достаточно универсальный вычислительный модуль и удобный графический интерфейс. В настоящее время SpinPM является одним из наиболее мощных микромагнитных пакетов в мире. Пакет состоит из счетной части и графической оболочки – пользовательском интерфейсе, позволяющем создавать и редактировать проекты расчетов и просматривать результаты. Счетная часть позволяет решать ОУЛЛ на прямоугольной сетке с равномерной дискретизацией по осям x и y и неравномерной дискретизацией по оси z . Для ускорения расчет магнитостатического взаимодействия осуществляется в пространстве Фурье, для перехода в него и обратно используется техника быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В работе проведено численное исследование динамики намагниченности СТНГ, состоящего из трёх слоёв (Ru 4/Cu 10/Ru 15nm) (см. рисунок), в котором намагниченность обоих Ru слоёв может быть поддерживаться в вихревом состоянии, схоже с системой изученной экспериментально в [4]. Когда электрический ток проходит через столбик, возбуждается режим, соответствующий сдвоенной вихревой динамике. Мы изучаем динамику вихревых состояний при различных значениях электрического тока и внешнего. перпендикулярного плоскости образца, магнитного поля. Сравнение полученных результатов с результатами эксперимента, показывает хорошее качественное соответствие между критическими полями переключения направления поляризации коров для различных токов. Для случая малых токов (15-28 мА) поле переключения кора вихря в тонком слое меньше по величине, чем в толстом слое, аналогично

экспериментальным результатам. Для случая больших токов (31-40 мА) поле переключения кора вихря в тонком слое больше по величине, чем в толстом слое, аналогично экспериментальным результатам.

Проведенное моделирование позволяет сделать интересное заключение о том, что и динамический [5],



и статический [6] сценарии переключения могут наблюдаться при различных полях/токах.

Вычислительные эксперимент проводился на кластере Башкирского Государственного Университета (32 процессора, AMD Opteron) общей продолжительностью порядка 300 часов. Расчеты проводились по схеме master-slave, процессор-мастер отправлял для вычислений процессорам-подчиненным задачу с различными входными данными.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 10-02-01162.

ЛИТЕРАТУРА:

1. J. Slonczewski // J. Magn. Magn. Mater, 159, L1 (1996).
2. L. Berger // Phys. Rev, B 54, 9353 (1996).
3. А.К. Звездин, К.А. Звездин, А.В. Хвальковский // УФН, 178, 436-442 (2008).
4. N. Locatelli et al. // Appl. Phys. Lett. 98, 062501 (2011).
5. V. Khvalkovskiy, A. N. Slavin, J. Grollier, et al. //Appl. Phys.Lett., 96, 022504 (2010).
6. Thiaville, J. M. Garcia, R. Dittrich, et al. // Phys. Rev. B 67, 094410 (2003).