

**МАГНИТНАЯ СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ  
НА ОСНОВЕ  $\text{BiFeO}_3$**

*А.М. Панасевич, М.В. Ярмолич, , 4 курс  
Д.В. Якимчук, 3 курс*

*Научный руководитель – И.И. Макоед, к.физ.-мат.н, доцент  
Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина*

В настоящее время происходит бурное развитие новой отрасли микроэлектроники – спиновой электроники или спинтроники, использующей транспортные свойства спинполяризованных электронов. Спинтроника позволила создать считывающие головки для жестких дисков с более высокой плотностью записи информации, сенсоры магнитного поля и новое поколение магнитной памяти MRAM (Magnetic Random Access Memory). Главная проблема спиновой электроники – это преобразование информации в форме намагниченности в электрическое напряжение. Магнитоэлектрический эффект (возможность изменять электрическую поляризацию приложением магнитного поля и наоборот, изменять намагниченность материала приложением электрического поля) представляет один из возможных подходов к решению данной проблемы, в связи с возможностью миниатюризации электронных устройств и существенно меньших затрат энергии.

В последние годы широкое применение в области спиновой электроники находят сегнетомагнетики – частный случай мультиферроиков – материалы, обладающие одновременно магнитным и электрическим упорядочением. Наиболее изученным соединением является феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ , для которого получены убедительные экспериментальные доказательства наличия сегнетоэлектрических и магнитных свойств. Дополнительный интерес к исследованию свойств данного соединения вызван открытием гигантского магнитоэлектрического эффекта в тонких пленках  $\text{BiFeO}_3$ , а также наличием в феррите висмута ряда фазовых превращений, индуцированных магнитным полем.

Большой интерес в области функциональной электроники представляют структуры на основе мультиферроика феррита висмута. Температурная зависимость магнитной восприимчивости объемных образцов  $\text{BiFeO}_3$  указывает на отсутствие спонтанной намагниченности и позволяет определить температуру Нееля  $T_N=640\text{K}$ . При температурах, меньших точки Нееля, феррит висмута обладает сложной пространственно модулированной магнитной структурой циклоидного типа. В ней спиновая система сохраняет в ближайшем окружении антиферромагнитный порядок G-типа, но изменяется вдоль направления распространения циклоиды с периодом, несоразмерным периоду кристаллической решетки.

В отличие от  $\text{BiFeO}_3$ , который является антиферромагнетиком и проявляет линейную зависимость величины удельной намагниченности от величины приложенного магнитного поля,  $M(H)$  зависимости образцов  $\text{Re}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  указывают на присутствие слабого ферромагнитного момента. Возникновение спонтанной намагниченности в  $\text{Re}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  связано с антисимметричным обменным механизмом и вызвано подавлением спиральной модуляции спинов.

Целью работы является исследование магнитных свойств мультиферроиков систем  $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ ,  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ ,  $\text{Gd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  ( $x=0; 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ ), синтезированных на основе феррита висмута.

Допирование редкоземельными ионами феррита висмута приводит к существенному изменению магнитных свойств мультиферроиков. Можно предположить следующие причины возникновения спонтанной намагниченности и изменения ее величины, вызванные допированием:

- 1) изменение структуры,
- 2) изменение кислородной стехиометрии,
- 3) возникновение ионов железа переменной валентности ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ),
- 4) подавление спиновой циклоиды.

Панорамный анализ топографии и физических свойств поверхности предполагает получение и исследование изображений поверхности образцов по разнообразным методикам и в различных режимах работы, обобщая возможности сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и магнитной силовой микроскопии (МСМ) [1]. Развитие научно-технического прогресса в сканирующей зондовой микроскопии привело к качественному скачку в исследовании магнитных свойств материалов электронной техники. Такой подход позволяет провести качественный и количественный анализ материалов на микро- и наноразмерном уровне.

Объективными свидетельствами возникновения магнитных свойств служат результаты сравнения изображений топографии поверхности, фазы и амплитуды магнитных полей образцов, восстановленные методом магнитно-силовой микроскопии. Измерение магнитного сигнала регистрировали с помощью микроскопа NanoScope при работе по двухпроходной методике в «лифтинг»-режиме. Данный режим дает возможность получения карты топографии поверхности образца и карты магнитного контраста при последующем сканировании зондом, находящемся на заданном расстоянии от поверхности, исключая механический контакт зонда и образца. Сканирование происходит при разомкнутой системе обратной связи. Положение кантилевера регулируется с учетом полученных данных о рельефе образца так, что расстояние от иглы до поверхности поддерживается неизменным. При этом остается постоянной и сила межатомного взаимодействия, что позволяет устранить влияние топографии поверхности образца на магнитное силовое изображение.

В работе визуализированы магнитные области. Исследована эволюция амплитуды и фазы магнитного поля образцов в зависимости от вида и концентрации допирующих ионов. Для обработки полученных данных использовано программное обеспечение WSxM5.0, V614r1, Gwyddion.

#### Список использованных источников

1. Яминский, И.В. Магнитная силовая микроскопия поверхности / И.В. Яминский, А.М. Тишин // Успехи Химии. – 1999. – Т.68, №3, – с. 187 – 193.