

## ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЧАСТОТУ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

А.В. КУХАРЕВ, А.Л. ДАНИЛЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kuharev-sp@mail.ru, danilyuk@nano-center.org*

Посредством численного моделирования исследовано влияние однородных упругих механических напряжений на частоту колебаний намагниченности, возникающих в ферромагнитном слое в форме диска в составе наноструктуры Co/Cu/Co при прохождении через нее спин-поляризованного тока.

*Ключевые слова:* эффект переноса спина, колебания намагниченности, упругие напряжения.

Колебания намагниченности могут возбуждаться в ферромагнитном слое в составе наноструктуры ферромагнетик/ немагнитный металл /ферромагнетик при прохождении через нее спин-поляризованного тока по механизму переноса спина, открытому Слончевским и Берже [1], что может использоваться для разработки наноразмерных генераторов микроволнового излучения. В процессе формирования таких наноструктур в них возникают упругие механические напряжения. Упругие напряжения приводят к появлению магнитоупругой анизотропии в ферромагнитном материале [2], что обуславливает изменение режимов колебаний намагниченности [3]. Поэтому актуальным является исследование влияния упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности в таких структурах.

Исследуемая структура состоит из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонкой немагнитной прослойкой. Намагниченность первого ферромагнитного слоя является закрепленной (с помощью антиферромагнетика), а намагниченность второго ферромагнитного слоя – свободной. При пропускании через структуру электрического тока электроны первого слоя передают спиновый угловой момент атомам решетки второго слоя, что создает вращающий момент, действующий на намагниченность. Для описания динамики намагниченности  $\mathbf{M}$  свободного ферромагнитного слоя используется обобщенное уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта [4, 5]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] - \frac{\gamma \alpha}{M^2} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]] \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\alpha$  – параметр релаксации Гильберта. Эффективное магнитное поле  $\mathbf{H}$  включает поле магнитной кристаллографической анизотропии, размагничивающее поле и поле, связанное с переносом спина, которое пропорционально плотности пропускаемого тока  $j$ .

Учет упругих напряжений может быть описан в терминах эффективных размагничивающих факторов [2]. Если к диску вдоль его оси (ось  $z$ ) приложено однородное механическое напряжение  $\sigma_z$ , то изменение размагничивающего фактора  $N_z$  задается формулой

$$\Delta N_z = 3 \frac{\lambda}{\mu_0 M^2} \sigma_z, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – константа магнитоупругости вдоль оси  $z$ ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

На рис. 1 представлены результаты моделирования колебаний намагниченности однодоменного слоя кобальта в форме диска толщиной 5 нм и диаметром 50 нм в составе структуры Co/Cu/Co, когда намагниченность закрепленного слоя и кристаллографическая анизотропия диска направлены вдоль оси диска. Результаты моделирования показывают, что в такой структуре возникают устойчивые колебания намагниченности в отсутствие внешних магнитных полей в широком диапазоне изменения плотности пропускаемого тока (от  $0,2 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup> до  $18 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup>). Частота колебаний намагниченности увеличивается с ростом плотности тока, причем при небольших токах зависимость частоты от плотности тока близка к линейной (рис. 1, а). При токах выше  $18 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup> происходит переключение направления намагниченности, что сопровождается затухающими колебаниями.

Влияние упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности наиболее существенно проявляется при больших плотностях тока. Так, при однородной механической нагрузке 100 МПа частота колебаний намагниченности диска изменяется в среднем на 1% при токе  $10,0 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup> и на 4% при токе  $17,2 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup>. При малых токах ( $j < 3,0 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup>) влияния напряжений на частоту колебаний не обнаружено (рис 1, б).

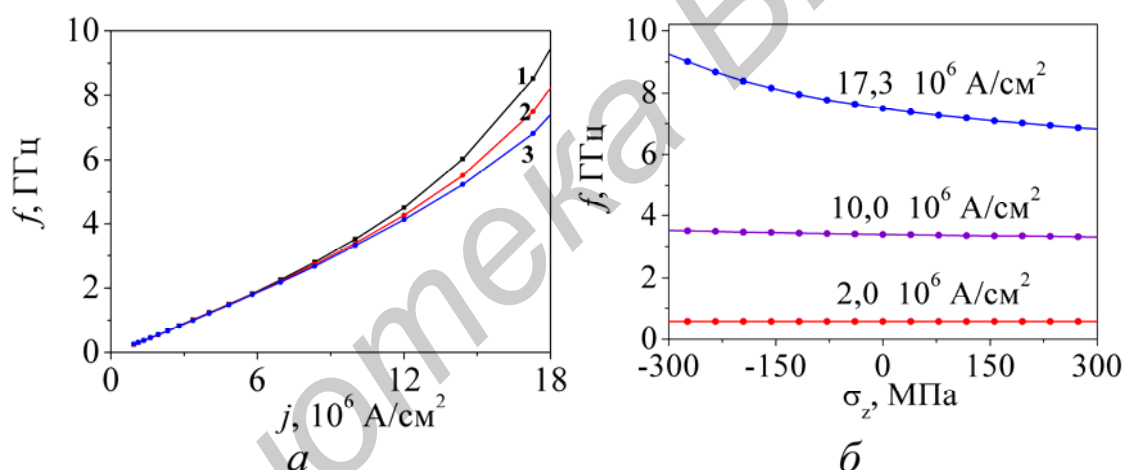


Рис. 1. Частота колебаний намагниченности диска кобальта при воздействии спинполяризованного тока и упругих напряжений: а – зависимость частоты  $f$  от плотности тока  $j$  (1 при растяжении с  $\sigma_z = -300$  МПа, 2 – в отсутствии напряжений, 3 – при сжатии с  $\sigma_z = +300$  МПа). б – зависимость частоты  $f$  от величины напряжений  $\sigma_z$

#### Список литературы

1. Slonczewski J.C. / J. Magn. Magn. Mater. 1996. Vol. 159. P. 1–7.
2. Baranov S.A. / J. Magn. Magn. Mater. 2003. Vol. 266. P. 278–281.
3. Кухарев А.В., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. // Прикл. физика. 2011. № 4. С. 12–19.
4. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. // УФН. 2008. Т. 178, № 4. С. 436–442.
5. Корнеев В.И., Попков А.Ф., Чиненков М.Ю. // ФТТ. 2009. Т. 51, № 1. С. 118–128.