

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ С ПОКРЫТИЕМ

Т.В. Лютый, А.Ю. Поляков, А.В. Рот-Серов

Наночастицы с комплексной структурой по типу ядро-оболочка представляют собой объект все более растущего интереса современных исследователей. В значительной степени это стимулируется перспективами использования таких частиц в индустрии современных магнитных накопителей со сверхвысокой (свыше 1 Тбит/дюйм<sup>2</sup>) плотностью записи. Увеличение плотности записи сопряжено с уменьшением размеров наночастиц, которые являются элементарными носителями информации. Это приводит к потере устойчивости их магнитных моментов относительно тепловых флуктуаций, а, следовательно, к снижению надежности хранения информации. В предельном случае, когда магнитная энергия наночастицы становится близкой к тепловой энергии, наступает так называемый суперпарамагнитный предел, при котором за счет тепловых флуктуаций магнитный момент наночастицы хаотически изменяет свое направление – т.е. ведет себя подобно магнитному моменту атома парамагнетика.

Для преодоления суперпарамагнитного предела было предложено использовать наночастицы со сложной структурой типа ядро – оболочка [1]. Ядро образуется ферромагнетиком, а оболочки, которых может быть несколько, выполняется из антиферромагнитных или ферромагнитных материалов. Возникающие при этом эффективные магнитные поля обменной природы способны существенно увеличить термическую стабильность таких частиц, а, значит, повысить надежность хранения информации при заданной плотности записи.

Рассмотрим ферромагнитную наночастицу, покрытую слоем антиферромагнетика. При действии на частицу внешнего переменного магнитного поля, спиновые магнитные моменты ферромагнитного ядра испытывают ориентационное действие со стороны этого поля, в то время как спиновые моменты оболочки удерживаются более сильным эффективным полем анизотропии. Если изначально те спиновые магнитные моменты оболочки, которые непосредственно прилегают к ферромагнитному ядру, ориентированы определенным образом, то вдоль выделенного направления возникает некоторое эффективное магнитное поле. Такое поле называется полем однонаправленной анизотропии или обменным полем смещения.

Несмотря на то что впервые на это явление было указано еще в 1956 году [2], его природа остается не выясненной до конца и в настоящее время. В отсутствие исчерпывающего теоретического описания, большую роль приобретает численный эксперимент. Традиционно для поиска равновесных свойств ансамблей магнитных моментов используется так называемое микромагнитное моделирование, основанное на методах Монте-Карло [3].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования явления гистерезиса двумерной системы спиновых магнитных моментов, лежащих в плоскости распределения и ограниченных круговой областью заданного размера. Считалось, что в середине области взаимодействие есть ферромагнитным, а на границах – антиферромагнитным. Гамильтониан  $H$  такой системы записывается в виде

$$\begin{aligned}
 H = & -J_{FM} \sum_{\langle i, j \in FM \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \sum_{i \in FM} K_{iFM} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{e}_i)^2 - J_{AM} \sum_{\langle i, j \in AM \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \\
 & - \sum_{i \in AM} K_{iAM} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{e}_i)^2 - J_{IF} \sum_{\langle i \in FM, j \in AM \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \mathbf{h} \cdot \sum_i \mathbf{S}_i, \quad (1)
 \end{aligned}$$

здесь  $J_{FM}$  – константа обменного взаимодействия для ферромагнитного ядра,  $J_{AM}$  – константа обменного взаимодействия для антиферромагнитной оболочки,  $J_{IF}$  – константа обменного взаимодействия для спиновых моментов пограничного слоя,  $S_i$  – вектор спинового магнитного момента,  $K_{iFM}$  – константа анизотропии ферромагнитного ядра,  $K_{iAM}$  – константа анизотропии антиферромагнитной оболочки,  $e_i$  – орт, указывающий направления осей анизотропии,  $h$  – внешнее поле.

Гамильтониан (1) соответствует модели Гейзенберга. В случае большой анизотропии часто используется более простая модель Изинга, согласно которой вектор  $S_i$  может иметь лишь два равновесных направления вдоль заданной оси анизотропии. В данной работе моделирование было проведено как в рамках модели Изинга так и для модели Гейзенберга. Из сравнения полученных результатов следует, что в обоих случаях наблюдается сдвиг петли гистерезиса построенной в координатах «внешнее поле  $h$  – намагниченность  $M$ » вдоль оси  $h$ . Показано, что величина и направление смещения  $\Delta h$  определяется параметрами системы, формирующими гамильтониан (1). Зависимость  $\Delta h$  от этих параметров была всесторонне изучена.

Для модели Гейзенберга были визуально исследованы процессы неоднородного перемагничивания в такой системе, связанные с появлением вихревых структур, что согласуется с результатами, полученными в работе [4].

- [1] V. Skumryev, Nature, **423**, 850 (2003).
- [2] W.H. Mielejohn, C.P. Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956).
- [3] Х. Гулд, Я. Тобочник Компьютерное моделирование в физике: в 2-х частях. – М.: Мир, 1990.
- [4] O. Iglesias, Phys. Rev. B **72**, 212401 (2005).