

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЛОКАЛЬНОЕ ПОЛЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИСКОВ

В.А. Орлов<sup>1,2</sup>, В.С. Прокопенко<sup>3</sup>, Р.Ю. Руденко<sup>1</sup>, И.Н. Орлова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет,  
79 пр. Свободный, Красноярск, 660041 Россия;

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН,  
660036, Академгородок 50, стр. 38, Красноярск, Россия;

<sup>3</sup>Красноярский государственный педагогический университет им. В. П.  
Астафьева, 660049, ул. Ады Лебедевой 89, Красноярск, Россия  
[vaorlov@sfu-kras.ru](mailto:vaorlov@sfu-kras.ru);

## INFLUENCE OF MECHANICAL STRESSES ON THE LOCAL FIELD OF MAGNETIC ANISOTROPY OF THREE-LAYER NANOSIZED DISKS

V.A. Orlov<sup>1,2</sup>, V.S. Prokopenko<sup>3</sup>, R.Yu. Rudenko<sup>1</sup>, I.N. Orlova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University,  
79 Svobodny ave., Krasnoyarsk, 660041 Russia;

<sup>2</sup>Institute of Physics n.a. L.V. Kirenskiy, Federal Research Center KSC SB RAS,  
50 Akademgorodok, b.38, Krasnoyarsk, 660036 Russia;

<sup>3</sup>Krasnoyarsk State Pedagogical University n.a. V.P. Astafiev, Krasnoyarsk, 660049 Russia  
[vaorlov@sfu-kras.ru](mailto:vaorlov@sfu-kras.ru)

Исследуется вклад магнитоупругих эффектов в эффективную магнитную анизотропию трехслойного (не магнитный металл/ферромагнетик/не магнитный металл) пленочного нанодиска. Проведена оценка механических напряжений на боковой поверхности диска, обусловленных двумя факторами: неодинаковым тепловым расширением слоев и дополнительной поверхностной энергией на границах раздела слоев. Показано, что основной причиной изменения локального поля анизотропии вблизи края нанодиска являются механические напряжения, возникающие из-за избыточной энергии поверхности.

The contribution of magnetoelastic effects to the effective magnetic anisotropy of a three-layer (non-magnetic metal/ferromagnet/non-magnetic metal) film nanodisc is investigated. On the lateral surface of the disk the mechanical stresses have been estimated, which are caused by two factors: unequal thermal expansion of the layers and additional surface energy at the interfaces of the layers. It is shown that the main reason for the change in the local anisotropy field near the edge of the nanodisc is the mechanical stresses arising from the surface excess energy.

Последние годы не ослабевает интерес исследователей к магнитным наночастицам в контексте их использования в медико-биологической области в качестве наноскальпеля [1]. В силу ряда причин для исследований обычно используют суспензии частиц цилиндрической формы (пленочных нанодисков). Как известно, структура намагниченности зависит от геометрии наночастицы. При разных соотношениях диаметра и толщины нанодисков возможны разные реализации распределения намагниченности: квазиднодоменное или вихревое состояния с почти полным замыканием магнитного потока внутри частицы [2,3]. Для эффективности наноскальпеля замыкание магнитного потока внутри частицы (как это реализуется в вихревом состоянии) не является оптимальным. Предпочтительной является квазидипольная структура с относительно большим средним магнитным моментом. Такая реализация распределения намагниченности в наночастице возможна при условии  $D \gg h$ . Здесь

$D$  - диаметр диска,  $h$  - толщина. Противодействовать возникновению вихревого распределения намагниченности можно с помощью магнитоупругих эффектов [4,5]. Последние вызывают особый интерес, так как способны изменить конфигурацию намагниченности вблизи края магнетика.

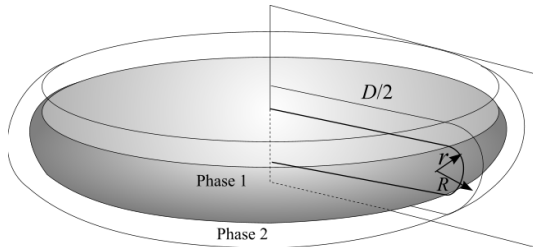
Для безопасного использования ферромагнитных частиц в медицине, необходимы покрытия из нейтральных веществ, в качестве которых можно использовать благородные металлы: золото, платина и пр [6]. Следовательно, “наноскальпель” конструктивно может представлять собой трехслойную систему немагнетик/ферромагнетик/немагнетик. Различие коэффициентов теплового расширения магнитного материала и оболочки приводит к возникновению механических напряжений, которые потенциально способны внести существенные поправки в поле анизотропии, а, следовательно, привести к коррекции результирующего магнитного момента и других магнитных характеристик [7,8]. В настоящей работе исследовано влияние магнитоупругих эффектов на магнитные характеристики трехслойной системы немагнетик/ферромагнетик/немагнетик.

Аналізу подвергается теоретическая модель “наноскальпеля”, представленная схематически на рис. 1. Диаметр диска  $D$  много больше толщины всей слоистой системы  $2R$ . Предполагается, что боковая поверхность диска в своем сечении представляет собой полуокружность. Радиус магнитной фазы 1 обозначен как  $r$ , радиус внешней немагнитной оболочки 2 -  $R$ .

Оценим влияние на эффективную анизотропию механических напряжений, возникающих на границах раздела фаз 1-2 и 2-внешняя среда. Для результирующего значения напряжения получено выражение:

$$\sigma = \frac{E_n E_m (\alpha_n - \alpha_m) \Delta t}{E_n (1 - \mu_m) + E_m \left( \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu_n \right)} + \frac{\varepsilon_n}{R} + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_m}{r}. \quad (1)$$

Здесь  $E$  и  $\mu$  - модули упругости Юнга и коэффициент Пуассона ферромагнитной «начинки» и оболочки соответственно,  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_m$  - плотности поверхностной энергии немагнитной и ферромагнитной компонент соответственно,  $\alpha$  - коэффициенты теплового расширения.



**Рис.1** - Схематичное изображение нанодиска. Закрашенная область - ферромагнитная фаза (фаза 1), немагнитная оболочка (фаза 2) изображена прозрачной

Мы выделили два фактора, обеспечивающие возникновение механических напряжений: неодинаковое тепловое расширение материала слоев (первое слагаемое в (1) -  $\sigma_b$ ) и избыток энергии на границах фаз с кривизной малого радиуса (аналог поверхностного натяжения  $\sigma_s$  - второе третье слагаемые в (1)). В процессе изготовления трехслойного нанодиска при температуре нескольких сот градусов на границе примыкания магнитной и немагнитной фаз практически нет механического напряжения. Но при охлаждении до комнатной температуры такие напряжения возникают, причем знак и величина их зависят от соотношения коэффициентов теплового расширения  $\alpha$  магнитного и немагнитного слоев. Действие напряжения (1) приводит к возникновению поправки к эффективной анизотропии. Этот вклад имеет одноосную симметрию с константой [7,8]:

$$K_{st} = \frac{3}{2} \lambda \sigma. \quad (2)$$

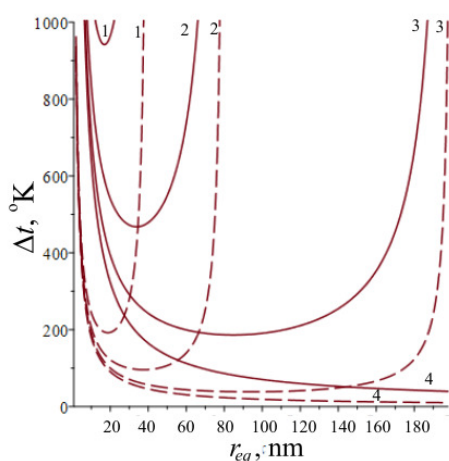
Здесь  $\lambda$  - коэффициент магнитоstriction магнитной фазы.

Представляет интерес сравнение вкладов  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$  в результирующее механическое напряжение. Для сравнительного анализа на рисунке 2 построены кривые по уравнению:  $\sigma_b(r_{eq}, \Delta t) = \sigma_s(r_{eq}, \Delta t)$ . Из графиков следует, что вклад в напряжение  $\sigma_b$  из-за разности

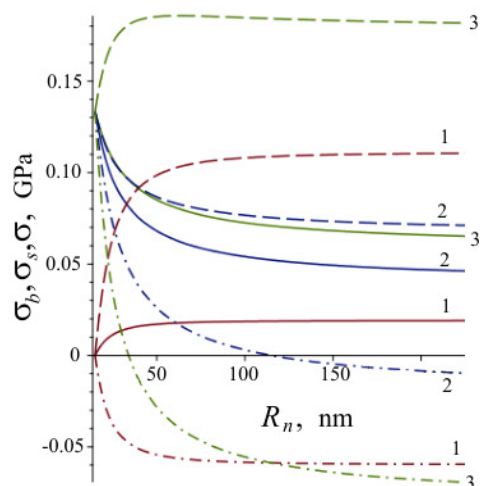
теплового расширения магнитной и немагнитной фаз существенен, но не является определяющим для дисков с золотом в отличие от дисков с алюминием. Естественно, это связано с большим коэффициентом теплового расширения алюминия по сравнению с золотом (отличаются почти в два раза). Как видно из рисунков, фактор, связанный с избыточной энергией поверхности, является главным в формировании механического напряжения, под действием которого находится магнитная фаза диска.

Важно заметить, что напряжения  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$  имеют принципиально разную характерную зависимость от внешнего радиуса оболочки  $R_n$ . Эти зависимости показаны на рисунке 3. Механизм, обусловленный поверхностной энергией, преобладает в случае золотой оболочки при любых толщинах диска. В результате это приводит к монотонному убыванию величины  $\sigma$  с ростом толщины нанодиска, несмотря на рост напряжения  $\sigma_b$ . Эти выводы не относятся к диску с оболочкой из алюминия. Как видно из рисунка 3, влияние разности теплового расширения алюминия и никеля столь значительно, что может играть основную роль в создании напряжений. Это приводит к немонотонной зависимости результирующего механического напряжения от толщины оболочки.

Особая ситуация возникает для диска с оболочкой из платины. Из-за незначительного коэффициента теплового расширения платины по сравнению с никелем, напряжение  $\sigma_b$  имеет отрицательный знак, и механизмы теплового расширения и поверхностного натяжения конкурируют в создании результирующего механического напряжения  $\sigma$ . Напряжение  $\sigma$  убывает до нуля и даже принимает отрицательные значения, что может привести к разрыву интерфейса немагнитной и ферромагнитной фаз.



**Рис. 2** - Диаграмма, демонстрирующая вклад в результирующее механическое напряжение слагаемых  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$ . Пространство над кривыми соответствует случаю  $\sigma_b > \sigma_s$ , под кривыми -  $\sigma_b < \sigma_s$ . Кривые под разными номерами соответствуют разным внешним радиусам кривизны немагнитной оболочки: 1 -  $R = 40$  nm, 2 -  $R = 80$  nm, 3 -  $R = 200$  nm, 4 -  $R = 1000$  nm. Сплошными кривыми изображены графики для оболочки из золота, штрих-пунктирными - для алюминия

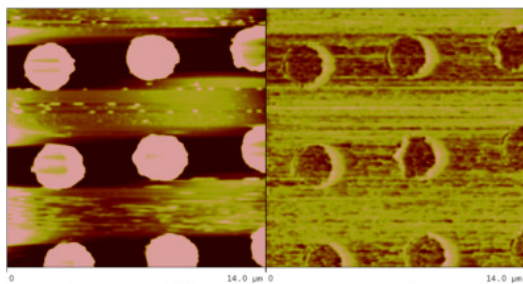


**Рис. 3** - Зависимости  $\sigma_b(R_n)$  - кривые 1,  $\sigma_s(R_n)$  - кривые 2,  $\sigma(R_n)$  - кривые 3. Сплошными линиями показаны графики для дисков с оболочкой из золота, штрихпунктирной - для диска с алюминием, пунктирной - для диска с платиной. Кривые построены для величин  $r = 15$  nm,  $\Delta t = 200$  °K

С помощью выражения (2) вычислены поправки для константы анизотропии дисков с толщиной ферромагнитного слоя 10 нм, такой же толщиной немагнитного слоя и при перепаде температуры 200 °K. Результат для дисков с золотым и алюминиевым покрытиями составил

$K_{st_{Au}} \approx 1.6 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> и  $K_{st_{Al}} \approx 2.3 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> соответственно. Разумно сравнить эти значения с постоянными анизотропии формы и поверхностной анизотропии, которые для тонких пленок никеля имеют порядок  $\mu_0 M_s^2 \approx 1.4 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>, и кристаллографической анизотропией  $K_{cr} \approx 5.0 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Таким образом, поправка составляет порядка 16% от константы анизотропии формы и порядка 45% от кристаллографической константы в случае оболочки из алюминия и 11% и 33% соответственно для оболочки из золота. Вклад  $K_{st}$  сравним с другими видами анизотропии только для чрезвычайно тонких дисков (порядка 10 нм). При таких толщинах механические напряжения в рассматриваемых системах способны изменить конфигурацию намагниченности вблизи края нанодиска из-за возникновения анизотропии с осью, перпендикулярной боковой поверхности. Это может привести к выходу намагниченности из плоскости магнетика и увеличению результирующего магнитного момента частицы и, как следствие, облегчению процесса управления ее движением с помощью полей.

Предварительные эксперименты по наблюдению магнитной структуры никелевых нанодисков с двухсторонним золотым покрытием, изготовленных по технологии, описанной в [9,10], подтверждают формирование в них предсказываемой теоретическими оценками плоской квазидипольной магнитной структуры (см. рис. 4). О квазидипольной магнитной структуре объектов исследования свидетельствует асимметрия их магнитносилковых изображений.



**Рис. 4** - Атомно-силовое (слева) и магнитно-силовое (справа) изображения трехслойных (Au/Ni/Au) пленочных дисков диаметром 3 мкм. Толщина слоя Ni 60 нм, слоев Au - 5 нм каждый

Для наблюдения магнитной структуры ферромагнитных образцов применялся сканирующий зондовый силовой микроскоп Veeco MultiMode NanoScope IIIa SPM. Микроскоп переводится в режим формирования магнитных изображений по двухпроходной методике. Для этих целей использовался кантилевер, зонд которого покрыт слоем Cr/Co.

Теоретический анализ дает основания полагать, что именно пленочные нанодиски никеля с золотым двухсторонним покрытием могут оказаться наиболее перспективными кандидатами в “наноскальпели” для клеточной хирургии опухолей и, возможно, окажутся эффективными как инструмент визуализации пораженных клеток.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00161 (в части теоретических расчетов и численных оценок) и проекта № 20-02-00696 (в части изготовления и исследования образцов).*

**Список использованных источников:**

1. *Vitol E. A., Novosad V., Rozhkova E. A.* Nanomedicine. 2012. V. 7, № 10. P. 1611-1624.
2. *Chen C., Kitakami O., Okamoto S., Shimada Y.* J. Appl. Phys. 1999. V. 86. P. 2161-2165.
3. *Scholz W., Guslienko K. Yu., Novosad V., Suess D., Schrefl T., Chantrell R. W., Fidler J.* JMMM. 2003. V. 266, P. 155-163.
4. *Lu Li*, Stress effects on ferromagnetic materials: investigation of stainless steel and nickel, Retrospective Theses and Dissertations. 2004, 1179 P.
5. *Орлов В. А., Орлова И. Н.* ФММ. 2013. V. 114. С. 11-15.
6. *Бычкова А. В., Сорокина О. Н., Розенфельд М. А., Коварский А. Л.* Успехи химии. 2012. Т. 81. С. 1026-1050.
7. *Kumar A., Fahler S., Schlorb H., Leistner K., Schultz L.* Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 064421.
8. *Lanotte L., Ausanio G., Iannotti V., Pepe G., Carotenuto G., Netti P., Nicolais L.* Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 054438.
9. *Ким П. Д., Орлов В. А., Руденко Р. Ю., Прокопенко В. С., Орлова И. Н., Замай С. С.* Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. С. 620-626.
10. *Замай С. С., Прокопенко В. С., Замай А. С., Денисенко В. В., Ким П. Д., Орлов В. А., Замай Г. С., Иванченко Т. И., Замай Т. Н.* Сибирское медицинское обозрение. 2015. Т. 6. С. 48-54