

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет инфокоммуникаций

Кафедра защиты информации

УДК 004.056.5

Прокопюк
Елизавета Николаевна

**СИСТЕМЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С
ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬЮ**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-98 80 01 Информационная безопасность

Магистрант

Е. Н. Прокопюк

Научный руководитель
д-р физ. - мат. наук, проф

С. Л. Прищепа

Минск 2021

ВВЕДЕНИЕ

В рамках приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь особое внимание уделялось поиску новых композиционных наноматериалов, в том числе на основе массивов углеродных нанотрубок для различных областей радиотехнической, электронной и оптоэлектронной промышленности, исследованию их структуры и свойств, а также наукоемких и экономичных технологий их создания. Для целого ряда магнитоэлектронных приложений необходимо синтезировать магнитные наноконпозиты, состоящие из однодоменных наночастиц с высокой плотностью упаковки ($\approx 10^{10}$ частиц/см²) и с отсутствием магнитостатического (дипольного) взаимодействия между частицами. В данной работе предлагается использовать УНТ в качестве задающей матрицы для этих целей.

Углеродные нанотрубки обычно формируются методом химического парофазного осаждения (ХПО), при котором в камеру реактора вносится рабочая смесь, содержащая атомы *3d* металлов, являющихся катализаторами для роста УНТ. При этом возможно выращивание массивов УНТ с высокой степенью ориентации, разной плотности размещения на подложке, разной высотой и т.д. Наночастицы катализатора распределены в объеме получаемого массива УНТ и обуславливают ферромагнитные свойства образца. Фактически, синтез массивов УНТ сопровождается одновременно синтезом магнитного наноконпозита, в котором матрицей является углеродные нанотрубки, а ферромагнитными наночастицами – наночастицы катализатора. Отличительной особенностью такого наноконпозита является зависимость области локализации ферромагнитных наночастиц от концентрации катализатора. При больших концентрациях каталитических наночастиц они локализованы внутри УНТ, внутри и снаружи стенок УНТ. Механизм взаимодействия между ними обусловлен обменным взаимодействием. Такие наноконпозиты перспективны в качестве экранирующих материалов в широком диапазоне частот, вплоть до терагерц. Однако применение таких наноконпозитов в магнитоэлектронике мало перспективно в силу слабой контролируемости их свойств. Со снижением концентрации катализатора можно реализовать случай, когда наночастицы ферромагнетика локализованы только внутри УНТ. Концентрация их крайне мала и среднее расстояние между наночастицами внутри УНТ составляет порядка сотен нанометров. Между тем, наночастицы, локализованные в одной трубке, не являются магнитно-изолированными. Они связаны косвенным обменным

взаимодействием, возникающим из-за большого спин-орбитального эффекта, вызванного кривизной и дефектностью нанотрубок. Таким образом, для формирования УНТ, внутри которых была бы локализована только одна ферромагнитная наночастица, необходимо формировать массив ориентированных УНТ на подложке с предварительно нанесёнными наночастицами катализатора. В процессе роста (механизм сверху вниз) форма наночастиц подвержена изменению вследствие температуры процесса, близкой к эвтектической температуре наночастиц ферромагнетика. Возникающие при этом внутренние упругие напряжения приводят к росту вклада магнитной анизотропии и, соответственно, подавлению дипольного взаимодействия между частицами. При этом возможен кроссовер от коллективного поведения ансамбля наночастиц к индивидуальному.

Вследствие перечисленных факторов подобные структуры являются перспективными для приборов магнетоэлектроники и спинтроники

Библиотека БГУИР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Углеродные нанотрубки обычно формируются методом химического парофазного осаждения (ХПО), при котором в камеру реактора вносится рабочая смесь, содержащая атомы $3d$ металлов, являющихся катализаторами для роста УНТ. При этом возможно выращивание массивов УНТ с высокой степенью ориентации, разной плотности размещения на подложке, разной высотой и т.д. Наночастицы катализатора (Fe , Co , Ni) распределены в объеме получаемого массива УНТ и обуславливают ферромагнитные свойства образца. Фактически, синтез массивов УНТ сопровождается одновременно синтезом магнитного нанокompозита, в котором матрицей является углеродные нанотрубки, а ферромагнитными наночастицами – наночастицы катализатора. Отличительной особенностью такого нанокompозита является зависимость области локализации ферромагнитных наночастиц от концентрации катализатора. При больших концентрациях каталитических наночастиц они локализованы внутри УНТ, внутри и снаружи стенок УНТ. Механизм взаимодействия между ними обусловлен обменным взаимодействием. Такие нанокompозиты перспективны в качестве экранирующих материалов в широком диапазоне частот, вплоть до терагерц. Однако применение таких нанокompозитов в магнетоэлектронике мало перспективно в силу слабой контролируемости их свойств. Со снижением концентрации катализатора можно реализовать случай, когда наночастицы ферромагнетика локализованы только внутри УНТ. Концентрация их крайне мала и среднее расстояние между наночастицами внутри УНТ составляет порядка сотен нанометров. Между тем, наночастицы, локализованные в одной трубке, не являются магнитно-изолированными. Они связаны косвенным обменным взаимодействием, возникающим из-за большого спин-орбитального эффекта, вызванного кривизной и дефектностью нанотрубок. Таким образом, для формирования УНТ, внутри которых была бы локализована только одна ферромагнитная наночастица, необходимо формировать массив ориентированных УНТ на подложке с предварительно нанесёнными наночастицами катализатора. В процессе роста (механизм сверху вниз) форма наночастиц подвержена изменению вследствие температуры процесса, близкой к эвтектической температуре наночастиц ферромагнетика. Возникающие при этом внутренние упругие напряжения приводят к росту вклада магнитной анизотропии и, соответственно,

подавлению дипольного взаимодействия между частицами. При этом возможен кроссовер от коллективного поведения ансамбля наночастиц к индивидуальному.

В настоящее время особое внимание уделяется поиску новых композиционных наноматериалов, в том числе на основе массивов углеродных нанотрубок для различных областей радиотехнической, электронной и оптоэлектронной промышленности, исследованию их структуры и свойств, а также наукоемких и экономичных технологий их создания. Для целого ряда магнитноэлектронных приложений необходимо синтезировать магнитные наноконпозиты, состоящие из однодоменных наночастиц с высокой плотностью упаковки (10^{10} частиц/см²) и с отсутствием магнитостатического (дипольного) взаимодействия между частицами. В данной работе предлагается использовать УНТ в качестве задающей матрицы для этих целей.

Вследствие перечисленных факторов подобные структуры являются перспективными для приборов магнетoeлектроники и спинтроники.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка физических методов повышения помехозащищенности систем магнитной памяти с высокой степенью интеграции.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1) Проанализировать методы снижения влияния длительного взаимодействия на однодоменные плотноупакованные магнитные наночастицы.

2) Исследовать влияние различных вкладов магнитной анизотропии на степень магнитной изоляции НЧ.

3) Исследовать влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на величину магнитной анизотропии НЧ, импортированных внутрь УНТ.

Объект исследования: массив вертикально ориентированных плотноупакованных УНТ с магнитными НЧ внутри.

Предмет исследования: степень магнитной изоляции однодоменных магнитных НЧ внутри УНТ.

Положения, выносимые на защиту

Ансамбль плоскоупакованных (10^{10} см⁻²) магнитных наночастиц кобальта, каждая из которых находится внутри УНТ, обладает перпендикулярной магнитной анизотропией, вызванной магнитоупругими напряжениями, связанными с особенностями роста массива УНТ. При этом снижается вклад дипольного взаимодействия между наночастицами. Подобные системы перспективны для использования в системах магнитной записи информации с повышенной помехоустойчивостью.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 разделов, заключения, списка использованных источников.

Общий объем диссертационной работы составляет 51 страницу, из них 36 страниц основного текста, библиографический список из 79 наименований на 6 страницах.

КРАТНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первом разделе** описан метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, применяемый для исследования электронных свойств поверхностей твердых тел и формирования на них низкоразмерных систем.

Во **втором разделе** описывается экспериментальная методика формирования массивов плотноупакованных НЧ внутри УНТ. Проводятся эксперименты по измерению структурных морфологических магнитных свойств сформированных массивов плотноупакованных вертикально ориентированных УНТ с НЧ внутри. Приводятся сравнительные характеристики НЧ Co поверх УНТ и внутри УНТ с одной и той же плотностью упаковки.

В **третьем разделе** представлены результаты атомно-силовой микроскопии и магнитно-силовой микроскопии массивов наночастиц Co на вершине наноконусов оксинитрида кремния и наночастиц Co встроенных в нанотрубки. Проводится анализ петли гистерезиса $M(H)$ для образцов $CoSiO_xN_y$ и УНТ Co .

В **четвертом разделе** по результатам экспериментальных исследований оцениваются микромагнитные параметры НЧ в рамках модели случайной намагниченности. Оцениваются вклады магнитной анизотропии от кристаллической структуры, внутренних напряжений, формы в эффективную величину анизотропии. Проводятся сравнения с дипольной энергией. Рассчитываются условия и параметры кроссовера от магнитно изолированных и связанным НЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе магистерской диссертации был проведен анализ магнитных свойств наноразмерного Co на поверхности наноконусов SiO_xN_y и внутри УНТ. Средняя плотность включений Co одинакова для обоих типов образцов и составляет порядка 10^{10} см⁻². Тем не менее эти две системы по-разному вели себя в магнитном поле. В первом случае НЧ Co сильно связаны через DDI . В результате плоскость легкой оси ориентируется параллельно подложке. Для образцов УНТ Co наночастицы Co изолированы магнитом. Причина незначительного влияния DDI – магнитная анизотропия. Он значительно увеличивается из-за своеобразной морфологии включений Co в УНТ и напряжений, вызванных углеродными нанотрубками. Были оценены значения констант формы, магнитокристаллической и магнитоупругой анизотропии. Магнитоупругая анизотропия была оценена для обеих наблюдаемых кристаллических структур Co , ГЦК и ГПУ.

Было продемонстрировано, что из-за присутствия кристаллической фазы ГПУ напряжения могут достигать значительных значений, приводящих к заметной магнитоупругости. Влияние напряжений на магнитную структуру включений Co было исследовано с помощью микромагнитного моделирования, которое помогло нам определить вероятное направление гексагональной оси, ориентированной перпендикулярно оси УНТ. Разработанный подход к созданию ансамбля анизотропных наночастиц может быть очень полезен при разработке магнитных электронных устройств на основе углерода.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

[1] Е. Н. Прокопюк. Синтез ансамбля наночастиц со на подложках SiO₂/Si / Прокопюк Е. Н., Прищепа С. Л. // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVIII БелорусскоТ-38 российской науч.-техн. конф. – Минск, БГУИР, 2020.

[2] Е. Н. Прокопюк. Синтез ориентированных массивов углеродных нанотрубок с одной ферромагнитной наночастицей на вершине каждой углеродной нанотрубки / Прокопюк Е. Н., Прищепа С. Л. // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVIII БелорусскоТ-38 российской науч.-техн. конф. – Минск, БГУИР, 2020.

[3] Е. Н. Прокопюк. Повышение помехоустойчивости систем магнитной записи информации на однодоменных наночастицах / Прокопюк Е. Н., Прищепа С. Л. // Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции УИР «Управление информационными ресурсами». – Минск, Академия Управления, 2020.

[4] Е. Н. Прокопюк. Магнитные характеристики наночастиц кобальта на подложке из кремния и внутри унт / Прокопюк Е. Н. // Сборник материалов 56-ой научной конференции аспирантов магистрантов и студентов. – Минск, БГУИР, 2020.