

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА
ВЕЛИКОГО**

**Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа физики и технологий материалов**

На правах рукописи

Янкевич Глеб Андреевич

Тема научно-квалификационной работы

**Синтез кластерных материалов с высокой степенью чистоты методом
осаждения из ионного пучка**

Направление подготовки 28.06.01 Нанотехнологии и наноматериалы

Код и наименование

Направленность 28.06.01_01 Нанотехнологии и наноматериалы

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы

Автор работы: Янкевич Г.А.

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н.,

Мишин М.В

Санкт Петербург

2020

Научно-квалификационная работа выполнена на технической базе института нанотехнологий (Institute of Nanotechnology) Технологического института г.Карлсруэ (Karlsruhe Institute of Technology), Германия.

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Александров Сергей Евгеньевич,*
д.х.н, профессор

Научный руководитель: – *Мишин Максим Валерьевич,*
д.ф.-м.н.

Рецензент: – *Мухин М.С.,*
к.ф.-м..н. ФГБУ ВО и Н
«Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
Академический университет
имени Ж.И. Алфёрова Российской
академии наук», доцент

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Кластеры могут определяться как агрегированные частицы, размерами от трех до нескольких миллионов атомов или молекул в одном, состоящие как из одного материала, так и сложного химического состава. Таким образом кластеры могут рассматриваться как связующее звено между материалами молекулярного размера, с одной стороны и макро размерными материалами с другой. Ранее, в различных исследованиях, в особенности в тех, что сконцентрированы на исследовании кластерных материалов, было наглядно продемонстрировано, что они кластеры проявляют новые и уникальные электрические, магнитные, оптические, каталитические и другие свойства [1-8], которые критически зависят от размера самих кластеров и часто значительно отличаются от свойств проявляемых материалами в макроразмере такого же химического состава. Эти свойства проявляются из-за большого соотношения количества поверхностных атомов к их количеству в объеме частицы (отношение объема частицы к площади поверхности) (в кластере радиусом в 1 нм, примерно 50% всех атомов кластера находятся на поверхности кластера) Кластеры, в зависимости от метода их формирования могут состоять из чистых элементов или из сплавов, и представлены в кристаллической или аморфной формах. Кластеры могут обладать совершенно новыми свойствами, которые можно изменять и, даже, заниматься тонкой подстройкой свойств, путем варьирования размера кластера и химического состава, а также фазового состояния кластеров. Это может привести к появлению новых типов материалов, основанных на кластерах как на строительной единице, и характеристики которых могут быть адаптированы и оптимизированы в соответствии с предполагаемыми областями их применения.

В целом, кластеры могут быть синтезированы различными химическими и физическими методами [9]. Универсальным методом, с точки зрения возможности выбора системы материалов и размеров получаемых кластеров, обеспечивающим

высокий уровень контроля, воспроизводимости и чистоты, является синтез кластеров в газовой фазе [3] с последующим осаждением ионного пучка кластеров (ОИПК) в условиях сверхвысокого вакуума (UHV). Спектр кластерных наноструктур и материалов, которые могут быть синтезированы с помощью ОИПК, очень широк.

Исследование свойств кластеров, так и методов их синтеза – это большая область материаловедения, представляющая широкий интерес, в связи с потенциальными уникальными свойствами кластерных материалов.

Цель работы состояла в исследовании возможности синтеза кластерных материалов путем их осаждения из ионного пучка.

В связи с этим, в ходе выполнения работы было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести исследование процессов осаждения из ионного пучка кластерных материалов
2. Разработать специализированную маску, предназначенную для осаждения кластерных материалов с материалами матрицы
3. Провести синтез кластеров на 2 стадиях осаждения. Проверить принципиальную возможность синтеза кластерных материалов и тонких пленок на их основе.
4. Исследовать физические свойства синтезированных образцов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы особенности процесса осаждения кластерных материалов
2. Исследована возможность получения кластерных материалов с узким распределением по размерам
3. Получены новые знания о кластерных пленках FeSc и зависимости свойств от энергии осаждения кластеров
4. Получены новые знания о свойствах нанокompозита состоящего из кластеров Fe размером в 1000 атомов и включенных в матрицу Ag.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Продемонстрирована принципиальная возможность синтеза кластерных материалов с узким распределением по размерам, включенных в матрицу.
2. Продемонстрирована возможность изменения свойств получаемых пленок путем варьирования энергии осаждения.
3. Продемонстрирована возможность изменения свойств получаемых пленок путем варьирования концентрации кластеров в итоговой пленке.

Материалы и методы исследования

Эксперименты по синтезу кластерных материалов проводились на установке осаждения из ионного пучка кластеров, которая расположена в Технологическом Институте г. Карлсруэ (Karlsruhe Institute of Technology), Германия, в Институте Нанотехнологий (Institute of Nanotechnology). Для синтеза использовались специально разработанные маски, позволяющие проводить со-осаждение кластеров определенного размера вместе функциональным материалом матрицы. Осаждение проводилось на подложки монокристаллического кремния, предварительно очищенные от возможных загрязнений в кислородной плазме. Осаждение проводилось при различных энергиях – от 50 eV до 12 keV. Для предотвращения агломерации осажденных кластеров на поверхности осаждение проводилось при температуре жидкого азота.

Исследования структуры и свойств синтезированных материалов было выполнено с помощью различных инструментов, таких как: FEI Titan 80-300 просвечивающий электронный микроскоп, Zeiss Ultra plus Сканирующий электронный микроскоп, Zeiss Auriga 60 с системой сдвоенного ионного пучка, MPMS3 SQUID магнетометр Quantum Design.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости работы.

Первая глава носит обзорных характер. Она в подробностях описывает установку осаждения из ионного пучка кластеров. В этой главе подробно раскрывается устройство установки – описывается источник кластеров типа Хаберланд, система электронных фокусируемых линз, 90 градусный магнит, служащий для разделения ионного пучка по массе. Так же приводится подробное описание двух различных стадий осаждения кластерных материалов. Первая стадия, позволяющая осаждать пучок кластеров с их естественным распределением по размерам, получаемый из источника кластеров. Вторая стадия, расположенная за 90-градусным магнитом, позволяющая осаждать кластеры с узким распределением по размерам, с разными энергиями осаждения. Кроме того, вторая стадия позволяет проводить со-осаждение кластеров с дополнительным материалом матрицы, который может носить и функциональные свойства – создавать локальные сплавы на границе раздела кластер-матрица, предотвращать агломерацию и др.

Основная цель при создании систем ОИПК – добиться максимального контроля над такими параметрами как: размер кластера, объем и равномерность кластерного слоя, и чистота синтезированного образца. Представленная система ОИПК имеет возможность синтезировать в широком спектре масс получаемых кластеров (от единиц атомов до нескольких тысяч атомов в одном кластере), получая ионный пучок с узким распределением по массам (от 2% до 10%). Система укомплектована двумя зонами осаждения – первая зона предназначена для осаждения пучка кластеров, выходящих напрямую из источника, и позволяет получать относительно большие объемы кластеров (микрограммы), при осаждении

на протяжении нескольких часов. Вторая зона осаждения позволяет получать наногаммы материала, путем осаждения кластеров с узким распределением по массе. Кроме того, вторая стадия укомплектована дополнительными источниками материалов, позволяющих со-осаждать кластеры в матрице. Основным элементом обеих стадий осаждения являются специально разработанные держатели образцов, основанные на комбинации специализированной маски и держателя. Как показано в работе такая комбинация позволяет контролировать объем осаждаемых кластеров ($\pm 10\%$) и получать равномерно распределенные по поверхности образцы ($\pm 10\%$). Эта высокая степень точности делает возможным производить образцы с высокой воспроизводимостью и позволяет синтезировать образцы для полноценных исследований свойств кластеров различных материалов в зависимости от их размера и концентрации.

Чтобы обеспечить как можно более чистые условия процесса, вакуумная система установки ОИПК укомплектована серией турбомолекулярных насосов с общей номинальной скоростью откачки 4200 л/с, которые поддерживают давление в камере второй стадии осаждения в диапазоне 10^{-9} мбар в процессе работы системы ОИПК.

Источник кластеров (рисунок 1) основан на конструкции типа Хаберланда и др., использующей магнетронное распыление в сочетании с конденсацией в атмосфере инертного газа. Для объединения этих двух процессов магнетронный источник (рис. 1 а) монтируется в трубку, охлаждаемую жидким азотом (рис. 1 б) и погружается в поток He (рис. 1 с). Ag используется в качестве газа распылителя (рис. 1 d). В зоне агрегации распыленные атомы охлаждаются при столкновении с низкоэнергетичными атомами He и Ag и агрегируют в кластеры различных размеров. В конце области агрегации (Рис. 1 е) кластеры покидают источник через регулирующую диафрагму (диаметр от 1 до 15 мм) в режиме сверхзвукового расширения (Рис. 1 f), что эффективно останавливает рост кластеров. Таким образом, размер кластера в основном определяется соотношением потока Ag и He (обычно $100 \text{ см}^3/\text{мин}$ Ag и до

800 см³/мин He), и может быть дополнительно отрегулирована с помощью длины зоны агрегации (расстояние между распыляемой мишенью и диафрагмой, может изменяться от 5 до 20 см), давления в зоне агрегации (от 0,1 до 10 мбар, регулируется диаметром диафрагмы) и мощности магнетронного источника (обычно от 20 до 100 В)

Рисунок 2 демонстрирует типичное распределения пучка кластеров по массе, при их выходе из источника, для анализа использовалась медная мишень. Источник был отрегулирован для синтеза относительно больших кластеров меди, а максимум в распределение масс был сдвинут с кластеров размером в 500 атомов на кластеры размером в 3000 атомов, путем изменения потока He с 210 до 70 см³/мин. При этом все остальные параметры оставались постоянными.

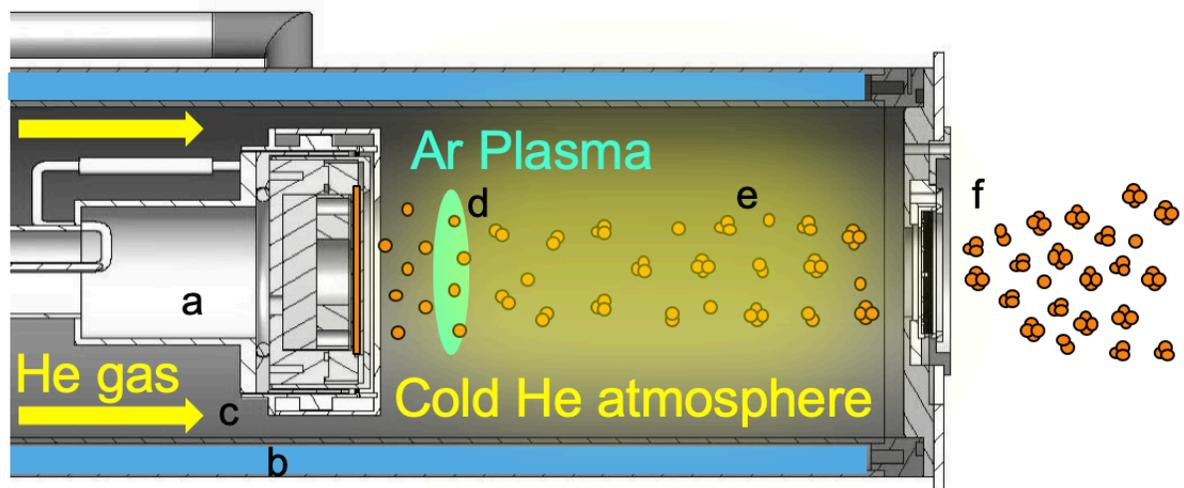


Рисунок 1. CAD модель источника кластера. Голова магнетронного распылителя (a) помещается в трубку с охлаждаемую жидким азотом (b) и погружается в поток He (c). Ar используется в качестве газа распылителя (d). Распыленные атомы конденсируются в кластерах в зоне агрегации перед распыляемой мишенью (e) и покидают источник в режиме сверхзвукового расширения через регулирующую диафрагму (f).

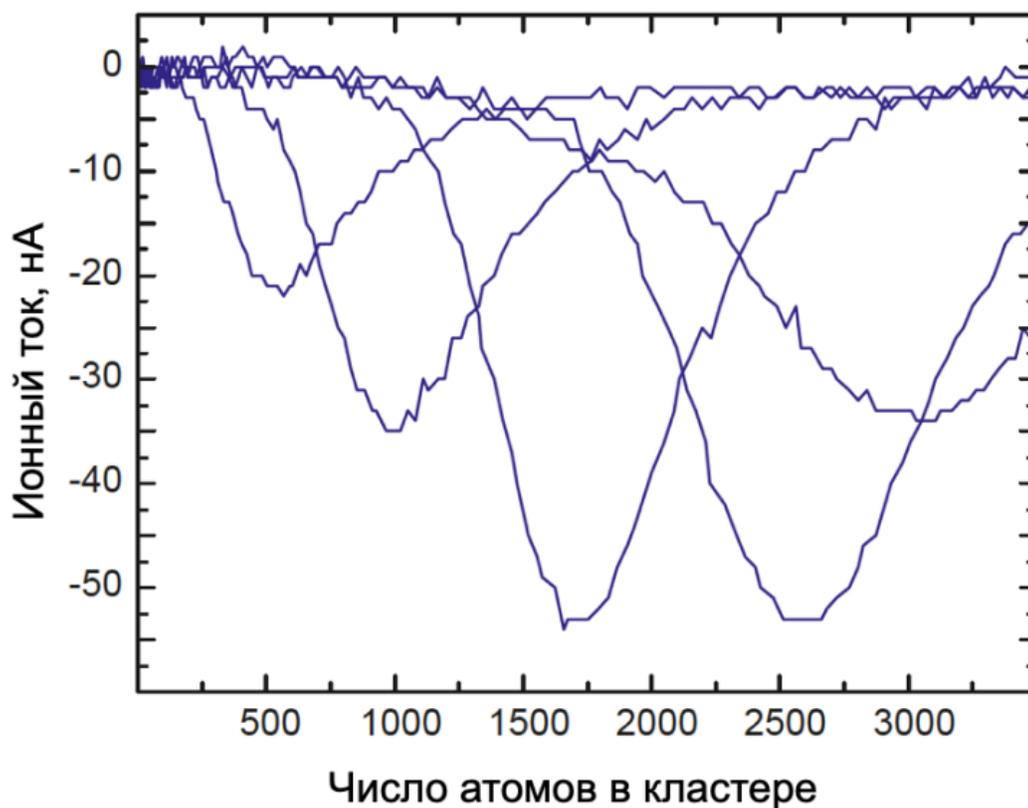


Рисунок 2. Репрезентативный масс-спектр кластеров меди. Большие отрицательные кластеры меди в первичном пучке до разделения пучка по массе и различным потоком He. Слева направо: 210 см³/мин He, 150 см³/мин He, 110 см³/мин He, 90 см³/мин He и 70 см³/мин He.

В общем случае, из кластеров, покидающих источник, примерно 50% являются нейтральными, а остальные 50% - ионизированными. Относительное количество нейтральных к ионизированным кластерам может варьироваться в зависимости от используемого материала. По экспериментальным наблюдениям, ионы кластеров являются единично заряженными, второго пика в графике распределения по массе, предполагающего двойной заряд кластеров, не наблюдалось. Для экспериментов по осаждению используются только ионизированные кластеры, так как заряд позволяет проводить их анализ, разделение по массе и дальнейшие манипуляции с кластерами.

В качестве ключевого элемента установки был выбран большой 90-секторный магнит с радиусом 500 мм, зазором между полюсами 22 мм (высота внутренней

вакуумной трубки 18 мм) и максимальным магнитным полем 1,4 Т (по индивидуальному заказу Danfysik).

Используя первую стадию осаждения (рисунок 3), можно осаждать полный пучок кластеров и синтезировать тонкие пленки толщиной в несколько сотен нанометров, что соответствует массе в микрограммовом диапазоне. Этого количества материала достаточно для проведения большого количества разнообразных экспериментов, таких как, механические испытания и анализ с использованием различных спектроскопических методов. На этой стадии осаждения кластеры осаждаются в полном состоянии, демонстрирующее естественное распределение по массе, создаваемое источником (рисунок 1). В случае полного пучка кластеров конечное распределение размеров кластеров, регулируется экспериментальными параметрами источника и контролируется с помощью времяпролетного масс-спектрометра. Как показано на рисунке 2, масс-спектрометр и образец смонтированы на манипуляторе. Это дает возможность перемещать ускорительные пластины масс-спектрометра в пучок кластеров для их анализа. Таким образом, область анализа распределения пучка по массе с помощью времяпролетного масс-спектрометра может быть помещена в то же самое положение, что и участок осаждения полного пучка.

Во время осаждения, энергия осаждения каждого кластера может варьироваться в диапазоне от 10 эВ до 12 кэВ, для этого изменяется приложенное напряжения на держателе образца. После осаждения образцы могут быть перенесены в соседнюю камеру, где может быть нанесен дополнительный защитный слой с помощью метода термического испарения.

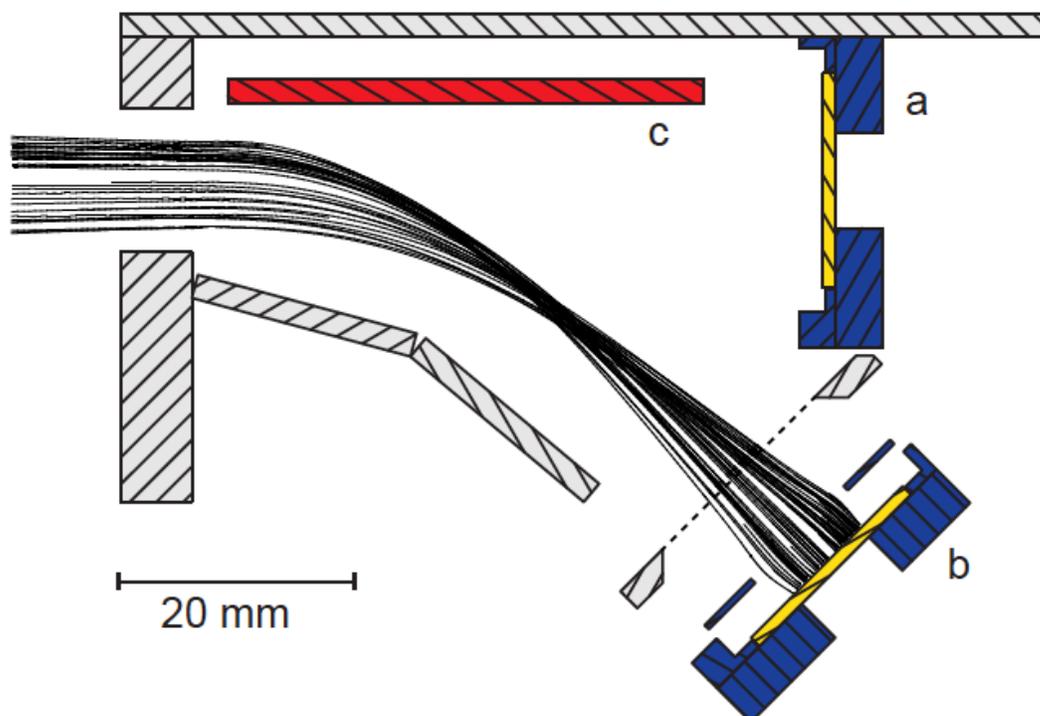


Рисунок 3. Схематичное изображение сечения первой стадии осаждения с смоделированными траекториями ионов. Два держателя образцов (синие) для модифицированных держателей образцов Omicron: (a) для осаждения полного пучка и (b) для осаждения ионизированных кластеров. Ионизированные кластеры направляются в (b) с помощью отклоняющего электрода (c). Моделирование проводилось при энергии ионов 500 эВ, размерах кластеров 1000 атомов/кластеров Fe (56000 а.е.м.) и энергией осаждения равной 100 эВ. Требуемое напряжение отклонения составляло 280 В.

Вторая стадия осаждения, расположенная за секцией разделения по массе, служит для осаждения определенного количества выбранных по массе кластеров с возможностью совместного осаждения с матричным материалом в условиях сверхвысокого вакуума. Базовое давление в области осаждения находится в низком диапазоне 10^{-10} мбар и в процессе осаждения остается в диапазоне 10^{-9} мбар. В зависимости от размера кластера и выбранного материала можно получить результирующую толщину пленки в диапазоне 10 нм (состоящую только из кластеров). Это соответствует нанограммам чистых кластеров. Во время осаждения

держатель образца можно охладить до 153 К, или, при необходимости, нагреть до 673 К.

На рисунке 4 а представлена 3D CAD модель второй стадии осаждения, а на рисунке 4 б – схематичное изображение сечения области (область, отмеченная пунктирной красной линией). На рисунке 4а дополнительно продемонстрированы смоделированные траектории ионов, полученные в программном пакете SimIon. Кластеры, поступающие из секции разделения по массе, направляются к держателю образца с помощью набора цилиндрических электростатических линз (рисунок 4 б1) предназначенных для фокусировки, замедления или ускорения заряженных кластеров. Последний электрод, расположенный перед зоной осаждения, представляет собой четырехсекторный электрод (рисунок 4 б2), который позволяет отклонять пучок кластеров, тем самым обеспечивая равномерное осаждение покрытия кластеров.

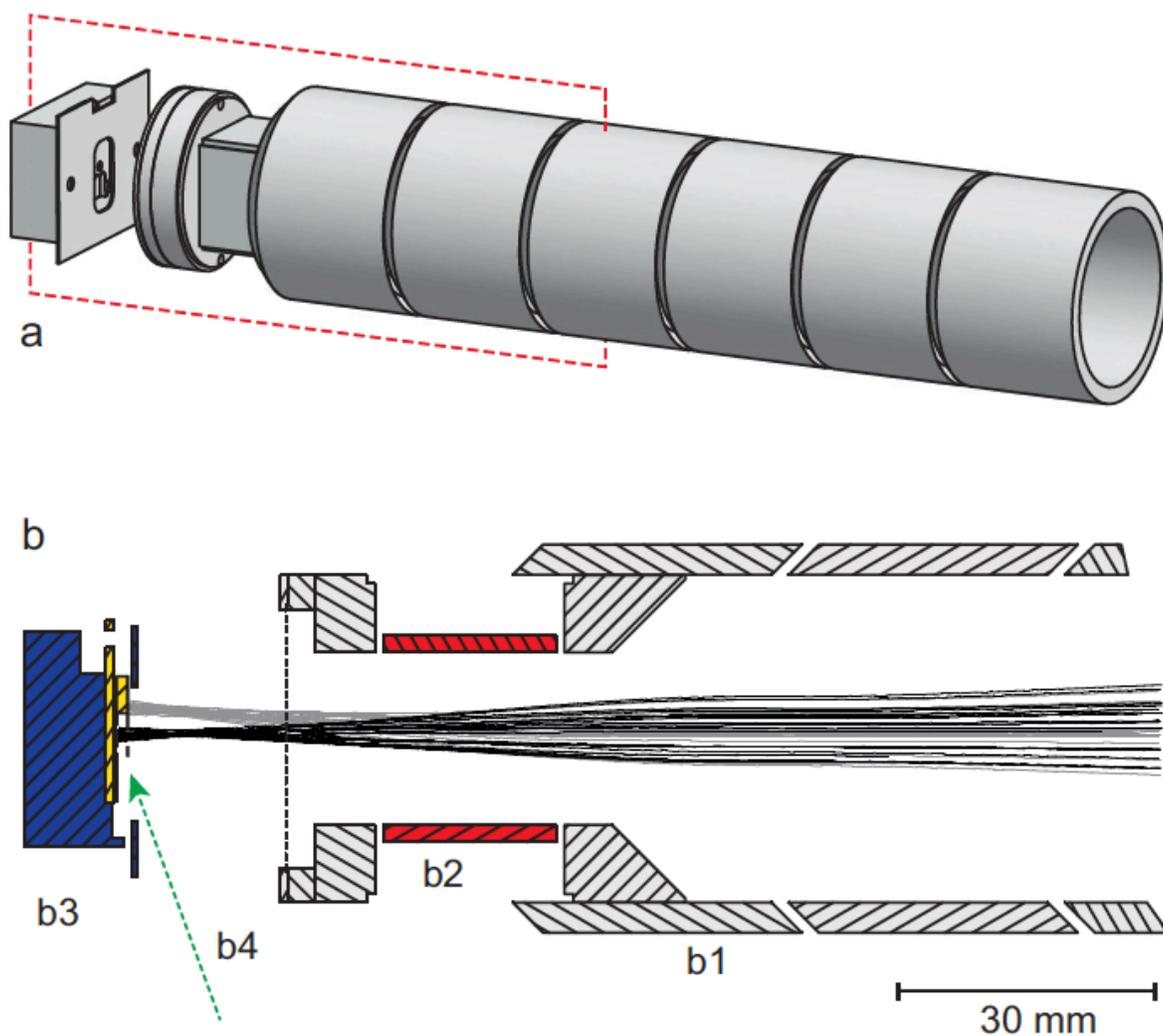


Рисунок 4. (а) 3D CAD модель второй стадии осаждения, (б) Схематичное изображение второй стадии осаждения в разрезе. Кластеры проходят через электростатические линзы для замедления и фокусировки (b1), могут отклоняться в четырехсекторном электроде (b2) и осаждаются на держатель образца (b3). Материал матрицы (b4) осаждается под углом 70 градусов к нормали поверхности образца.

Вторая глава посвящена результатам синтеза кластерных материалов на каждой стадии осаждения. В первой части этой главы представлены результаты осаждения на первой стадии – аморфные кластеры FeSc осаждались на подложку с разными энергиями осаждения (600, 900 и 12000 eV). Для синтеза наностекла путем осаждения аморфных кластеров на подложку с контролируемой энергией был использован ионный пучок кластеров с натуральным распределением по размерам создаваемым источником кластеров, что позволяло использовать для экспериментов первую стадию осаждения. Недостаток более широкого распределения по размерам, в данном исследовании компенсировался возможностью осаждения относительно большого количества кластеров может быть осаждено за относительно короткое время (порядка часа), по сравнению с осаждением, кластеров с узким распределением, на второй стадии.

В целом, при синтезе металлических стекол выгоден быстрый переход из жидкой в твердую фазу, так как он способствует образованию аморфной фазы. Для эвтектических составов жидкая фаза, как правило, поддерживается до низких температур, а переход происходит в очень узком температурном диапазоне, поэтому такие составы хорошо подходят для стекообразования. Fe-Sc имеет два эвтектических состава, один со стороны Fe (89,8 ат.% Fe, 10,2 ат.% Sc) и один со стороны Sc (24,9 ат.% Fe, 75,1 ат.% Sc) на бинарной фазовой диаграммы. В предыдущем исследовании были изучены магнитные свойства наностёкол Fe-Sc с примерно 90 ат.% Fe, близких к эвтектической точке со стороны Fe, стекла. Таким образом, для синтеза сплава Fe-Sc без присутствия фазы α -Fe для экспериментов с системой ОИПК была выбрана композиция, содержащая только 80 ат.% Fe (но все же близкая к эвтектическому составу).

С помощью первой стадии осаждения в системе ОИПК была синтезирована серия из трех образцов со средним размером кластера 1000 атомов/кластер (+/- 300 атомов в кластере, определено с помощью времяпролетного масс-спектрометра) и энергией осаждения 600 эВ, 900 эВ и 12 кэВ на кластер, соответственно. С этого

момента три образца из этой серии будут, соответственно, называться образцами 600 эВ, 900 эВ и 12 кэВ. Для всех образцов использовалась подложка монокристаллического кремния с естественным оксидным слоем. Кроме того, тонкопленочные образцы были защищены от дальнейшего окисления слоем магния толщиной 200 нм после осаждения кластеров. Время осаждения для образцов Fe-Sc составляло 1 час для каждого образца, в результате чего толщина пленки составляла порядка 100 нм (измерение производилось с помощью профилометра).

Показано изменение магнитных свойств получаемых пленок (рисунки 5 и 6) в зависимости от энергии осаждения. Образец с энергией осаждения 12 кэВ подвергается переходу от Ферромагнитного Состояния (ФС) к Парамагнитному Состоянию (ПС) около 200 К и является почти полностью в ПС для температур выше 250 К. Для образца с напряжением 900 эВ переход также отчетливо виден, но он сдвигается в область более высоких температур (около 250 К). Более того, этот образец показывает наличие небольшого ФС компонента даже при комнатной температуре. Температура перехода от ФС к ПС отчетливо смещается в образце с энергией осаждения 600 эВ. В этом образце она выше 400 К и, следовательно, выше области измерения используемого магнитометра. На рис. 15 показаны петли намагничивания трех образцов, которые были измерены при 5 К и 300 К. При 5 К все три образца находятся в ФС и материал легко насыщается почти без коэрцитивной силы. Такое поведение полностью соответствует магнитной фазовой диаграмме для аморфных Fe-Sc. Тем не менее, петли намагничивания, измеренные при 300 К, демонстрируют некоторые явные различия между тремя образцами:

- 1) 600 эВ: образец находится в ФС при 300 К и магнитный момент аналогичен моменту, измеренному при 5 К, и его легко насытить. Основным отличием петли намагничивания, измеренной при 300 К, от петли, измеренной при 5 К, является потеря примерно 25% намагниченности при насыщении.
- 2) 900 эВ: этот образец демонстрирует магнитное поведение, похожее на смесь двух других образцов. С одной стороны, у него слабое ФС при 300 К,

что составляет примерно 10% от его насыщенного намагничивания при 5 К. С другой стороны, ПС трудно поддается насыщению. Наконец, форма ПС в петле намагничивания аналогична форме образца 12 кэВ.

- 3) 12 кэВ: при 300 К в петле намагничивания отсутствует ФС. Петля имеет почти линейную форму, и при этой температуре образец находится в ПС. Что касается отношения момента ФС при 5 К, к моменту ПС при 300 К, то оно очень близко к отношению момента аморфного Fe-Sc.

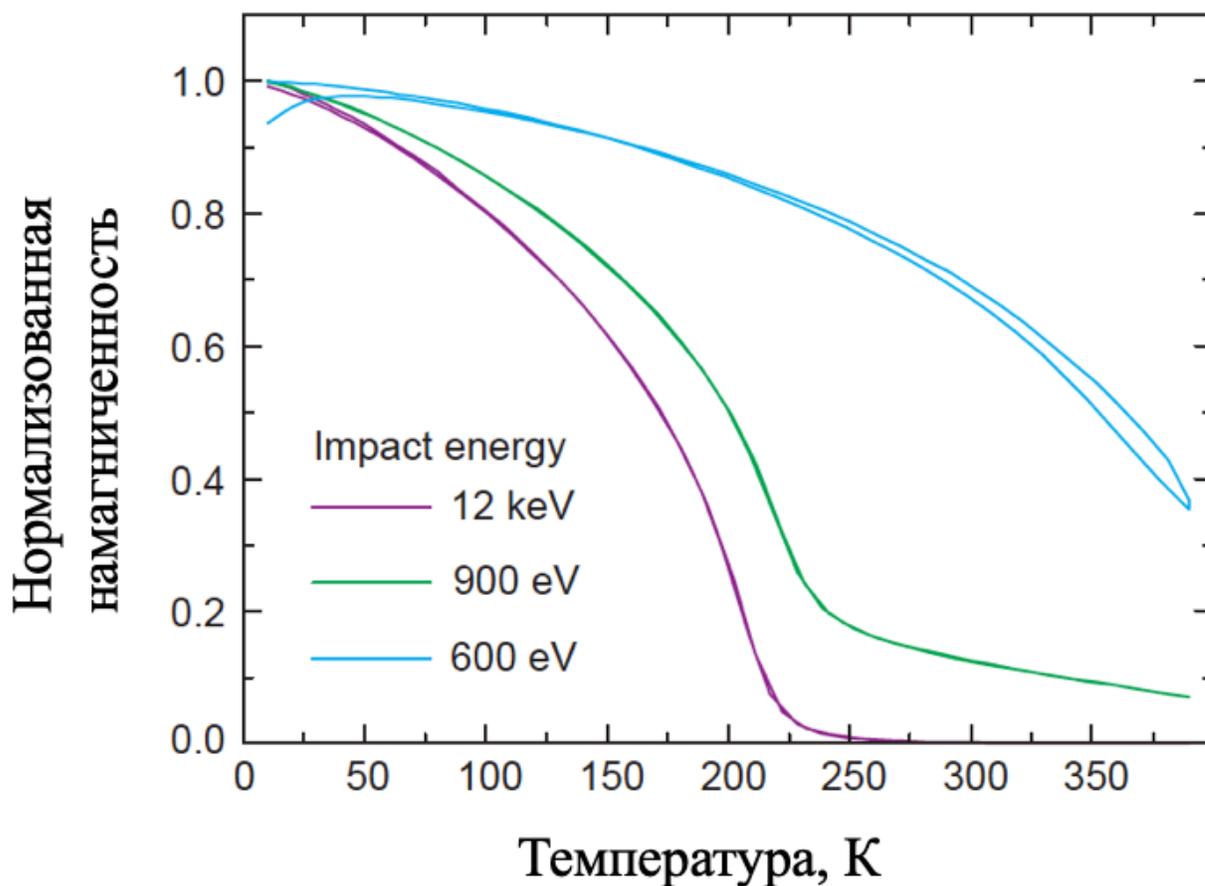


Рисунок 5. Измерения намагниченности образцов Fe-Sc в охлаждение в нулевом внешнем магнитном поле и охлаждение в приложенном поле (ZFC/FC), синтезированных с разной энергией осаждения и средним размером одного кластера около 1000 атомов.

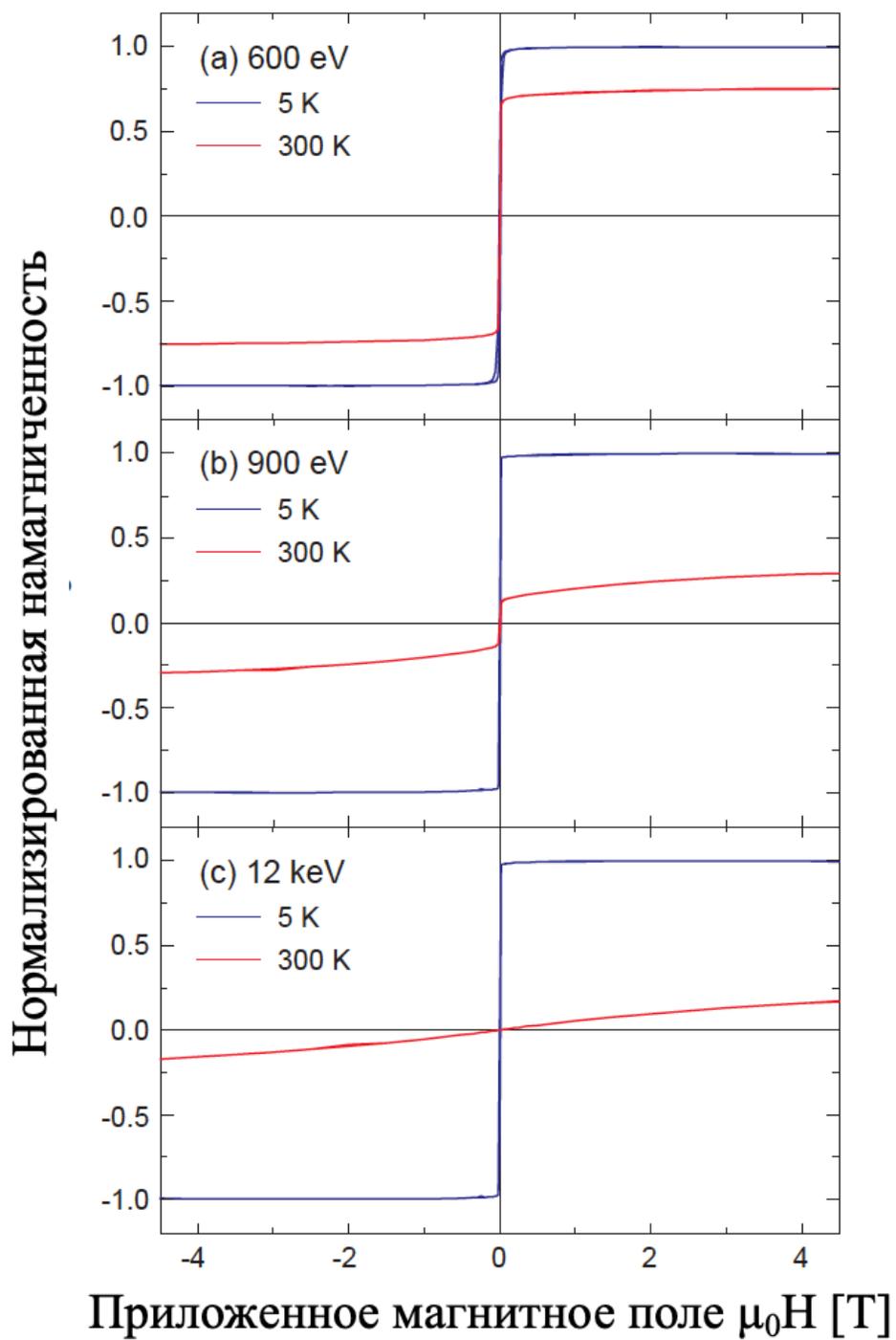


Рисунок 6. Петли намагничивания образцов Fe-Sc, измеренные при 5 К и 300 К. При 5 К все три образца ферромагнитные и материал легко насыщается. При 300 К присутствуют четкие различия между тремя образцами.

Таким образом продемонстрирована принципиальная возможность изменения свойств получаемых материалов путем изменения условий осаждения.

Во второй части этой главы представлены результаты синтеза образцов на второй стадии осаждения. Демонстрирована возможность получения кластеров железа с узким распределением по размерам, включенные в матрицу серебра. Приведены результаты исследования образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии и результаты исследования магнитных свойств кластеров с помощью SQUID магнетометра.

Образцы Fe_x/Ag с 2, 10, 50 и 100 об.% Fe_{1000} были синтезированы с энергией осаждения 50 эВ/кластер. Поскольку каждый из образцов номинально содержит одинаковое количество Fe_{1000} , а именно эквивалент пленки толщиной в 6 нм, это привело к тому, что толщина матрицы Ag составила около 294, 54, 6 и 0 нм, соответственно. Для минимизации подвижности кластера во время осаждения держатель образца охлаждался жидким азотом и поддерживался в охлажденном состоянии до конца процесса синтеза.

Для всех синтезированных образцов в качестве подложки использовалась пластина Si с нативным оксидным слоем, на которую наносился адгезионный слой Ta толщиной в 2 нм. Кроме того, до начала осаждения кластеров и матрицы Ag, адгезионный слой Ta покрывался буферным слоем серебра в 5 нм. А после осаждения кластеров каждый образец был дополнительно покрыт слоем серебра в 20 нм. Буферный слой обеспечивал контакт кластеров только с Ag, а верхний слой защищал образцы от окисления после синтеза и при последующих измерениях, например, в SQUID.

Для исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии были синтезированы специальные образцы – кластеры Fe_{1000} осаждались на специализированную функциональную углеродную решетку (подложку), специальной формы (рисунок 7). Тонкий слой, толщиной менее 1 монослоя

кластеров, осажденный в режиме мягкого осаждения (50 eV на один кластер). Дополнительный защитный слой не осаждался, для защиты образцов от их окисления, была разработана и создана специализированная мобильная камера, позволяющая переносить образцы в условиях высокого вакуума (вакуум в камере остается в пределах 10^{-7} мбар до 3 часов). С помощью этой камеры образцы переносились в перчаточный бокс, где в атмосфере аргона происходил монтаж образца в специализированный держатель образцов.

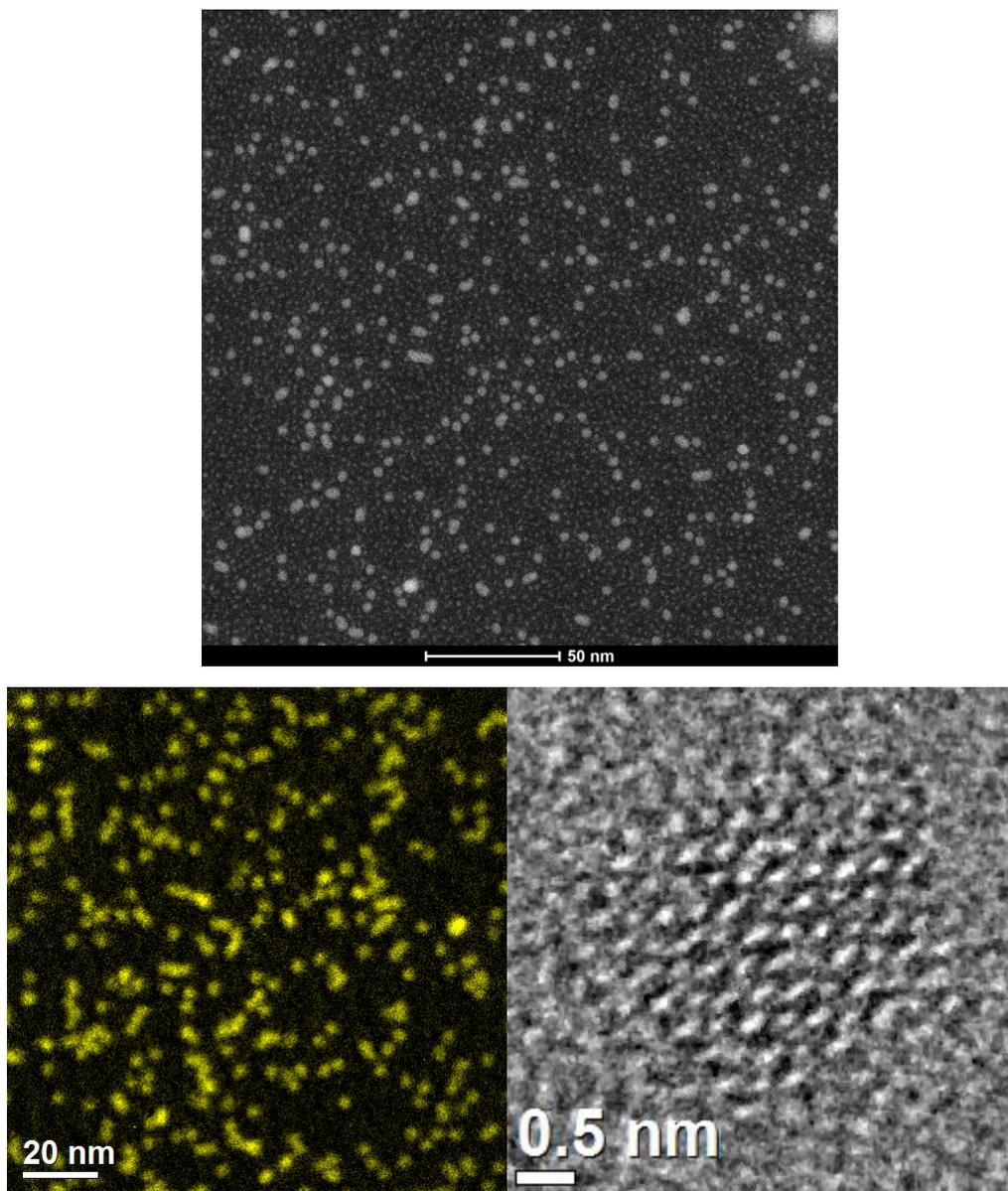


Рисунок 7. Результаты просвечивающей электронной микроскопии

Проведенный анализ показал присутствие кластеров на подложке, и позволил полностью подтвердить их узкое и равномерное распределение по размерам.

Было проведено исследование магнитных свойств получаемых кластеров (рисунки 8 и 9). Стандартные измерения ZFC/FC на образцах проводились в приложенном, относительно малом, магнитном поле $H_0 = 20\text{ мТ}$ (рис. 19). Магнитные измерения проводились на образцах с плоскостной геометрией, т.е. магнитное поле применялось параллельно поверхности образца; эта геометрия измерения использовалась для сбора всех магнитных данных. Для образца 2 об.% Fe, T_b ниже 10 К и, вычитая фон, возникающий от подложки, кривая ZFC/FC показывает зависимость $1/T$ для температур выше T_b . Это свидетельствует о хорошо разделенных суперпарамагнитных кластерах, практически не имеющих магнитных взаимодействий. В образцах 10 об.% Fe и 50 об.% Fe, напротив, T_b равна, примерно 35 К и 120 К соответственно, что свидетельствует о возрастании магнитных взаимодействий и формировании агрегатов, особенно для образца 50 об.% Fe. Для образца из 100 об.% Fe (только кластеры Fe) кривая ZFC/FC показывает лишь небольшие изменения намагниченности от температуры. Это означает, что этот образец демонстрирует магнитное поведение, практически такое же, как и у тонкопленочного Fe.

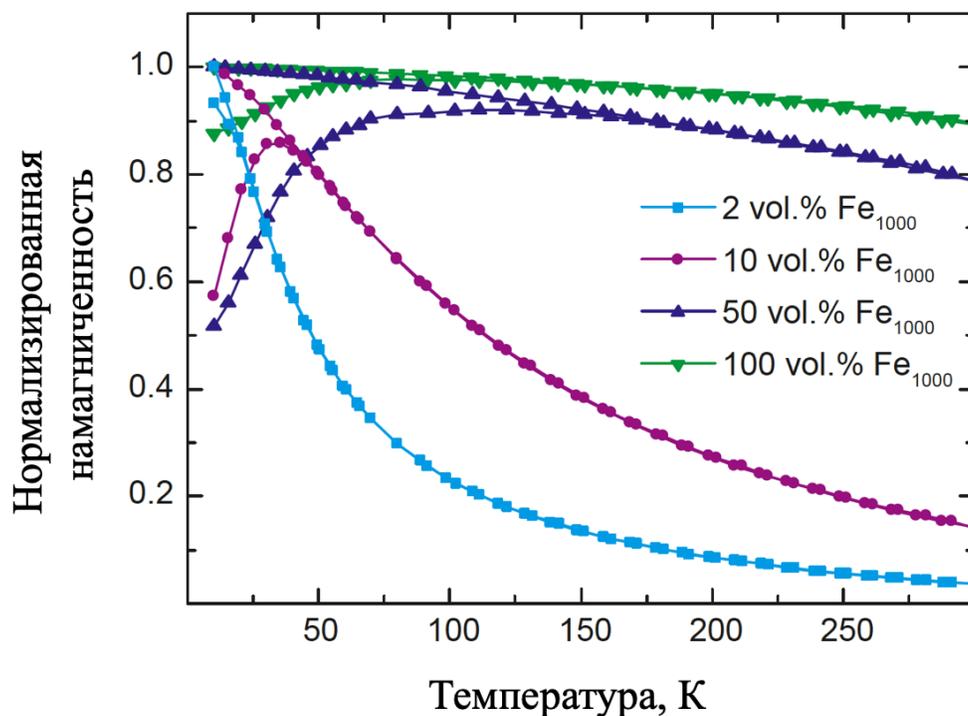


Рисунок 8. График кривых ZFC/FC для образцов Fe₁₀₀₀ кластеров включенных в матрицу Ag с 2, 10, 50 и 100 об.% кластеров Fe.

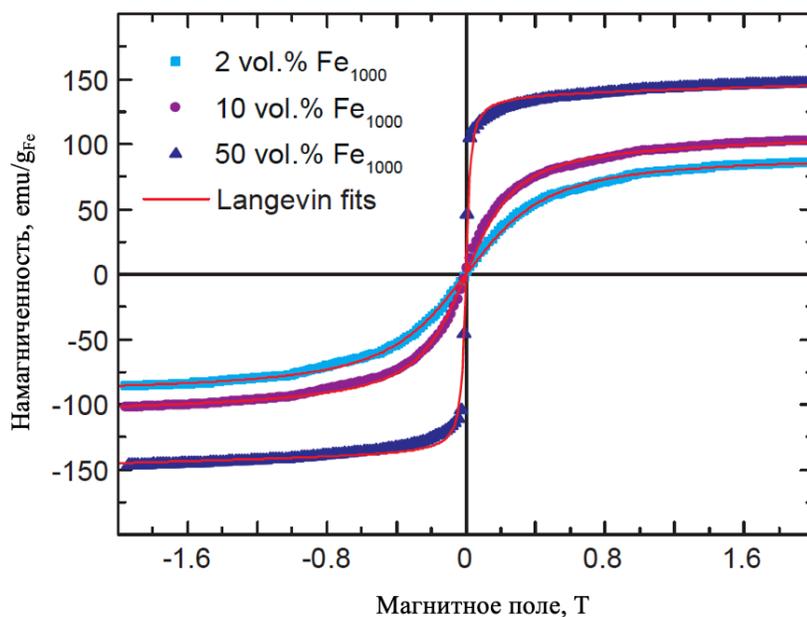


Рисунок 9. Петли намагничивания образцов Fe₁₀₀₀/Ag с 2, 10 и 50 об.% Fe₁₀₀₀, зарегистрированные при 300 К. Данные были совмещены с функциями Ланжевена.

Результаты магнитного и EDS анализов образца Fe₁₀₀₀ с концентрацией кластеров в 2 об.% позволили получить следующие результаты. Во-первых, было установлено (для всех образцов), что измеренный M_{sat} не соответствует значению, которое ожидалось бы для соответствующего количества Fe в образце (220 emu/g_{Fe}). Для образца Fe₁₀₀₀ с 2 об.% это несоответствие составляет около 50% от номинального значения. Во-вторых, EDS-анализ образца выявил (для всех образцов), что общее количество Fe, присутствующих в образце, соответствует количеству Fe, которое предполагалось осадить в виде кластеров и которое измерялось в образце путем подсчета осаждаемых кластеров. В-третьих, подгонка Ланжевена к зарегистрированной петле намагничивания образца с 2 об.% Fe₁₀₀₀, зафиксированная при 300 К, показала, что магнитный момент на частицу в образце составляет 2200 В. Если предположить, что магнитный момент 2.2 В на атом Fe (величина макроразмерного Fe), то это означает, что все присутствующие в образце кластеры состоят из 1000 атомов.

Заключение

- Был проведен успешный синтез образцов кластерных материалов на обеих стадиях осаждения;
- Была разработана специализированная маска, позволяющая производить одновременное со-осаждение кластеров и материала матрицы;
- Проведено исследование кластерных образцов разной геометрии, синтезированных на обеих стадиях осаждения системы;
- Были проведены исследования физических свойств, синтезированных образцов;
- Была продемонстрирована принципиальная возможность синтеза кластерных материалов различного химического состава.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы

1. Osipov, A.A., **Iankevich, G.A.** & Alexandrov, S.E // Plasma Chemistry and Plasma Processing 40, 423–431, 2020.
2. Artem A. Osipov, **Gleb A. Iankevich**, Vladimir I. Berezenko, Anastasiya B. Speshilova, Sergey E. Alexandrov// Materials Today: Proceedings, 2020.
3. Artem A. Osipov, **Gleb A. Iankevich**, Vladimir I. Berezenko, Ekaterina V. Endiarova // Materials Today: Proceedings, 2020.
4. Artem A. Osipov, **Gleb A. Iankevich**, Sergey E. Alexandrov // Materials Research Express, 2019, V. 6, N. 4.
5. Tyurikova, I., Aleksandrov, S. E., Tyurikov, K., & **Iankevich, G. A.** // Key Engineering Materials, 822, 320–326, 2019.
6. Iankevich, G. A. // Key Engineering Materials, 822, 587–593, 2019

Список цитируемой литературы

1. E. Barborini, G. Corbelli, G. Bertolini, P. Repetto, M. Leccardi, S. Vinati, and P. Milani, New Journal of Physics 12, 073001 (2010) 10.1088/1367-2630/12/7/073001.
2. S. H. Baker, M. Roy, S. C. Thornton, and C. Binns, Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal 24, 176001 (2012) 10.1088/0953-8984/24/17/176001.
3. J. Bansmann, S. Baker, C. Binns, J. Blackman, J. Bucher, J. Dorantedavila, V. Dupuis, L. Favre, D. Kechrakos, and A. Kleibert, Surface Science Reports 6, 189 (2005) 10.1016/j.surfrep.2004.10.001.
4. C. Binns, S. Baker, S. Louch, F. Sirotti, H. Cruguel, P. Prieto, S. Thornton, and J. Bellier, Applied Surface Science 226, 249 (2004) 10.1016/j.apsusc.2003.11.069.
5. V. Dupuis, L. Favre, S. Stanescu, J. Tuailleon-Combes, E. Bernstein, and A.Perez, Journal of Physics: Condensed Matter 16, S2231 (2004) 10.1088/953-8984/16/22/024.
6. B. Palpant, B. Prével, J. Lermé, E. Cottancin, M. Pellarin, M. Treilleux, A.Perez, J. Vialle, and M. Broyer, Physical Review B 57, 1963 (1998) 10.1103/PhysRevB.57.1963
7. S. Kunz, K. Hartl, M. Nesselberger, F. F. Schweinberger, G. Kwon, M. Hanzlik, K. J. J. Mayrhofer, U. Heiz, and M. Arenz, Physical chemistry chemical physics : PCCP 12, 10288 (2010) 10.1039/c0cp00288g (cit. on p. 1).
8. Y. Watanabe and N. Isomura, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 27, 1153 (2009) 10.1116/1.3179160
9. J. Aiken and R. Finke, Journal of molecular catalysis A: chemical 145, 1(1999) 10.1016/S1381-1169(99)00098-9.