

«Ферромагнитные инвертированные опалоподобные структуры – трёхмерные наноаналоги спинового льда»

**Мистонов Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры ядерно-физических методов исследования**

Представленные работы посвящены изучению магнитных и структурных свойств инвертированных опалоподобных кристаллов на основе никеля и кобальта с помощью комбинации комплементарных методов – от сканирующей электронной микроскопии и магнитометрии сверхпроводящим квантовым интерферометром до ультрамалоугловой дифракции синхротронного излучения и малоугловой дифракции поляризованных нейтронов.

Проведённые исследования являются оригинальными как с точки зрения изучаемого объекта, так и с точки зрения используемых методик.

Инвертированные опалоподобные структуры (ИОПС) получают путём заполнения кобальтом или никелем пустот искусственного опала с помощью химического электроосаждения. После чего первоначальный опалоподобный кристалл растворяется в толуоле. Такая процедура создания трёхмерной ферромагнитной решётки с пространственно упорядоченными сферическими порами размером порядка 500 нанометров является уникальной и содержит множество технологических нюансов.

Сложная пространственная геометрия системы приводит к неоднородному распределению намагниченности в образце и нетривиальному магнитному поведению во внешнем поле, что представляется интересным объектом для исследования.

Для осуществления надёжной интерпретации результатов изучения магнитных свойств необходимо иметь чёткое представление о структуре исследуемой системы на мезоскопическом и атомарном уровнях.

Традиционно опалоподобные структуры исследуют с помощью методов электронной микроскопии или оптической дифракции, однако в данном случае оба метода могут дать информацию только о поверхности образца ввиду сильного поглощения оптического излучения ферромагнитным материалом. Для того чтобы обойти эту проблему необходимо использовать высокоинтенсивное проникающее синхротронное излучение, позволяющее «пробить» образец насквозь. Для определения атомарной структуры следует применять метод широкоугольной дифракции рентгена, а для изучения мезоструктуры необходимо использовать установки специализирующиеся на ультрамалоугловом рассеянии рентгена на объектах субмикронного масштаба.

Трёхмерность и неоднородность магнитной структуры ИОПС не позволяет использовать только «обычные» магнитометрические методики такие как, например, магнитно-силовая микроскопия или магнитометрия с помощью сверхпроводящего интерферометра. В данном случае необходимо использовать проникающее излучение чувствительное к магнитной структуре и позволяющее разделять вклады от различных магнитных подсистем. В настоящее время последнее возможно лишь с использованием малоуглового рассеяния нейтронов. И если интегральные методики широко распространены и часто реализованы на коммерческих лабораторных установках, то нейтронные станции являются практически уникальными и располагаются в крупных международных ядерных центрах. Однако лишь несколько установок в мире подходят для

исследования объектов с характерными размерами порядка половины микрона. При этом результаты, показанные в представленных работах, были получены на пределе возможностей даже данных установок.

Кроме сложностей, возникающих при планировании и проведении нейтронного эксперимента, крайне трудной является задача интерпретации полученных данных. Предложенная модель, основанная на концепции «правила льда» была впервые применена для трёхмерных субмикронных систем и позволила удовлетворительно описать экспериментальные данные, а также сделать некоторые предсказания, часть из которых успешно подтвердилась, в то время как остальные находятся на стадии подготовки к проверке. В частности, было обнаружено отсутствие дальнего порядка магнитных подсистем, перпендикулярных магнитному полю, приложенному вдоль кристаллографического направления $[-110]$. Если же приложить поле вдоль оси $[1-21]$, то должна возникать компонента намагниченности перпендикулярная вектору напряжённости поля и плоскости образца. А в случае, когда поле приложено вдоль одного из направлений типа $\langle 111 \rangle$ могут возникать дефекты в магнитной структуре аналогичные магнитным квазимонополям, наблюдавшимся в спиновом льде.

Дополнительно к экспериментальным методикам было использовано микромагнитное моделирование, подтвердившее правильность предсказаний, основанных на феноменологических рассуждениях, и позволившее выявить новые особенности магнитного поведения инвертированных опалоподобных структур. Следует заметить, что данные особенности выходят за рамки предложенной модели, а, значит, требуют её активной доработки и новых экспериментальных исследований.

Представленные работы, по сути, представляют собой изложение успешного применения технологии комплексного исследования структуры и магнитных свойств трёхмерных ферромагнитных пространственно упорядоченных мезосистем от синтеза до чёткого понимания особенностей магнитной структуры, как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения.