

На правах рукописи

ПУШКАРЕВ Роман Владимирович

**Пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$: синтез из газовой фазы,
структура и функциональные свойства**

02.00.04 – физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук (ИНХ СО РАН)

Научный руководитель

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Файнер Надежда Ильинична

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, главный научный сотрудник
Паукштис Евгений Александрович
ФГБУН Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
г. Новосибирск

кандидат физико-математических наук, заведующий отделом
Дворецкий Сергей Алексеевич
ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск

Ведущая организация

ФГБУН Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «21» ноября 2018 года в 12-00
на заседании диссертационного совета Д 003.051.01
на базе ИНХ СО РАН
по адресу: просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНХ СО РАН
и на сайте организации по адресу:

<http://niic.nsc.ru/institute/dissertatsionnyj-sovet/>

Автореферат разослан «20» сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

В.А. Надолинный

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современных областей науки и техники требует создания новых материалов с набором различных функциональных свойств, изменяющихся в широком диапазоне. В одной из наиболее интенсивно развивающихся областей, спинтронике, существует потребность в материале, который сочетал бы свойства полупроводника и ферромагнетика. В основе работы устройств спинтроники лежит явление спин-поляризованного токопереноса из инжектора через полупроводник в детектор. Для успешного функционирования таких устройств необходимо обеспечить высокую эффективность инъекции тока с заданной спиновой поляризацией в полупроводник. Использование в качестве инжектора полупроводника, удельное сопротивление которого близко к удельному сопротивлению основного полупроводника, позволяет значительно снизить потери спиновой поляризации на границе раздела инжектор/полупроводник.

Среди большого количества исследуемых материалов все большее внимание в последнее время привлекают аморфные ферромагнитные полупроводники. Магнитные и электрофизические свойства, а также процессы спин-поляризованного токопереноса для этих материалов изучены в значительно меньшей степени, чем для кристаллических аналогов. В то же время, функциональные характеристики аморфных полупроводников, такие как, проводимость, ширина запрещенной зоны и другие параметры можно изменять в широком диапазоне в отличие от более упорядоченных фаз. Кроме того, при использовании кристаллического полупроводника изменение магнитных и электрофизических характеристик зачастую взаимосвязано. Использование аморфных веществ, а именно варьирование их состава и структуры позволяет изменять эти характеристики независимо. Изучение полупроводниковых и магнитных характеристик, а также возможность управления ими за счет варибельности структуры и состава аморфных материалов является актуальной задачей, решение которой позволит приблизиться к созданию нового поколения магнитных устройств, предназначенных для хранения и обработки информации.

Степень разработанности темы исследования. В зависимости от метода синтеза и условий осаждения аморфный карбонитрид кремния может быть как полупроводником, так и диэлектриком. Его проводимость, ширина запрещенной зоны и другие функциональные свойства изменяются в широком диапазоне в зависимости от структуры и состава материала. Введение железа в состав карбонитрида кремния добавляет к имеющемуся набору свойств магнитные. На примере четырехкомпонентных керамик Si-C-N-Fe другими группами исследователей показана возможность создания ферромагнитных материалов. Представленные на сегодняшний день в литературе результаты по созданию такого материала относятся преимущественно к керамикам, полученным при пироли-

зе разветвленных полимерных предшественников. Следствием такого подхода к получению материала является высокая пористость керамик, которая негативно сказывается на их проводимости. Применение соединения в качестве инжектора спин-поляризованного тока требует создания плотных пленок на материалах, применяемых в современном технологическом цикле, в частности, на кремнии.

Введение нового элемента, такого как железо, может оказывать значительное влияние на электрофизические свойства материала. Механизм проводимости аморфных полупроводников и влияние атомов переходных металлов (ПМ), вводимых в состав полупроводника, на электрофизические характеристики изучены недостаточно и требуют дополнительного внимания для создания метода контроля функциональных параметров получаемых пленок.

Целью данной работы является исследование влияния условий осаждения на состав и структуру пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, а также изучение магнитных и электрофизических характеристик пленок в зависимости от их структуры и определение перспективности их использования для создания инжекторных слоев для спинтроники.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка методик осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из трехкомпонентных смесей ферроцена, кремнийорганического соединения гексаметилдисилазана или *трис*(диэтиламино)силана (ГМДС/ГДЭАС) и дополнительного газа (гелия/водорода/аммиака), а также пленок из двухкомпонентных смесей ферроцена и гелия/водорода;
- изучение химического и фазового состава продуктов разложения ферроцена – одного из компонентов используемых газовых смесей;
- исследование зависимости структуры, химического и фазового состава пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ от температуры осаждения, структуры исходного кремнийорганического соединения и природы используемого дополнительного газа;
- исследование зависимости электрофизических и магнитных характеристик пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ от их структуры и состава;
- определение оптимальных условий осаждения для получения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, обладающих свойствами, необходимыми для инъекции спин-поляризованного тока в кремний.

Научная новизна. Впервые разработаны методики синтеза пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из трехкомпонентных смесей ферроцена, КОС и гелия/водорода/аммиака методом химического осаждения из газовой фазы с термической активацией процесса.

Установлена зависимость химического и фазового состава пленок, осажденных из газовых смесей ферроцена и гелия/водорода от температу-

ры осаждения и материала используемой подложки в интервале условий, аналогичных условиям осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$. Основными железосодержащими продуктами разложения ферроцена являются $\alpha\text{-Fe}$ и цементит Fe_3C . Использование подложек $\text{Si}(100)$ приводит к образованию кристаллов силицида $\alpha\text{-FeSi}_2$, которые растут эпитаксиально на поверхности $\text{Si}(100)$. Показано, что при повышении температуры осаждения с 900 до 1000°C ориентация этих кристаллов изменяется с $\alpha\text{-FeSi}_2(001)\|\text{Si}(100)$ на $\alpha\text{-FeSi}_2(111)\|\text{Si}(100)$.

Установлена зависимость структуры, химического и фазового состава пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ от температуры осаждения, структуры и состава используемого КОС и природы используемого дополнительного газа. Пленки, полученные при температурах 800-850°C, являются аморфными. Осаждение в температурном интервале 900-1000°C приводит к образованию композитного материала: в аморфной матрице распределены кристаллы фаз графита, $\beta\text{-SiC}$ и силицидов железа FeSi , Fe_3Si , Fe_5Si_3 . Определено влияние типа используемого КОС и природы используемого дополнительного газа на состав пленок и соотношение долей связей Si-C/Si-N в получаемом материале.

Определена зависимость проводимости пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ от их состава и структуры. Получены пленки со значениями удельной проводимости в диапазоне $10^{-10} - 10^{-2}$ См/м.

Установлена корреляция между структурой пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ и их магнитными характеристиками. Показано, что пленки с низким содержанием железа, полученные при температурах ниже 900°C, являются парамагнитными. Осаждение при более высоких температурах приводит к получению ферромагнитных материалов с низкой величиной коэрцитивной силы.

Практическая значимость. Магнитные характеристики полученных пленок, такие как малое значение коэрцитивной силы и значения намагниченности насыщения до 21 э.м.е./см³, в совокупности с независимо изменяющейся величиной удельной проводимости позволяют рассматривать пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ как перспективный материал для создания инжектора спинполяризованного тока в кремний. Часть полученных данных используется в лекционном курсе «Химия функциональных материалов», читаемом в ИНХ СО РАН для аспирантов 1 года обучения.

Методология и методы диссертационного исследования. Методология исследования включает в себя разработку методик синтеза пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ методом химического осаждения из газовой фазы при высоких температурах, изучение продуктов термического разложения ферроцена, как одного из компонентов газовой смеси, используемой для получения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, характеризацию структуры и состава пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, установление зависимостей структуры материала от условий осаждения. На основе данных, полученных при изучении электрофизических и магнитных свойств пленок, были построены корреляции между набором

функциональных характеристик пленок, их структурой и составом.

Для характеристики пленок использовали набор методов, включающих в себя спектроскопии ИК и КРС, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, сканирующую электронную микроскопию, просвечивающую электронную микроскопию, электронную дифракцию в локальной области, рентгенофазовый анализ и метод полевых фигур. Исследование электрофизических свойств пленок проводилось с помощью анализа ВАХ структур $\text{Al/SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe/Si(100)}$, магнитные характеристики изучались методом электронного парамагнитного резонанса, а также с помощью вибрационного магнитометра.

На защиту выносятся:

- методика синтеза пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из смесей ферроцена, 1,1,1,3,3,3-гексаметилдисилазана/*трис*(диэтиламино)силана и гелия/водорода/аммиака, а также методики синтеза пленок из двухкомпонентных смесей ферроцена и гелия/водорода;
- зависимости химического и фазового состава, а также эпитаксиальной ориентации пленок, осажденных из смесей ферроцена и гелия/водорода, от условий их синтеза (температуры осаждения, состава газовой фазы);
- зависимости структуры, химического и фазового состава пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных из газовых смесей ферроцена, гексаметилдисилазана/*трис*(диэтиламино)силана и гелия/водорода/аммиака от условий их синтеза (температуры осаждения, класса используемого кремнийорганического соединения, состава газовой фазы);
- зависимости функциональных характеристик пленок (удельной проводимости, намагнитченности и коэрцитивной силы) от их структуры и состава.

Личный вклад автора. Поиск, анализ и обобщение литературных данных были проведены автором самостоятельно. Все описанные в работе образцы пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, а также пленок, полученных при разложении ферроцена, синтезированы автором лично. В основе диссертации лежат экспериментальные исследования, выполненные лично автором или при его непосредственном участии. Постановка цели и задач работы проводилась совместно с научным руководителем. Обработка экспериментальных результатов, анализ и их интерпретация были проведены автором совместно с научным руководителем и соавторами. Подготовка материалов к публикации проводилась совместно с соавторами.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов данной работы обеспечивается согласованностью экспериментальных данных, полученных комплексом независимых физико-химических методов исследования. Корректность полученных результатов

подтверждается воспроизводимостью измерений, произведенных в разных лабораториях.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на Russia-Japan Conference «Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures» (Япония, 2013, 2015, 2016, 2017), 51-ой Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2013), Третьем семинаре по химическому осаждению из газовой фазы (Иркутск, 2013), Конкурсе-конференции молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения Л.М. Гиндина (Новосибирск, 2013), VIII Всероссийской конференции с международным участием молодых ученых по химии «Менделеев 2014» (Санкт-Петербург, 2014), Всероссийской научной конференции с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум» (Улан-Удэ, 2015), 20th Biennial European Conference on Chemical Vapor Deposition (Швейцария, 2015), Десятом Всероссийском симпозиуме с международным участием «Термодинамика и материаловедение» (Санкт-Петербург, 2015), Школе-конференции молодых учёных «Неорганические соединения и функциональные материалы» (Новосибирск, 2015), XI Конференции и X Школе молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний – 2016» (Новосибирск, 2016), XX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Екатеринбург, 2016), Четвертом семинаре по проблемам химического осаждения из газовой фазы (Новосибирск, 2017), EuroCVD-BalticALD 21 conference (Швеция, 2017), Конкурсе-конференции молодых учёных, посвященной 60-летию ИНХ СО РАН (Новосибирск, 2017).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ (2 – в международных, 4 – в российских), все публикации входят в международную базу научного цитирования Web of Science, 19 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

Соответствие специальности 02.00.04 – физическая химия. Диссертационная работа соответствует п. 5 «Изучение физико-химических свойств систем при воздействии внешних полей, а также в экстремальных условиях высоких температур и давлений», а также п. 6 «Неравновесные процессы, потоки массы, энергии и энтропии пространственных и временных структур в неравновесных системах» паспорта специальности 02.00.04 – физическая химия.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 128 страницах, содержит 55 рисунков и 15 таблиц, список литературы содержит 245 источников. Работа состоит из введения, обзора литературы (глава 1), экспериментальной части (глава 2), результатов и их обсуждения (глава

3), выводов и списка цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* раскрыта актуальность выбранной темы диссертационного исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи данной работы, представлены научная новизна, практическая значимость работы и изложены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы в области изучения разбавленных магнитных полупроводников, магнитных материалов на основе карбонитрида кремния и их функциональных характеристик.

В начале литературного обзора описаны базовые представления о функционировании устройств со спин-поляризованным токопереносом. Продемонстрирована актуальность поиска новых материалов, сочетающих в себе свойства полупроводника и ферромагнетика. Рассмотрена возможность использования материалов на основе карбонитрида кремния для создания ферромагнитных полупроводников, а также представлена сравнительная характеристика методов их получения. Известно, что проводимость пленок карбонитрида кремния зависит от их состава и структуры аморфной фазы, а также от фазового разнообразия кристаллических включений. Введение железа в состав карбонитрида кремния и близких по составу соединений приводит к образованию керамик с широким набором кристаллических железосодержащих фаз, среди которых наиболее часто встречаются карбид железа – Fe_3C и силициды – Fe_3Si , Fe_5Si_3 и FeSi . Такое разнообразие фазового состава кристаллических фаз железа позволяет создавать как магнитомягкие, так и магнито жесткие материалы на основе карбонитрида кремния.

В следующей части главы рассмотрены процессы, происходящие при взаимодействии атомов железа с атомами кремния, как из молекул кремнийорганических соединений (КОС), так и с поверхности кремниевой подложки. Продемонстрирована возможность образования силицидов железа различного состава в процессах осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из газовой фазы.

На основании анализа литературных данных сделаны выводы об актуальности темы данного диссертационного исследования и сформулированы основные задачи.

Вторая глава содержит подробную информацию о методике процесса осаждения, используемого в данной работе для синтеза объектов исследования. Объясняется выбор исходных веществ для проведения осаждения, структуры которых приведены на рис. 1. Также приводится описание применяемых методик характеристики состава, структуры и функциональных свойств пленок: ЭДС, ИК-спектроскопии, КРС-спектроскопии, РФЭС, РФА, в том числе с использованием синхротронного излучения, метода полевых фигур, СЭМ, ПЭМ и ЭПР. Электрофизические свойства пленок были изучены путем анализа ВАХ структур

Al/SiC_xN_y:Fe/Si. Магнитные характеристики материалов были получены при изучении зависимости намагниченности от величины приложенного магнитного поля.

В *третьей главе* представлено описание результатов экспериментов и их обсуждение.

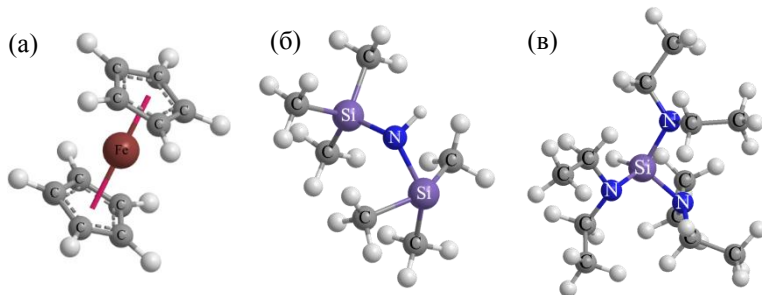


Рис. 1. Структуры исходных веществ: ферроцена (а), ГМДС (б), ТДЭАС (в)

3.1. Изучение процесса термического разложения ферроцена и характеристика продуктов

Осаждение пленок SiC_xN_y:Fe проводилось из трехкомпонентных газовых смесей, содержащих кремнийорганическое соединение (ГМДС или ТДЭАС), ферроцен и дополнительный газ (гелий, водород или аммиак). Необходимо отметить, что наиболее подробно изучены процессы плазмотимулированного осаждения пленок из КОС. Процессы термического разложения КОС достаточно охарактеризованы, хоть и в меньшей степени. Изучение процесса термического разложения ферроцена в условиях, идентичных условиям осаждения пленок SiC_xN_y:Fe, проводилось с целью сделать первичные предположения о составе пленок в четырехкомпонентной системе Si-C-N-Fe и упростить последующий анализ структуры и состава материала. В результате предварительных экспериментов было показано, что желаемая концентрация железа в четырехкомпонентных пленках (1-10 ат. %) достигается при температурах осаждения 800-1000°C. В связи с этим этот температурный интервал был выбран для изучения процесса термического разложения ферроцена и получения пленок SiC_xN_y:Fe.

3.1.1. Изучение зависимости фазового состава пленок, осажденных из паров ферроцена, от материала используемой подложки

Как показано в главе 1, железо может образовывать силициды различного состава при взаимодействии с кремниевой поверхностью. Изучение процесса осаждения продуктов разложения ферроцена на подложках кремния, плавленного кварца и α-Al₂O₃ проводилось для того, чтобы исследовать возможные взаимодействия атомов железа с кремнием, подложки которого

планировалось использовать для получения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$.

Термическое разложение ферроцена проводилось при пониженном давлении $\sim 6 \times 10^{-2}$ Торр в атмосфере гелия. Морфология поверхности пленок, полученных в результате разложения ферроцена и осаждения продуктов на подложке, представлена на рис. 2. На подложке Si(100) при температуре осаждения 900°C наблюдается рост небольших частиц, а также образование упорядоченных структур в виде полос, которые по данным ЭДС содержат железо. С увеличением температуры осаждения до 1000°C поверхность пленки становится шероховатой, а упорядоченные структуры пропадают. Поверхность пленки, осажденной на подложке из плавленного кварца, состоит из нитевидных структур, по всей видимости, содержащих углерод. На подложке $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ наблюдается образование небольших железосодержащих частиц, что было подтверждено с помощью метода ЭДС.

Методом ИК-спектроскопии показано, что на кремниевых подложках образуются соединения, в составе которых есть связь Fe-Si, что указывает на возможность образования силицидов железа на поверхности подложки кремния (100). Анализ рентгеновских фотоэлектронных спектров подтвердил образование силицидов железа при осаждении пленок из ферроцена на подложках из кремния, в то время как использование подложек из плавленного кварца приводило к образованию карбидов. С помощью спектроскопии КРС было показано, что вне зависимости от типа используемой

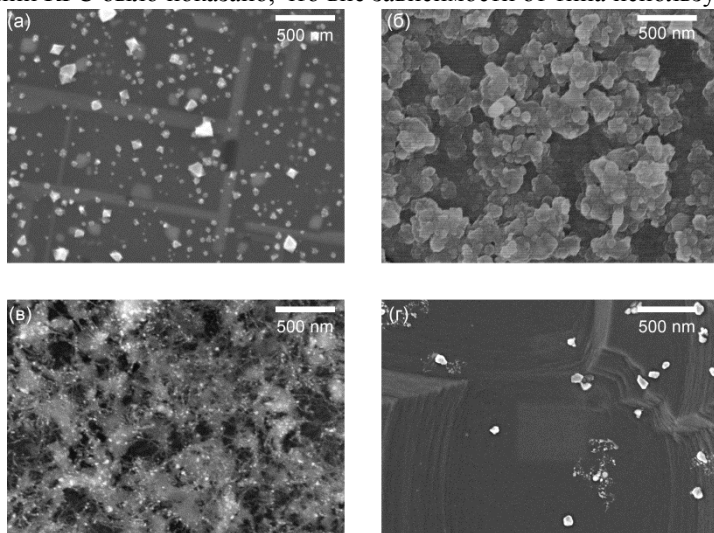


Рис. 2. Морфология поверхности пленок, полученных из газовой смеси ферроцена и гелия на кремнии (100) при 900°C (а) и 1000°C (б); при 1000°C на плавном кварце (в) и корунде (г)

подложки в пленках присутствуют примеси аморфного углерода и графита, которые могут осложнять анализ их фазового состава.

Использование рентгенофазового анализа пленок, осажденных из ферроцена на разных подложках, позволил достоверно определить их кристаллический состав (Рис. 3). В случаях использования подложек плавленного кварца и Al_2O_3 железо существует в виде цементита Fe_3C и α -Fe. Необходимо отметить, что использование подложки из плавленного кварца приводит к образованию фазы свободного углерода. Наблюдаемые на поверхности подложек Al_2O_3 кристаллы, вероятно, относятся к цементиту Fe_3C или α -Fe. Осаждение на подложки кремния (100) приводит к образованию силицида железа α - FeSi_2 . Интенсивности его дифракционных максимумов значительно отличаются от таковых у порошка, что позволяет сделать предположение об ориентированном росте этого дисилицида в данных условиях. Таким образом, было показано, что фазовый состав продуктов разложения ферроцена зависит от материала используемой подложки, а в случае использования подложки кремния на ее поверхности наблюдается ориентированный рост фазы α - FeSi_2 .

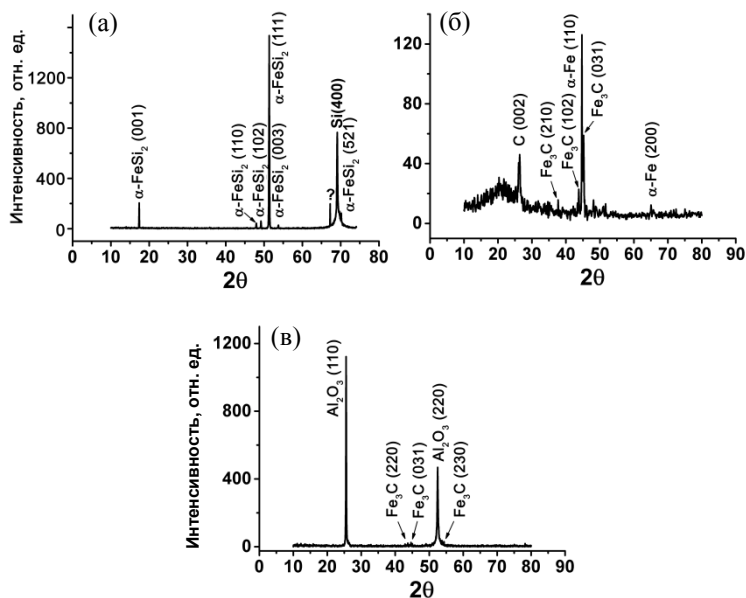


Рис. 3. Дифрактограммы пленок, полученных при температуре 1000°C на подложках из кремния (а), плавленного кварца (б) и корунда (в)

Поскольку в пленках, полученных на всех типах подложек доля фазы свободного углерода велика, было решено заменить гелий на водород для создания в реакторе восстановительной атмосферы и определения условий, при ко-

торых количество фазы свободного углерода в пленках будет наименьшим.

3.1.2. Изучение зависимости структуры продуктов разложения ферроцена на кремнии (100) от условий осаждения

Для более подробного изучения процесса взаимодействия атомов железа с поверхностью подложки Si(100), а также для определения условий, при которых концентрация фазы свободного углерода минимальна, были проведены эксперименты по термическому разложению ферроцена в восстановительной атмосфере водорода.

На дифрактограммах пленок, осажденных при температуре 900°C, наибольшую интенсивность имеет максимум α -FeSi₂ (100), в то время как осаждение при температуре 1000°C приводит к тому, что пик α -FeSi₂ (111) является наиболее интенсивным. Согласно литературным данным на дифрактограммах порошковых образцов α -FeSi₂ наибольшую интенсивность имеет рефлекс (102). Такое отличие дифракционных картин пленок от порошковых позволяет сделать предположение о наличии текстуры и об эпитаксиальном механизме роста кристаллов α -FeSi₂.

Это предположение было подтверждено с помощью исследования пленок методом полюсовых (полусных) фигур. Анализ фигуры α -FeSi₂ (102) (Рис. 4а) совместно с фигурой Si(111) показал, что при температуре осаждения 900°C реализуются следующие эпитаксиальные соотношения: α -FeSi₂(001)||Si(100) и α -FeSi₂(1 $\bar{1}$ 0)||Si(011). Изучение фигур Si(111) и α -FeSi₂(101) (Рис. 4б) пленки, полученной при 1000°C, показало, что при этой температуре осаждения рост происходит согласно другим эпитаксиальным соотношениями α -FeSi₂(111)||Si(100) и α -FeSi₂(1 $\bar{1}$ 0)||Si(011). Таким образом, можно сделать вывод о том, что изменение экспериментальных условий осаждения, в частности, температуры, приводит к изменению ориентации кристаллов α -FeSi₂ относительно поверхности подложки Si (100).

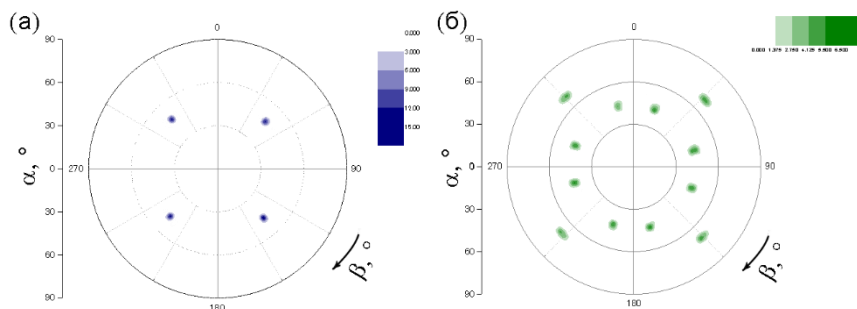


Рис. 4. Полюсовые (полусные) фигуры: α -FeSi₂ (102) пленки, полученной при температуре 900°C (а), и α -FeSi₂ (101) пленки, полученной при температуре 1000°C (б)

Методом КРС-спектроскопии показано, что в пленках, полученных при 900°C количество фазы свободного углерода мало, а с ростом темпера-

туры осаждения до 1000°C эта величина возрастает. Изучение влияния продолжительности эксперимента (с 30 до 90 минут) при температуре 900°C и давления водорода (с 15 до 35 мТорр) при 1000°C позволит более подробно определить условия, при которых доля углерода в пленках минимальна.

На рис. 5 представлены фотографии морфологии поверхности пленок, осажденных в описанных экспериментальных условиях. С ростом температуры осаждения увеличивается плотность ориентированных структур α -FeSi₂. При температуре осаждения 1000°C на поверхности пленки отсутствуют ориентированные структуры, а большую часть объема пленки занимает аморфный углерод, что было подтверждено методом КРС-спектроскопии. Увеличение продолжительности процесса осаждения до 90 минут при температуре осаждения 900°C приводит к незначительному изменению размера кристаллов дисилицида железа (Рис. 5г), однако, фазовый состав пленок при этом не изменяется. С ростом давления водорода при температуре осаждения 1000°C количество свободного углерода в пленке значительно уменьшается, при этом доля непокрытой поверхности кремниевой подложки мала.

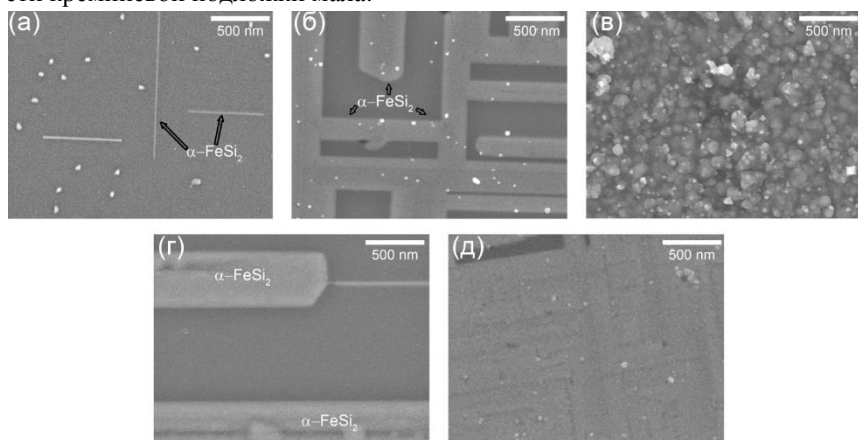


Рис. 5. Поверхность пленок, полученных при 800 (а), 900 (б), 1000°C (в), $\tau_{\text{осаждения}} = 30$ мин и $P_{\text{H}_2} = 15$ мТорр; при 900°C и $\tau_{\text{осаждения}} = 90$ мин (г); при 1000°C и $P_{\text{H}_2} = 35$ мТорр (д)

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что для пленок α -FeSi₂, осажденных на подложке Si(100), возможно изменение их ориентации в узком диапазоне экспериментальных условий (от 900 до 1000°C). Кроме того, был определен диапазон условий, при которых количество фазы свободного углерода в пленках мало, а концентрация железа достаточна для образования железосодержащих фаз. Полученные в этом разделе результаты послужили основой для выбора условий осаждения пленок SiC_xN_y:Fe.

3.2. Синтез и характеристика состава и структуры пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$

Пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ были получены методом химического осаждения из газовой фазы с использованием газовых смесей ферроцена, гексаметилдисилизана (ГМДС)/трис(диэтиламино)силана (ТДЭАС) и гелия/водорода/аммиака. Осаждения проводилось в температурном интервале 800-1000°C, поскольку при этих температурах достигается необходимая степень разложения молекул исходных соединений и достаточная скорость роста пленок.

3.2.1. Осаждение пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из газовых смесей ферроцена, кремнийорганического соединения и гелия

Выбор гелия в качестве одного из компонентов газовой смеси для осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ обусловлен его инертными свойствами. Использование инертного газа позволяет сократить число возможных химических реакций в системе, что впоследствии может упростить интерпретацию результатов.

Элементный состав пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, осажденных из смесей с гелием, изучался с помощью метода ЭДС, по данным которого углерод имеет наибольшую концентрацию (45-65 ат. %) среди всех пленкообразующих элементов в изученном температурном интервале. Доля железа в пленках растет с 2 до 10 ат. % с увеличением температуры осаждения. Эта тенденция обусловлена увеличением степени разложения ферроцена при повышении температуры осаждения. Содержание легких элементов (Si, C и N) в пленках, полученных из смеси, содержащей ГМДС, слабо зависит от температуры в исследуемом интервале и пропорционально содержанию этих элементов в исходной молекуле предшественника ($\text{Si:C:N} = 2:6:1$). Использование ТДЭАС в качестве источника легких элементов позволяет изменять их содержание в пленках ($C_{\text{Si}} = 20\text{-}35$ ат. %, $C_{\text{C}} = 45\text{-}60$ ат. %, $C_{\text{N}} = 10\text{-}18$ ат. %). Это, вероятно, связано с разной степенью разложения и образованием различных структурных элементов исходной молекулы кремнийорганического соединения при изменении температуры.

По данным ИК-спектроскопии в пленках $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ присутствуют связи Si-C и Si-N. Относительная интегральная интенсивность этих полос в спектрах пленок, осажденных из ГМДС, равна 10 и остается постоянной во всем исследуемом температурном интервале. Замена ГМДС на ТДЭАС приводит к значительно меньшему значению отношения интенсивностей 2-2.5. Причиной такого различия в локальном окружении атомов легких элементов являются отличия в структуре молекул исходных веществ: в молекуле ГМДС присутствуют связи Si-C и Si-N, то время, как в молекуле ТДЭАС связи Si-C отсутствуют, и, как следствие, их доля в пленках меньше.

Спектры комбинационного рассеяния и тенденции их изменения при варьировании экспериментальных условий для пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$,

осажденных из смесей с ГМДС и ТДЭАС, схожи. При температурах осаждения 800-850°C в КРС-спектрах присутствуют D (~1360 см⁻¹) и G (~1530 см⁻¹) моды углерода, по взаимному расположению и отношению интегральных интенсивностей которых можно сделать вывод о том, что углерод в пленках существует преимущественно в аморфном виде. Осаждение пленок при более высоких температурах приводит к образованию кристаллов графита с характерным размером не более 5 нм в смеси с аморфным углеродом. На это указывает смещение центра G моды к большим волновым числам ~1570 см⁻¹. Необходимо отметить, что образование графита в пленках SiC_xN_y:Fe, полученных из смеси, содержащей ГМДС, начинается при температуре 900°C. Аналогичная тенденция для пленок, осажденных из смеси с ТДЭАС, проявляется при более высокой температуре 950°C, что, вероятно, связано со структурой этого предшественника и, как следствие, более низкой концентрацией углерода в получаемых пленках по сравнению с образцами, полученными из смесей, содержащих ГМДС.

Анализ Si2p и Fe2p_{3/2} РФЭ-спектров пленок SiC_xN_y:Fe, осажденных из газовых смесей с гелием при температуре 1000°C, показал, что железо присутствует в пленках в виде силицида. Ввиду близких значений энергии связи и схожей формы пика для всего ряда силицидов железа точно определить его структуру методом РФЭС не представляется возможным. Кроме того, в спектрах Si2p, C1s и N1s присутствует пики с энергиями связей 101.9, 283.6 и 398.2 эВ, соответственно, что указывает на образование карбонитрида кремния, который существует в аморфном виде, поскольку на дифрактограмме этой пленки отсутствует рефлексы, которые можно было бы отнести к кристаллическим карбиду, нитриду или карбонитриду кремния.

Для того чтобы достоверно определить кристаллическую модификацию образующегося силицида железа, а также присутствие других кристаллических фаз в составе пленок использовался более точный метод РФА-СИ. Анализ дифрактограмм пленок SiC_xN_y:Fe, осажденных при температуре 1000°C (Рис. 6), показал, что в составе пленки присутствуют силициды железа Fe₃Si₂, FeSi или Fe₃Si. При этом большая часть железа

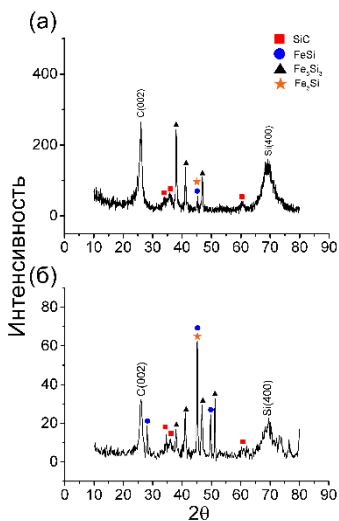


Рис. 6. Дифрактограммы пленок SiC_xN_y:Fe, полученных при 1000°C из газовых смесей, содержащих ГМДС (а) и ТДЭАС (б)

существует в виде силицида Fe_5Si_3 . Для двух других соединений на порошковых дифрактограммах наиболее интенсивными являются максимумы при $\sim 45^\circ$, что в данном случае затрудняет их идентификацию. Такое разнообразие силицидов железа в получаемых пленках связано с легкостью их взаимопревращений, которая может быть обусловлена неравновесным характером процесса осаждения и установлением локальных равновесий. Помимо силицидов железа кристаллический состав этих пленок представлен карбидом кремния $\beta\text{-SiC}$ и графитом, что согласуется с данными спектроскопии КРС. Поскольку на дифрактограммах отсутствуют пики, относящиеся к азот-содержащим кристаллическим фазам, можно сделать предположение о композитной структуре полученных пленок, в которых азот присутствует в составе аморфного вещества. Для более детального анализа структуры пленок и кристаллических включений в них был использован метод ПЭМ.

Изучение пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, осажденных при температурах 900 и 1000°C из газовой смеси ГМДС, ферроцена и гелия, методом ПЭМ позволило установить различия в их структуре. Полученные при 900°C пленки состоят преимущественно из аморфного карбонитрида кремния с включениями кристаллов силицида железа FeSi , что было показано с помощью анализа SAED (Рис. 7а). При более высокой температуре синтеза 1000°C размеры кристаллов силицидов и других кристаллический включений возрастают и достигают 100 нм (Рис. 7б). На электронной дифрактограмме присутствуют концентрические рефлексы, характерные межплоскостные расстояния которых совпадают с расстояниями максимумов, полученных методом рентгеновской дифракции, что в совокупности с информацией, полученной методом ПЭМ указывает на композитную структуру пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$.

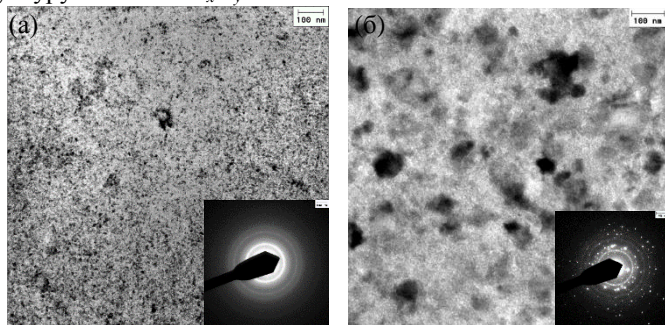


Рис. 7. ПЭМ-изображения электронограммы пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных при 900 (а) и 1000°C (б) из газовой смеси ГМДС, ферроцена и гелия

Морфология поверхности пленок, полученных из газовой смеси, содержащей ТДЭАС, изменяется с увеличением температуры синтеза. При температуре осаждения 800°C поверхность является гладкой без осо-

бенностей (Рис. 8а), что характерно для аморфных пленок карбонитрида кремния. С ростом температуры осаждения поверхность становится более шероховатой (Рис. 8б). При достижении температуры 900°C на поверхности пленки можно различить глобулярные структуры размером до 2 мкм, образование которых может быть связано с началом кристаллизации силицидов железа (Рис. 8в). Дальнейший рост температуры осаждения приводит к тому, что поверхность пленки становится зернистой (Рис. 8е). Для пленок, осажденных из смеси ферроцена, ГМДС и гелия характерны аналогичные тенденции.

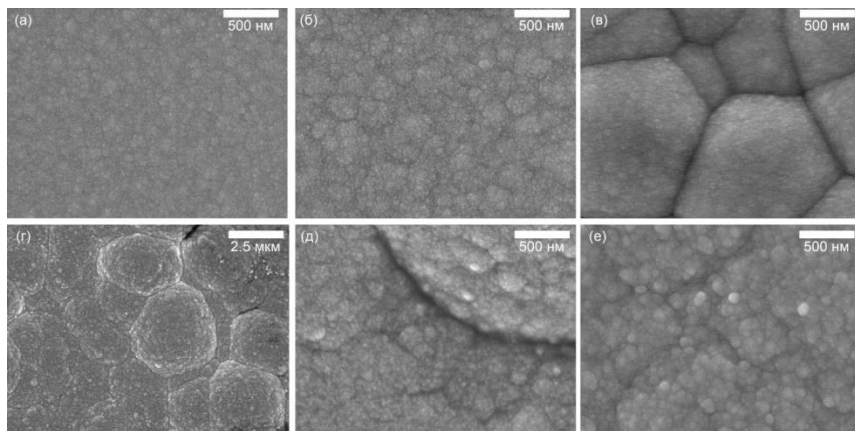


Рис. 8. Морфология поверхности пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y:\text{Fe}$, полученных при 800 (а), 850 (б), 900°C (в), 950 (г, д) и 1000°C (е) из газовой смеси ТДЭАС, ферроцена и гелия

Магнитные характеристики пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y:\text{Fe}$ зависят от их структуры и состава. По данным ЭПР пленки, полученные при температурах ниже 900°C, являются парамагнитными. Доля железа в них невелика и составляет примерно 1-4 ат. %, а их парамагнетизм может быть обусловлен включениями ионов железа Fe^{3+} в аморфной матрице карбонитрида кремния. При более высоких температурах осаждения становится возможным образование силицидов, в том числе, ферромагнитных Fe_5Si_3 и Fe_3Si . Изучение температурной зависимости намагниченности пленки, синтезированной при 1000°C, в интервале 4-400 К показало, что эта зависимость имеет характерную для ферромагнетика форму, а температура Кюри образца составляет ~390 К, что близко к температуре Кюри фазы Fe_5Si_3 .

Природа электронной проводимости пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y:\text{Fe}$ является комплексной. В основе феномена проводимости аморфных полупроводников лежит модифицированная модель Дэвиса-Мотта, в рамках которой реализуются различные механизмы прыжковой проводимости. Вклад в проводимость могут вносить локальные состояния в аморфной матрице легких

элементов, а также кристаллические центры, например, кристаллы силицидов железа. Электрофизические характеристики пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ зависят от температуры их осаждения. Для пленок, полученных из смеси ферроцена, ГМДС и гелия, величина их удельной проводимости изменяется от 4.3×10^{-3} до 6.9×10^{-2} См/м. Удельная проводимость возрастает при увеличении температуры осаждения за счет образования кристаллов силицидов железа, графита и $\beta\text{-SiC}$ в аморфной матрице.

Важно отметить, что необходимыми для создания ферромагнитных полупроводников свойствами обладают пленки, полученные при температурах выше 900°C , в которых доля железа превышает 5 ат. %. Увеличение концентрации железа в пленках приводит к появлению в них ферромагнитного упорядочения, а также увеличения их проводимости. В данном случае эти две характеристики не являются независимыми. Состав аморфной матрицы является одним из параметров, контроль которого может помочь в изменении проводимости пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ с сохранением их магнитных характеристик. Одним из способов изменения состава аморфной матрицы является замена инертного гелия на водород или аммиак.

3.2.2. Осаждение пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из газовых смесей ферроцена, кремнийорганического соединения и водорода

Осаждение пленок из газовых смесей ферроцена, ГМДС или ТДЭАС и водорода проводилось в условиях, идентичных тем, которые использовались для получения пленок из смесей с гелием. Использование водорода в качестве дополнительного газа не оказывает значительного влияния на элементный состав пленок. Концентрации легких элементов в пленках, осажденных из смесей, содержащих водород, близки к аналогичным значениям для пленок, полученных из смесей с гелием.

В ИК-спектрах пленок, полученных из смеси ферроцена, ГМДС и водорода, присутствует широкая полоса, характерная для пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных из смесей с гелием. Однако, в случае использования водорода отношение интегральных интенсивностей полос валентных колебаний связей Si-C/Si-N значительно меньше и изменяется от 0.65 до 2 при увеличении температуры осаждения от 800 до 1000°C . Для пленок, осажденных из смеси ферроцена, ТДЭАС и водорода, отношение интегральных интенсивностей полос колебаний связей Si-C/Si-N постоянно в исследуемом температурном интервале и составляет 2.5.

Спектры комбинационного рассеяния света пленок, полученных из смесей, содержащих водород, почти идентичны спектрам пленок, осажденных из смесей с гелием. При температурах, близких к 800°C , фаза свободного углерода в пленках, по данным спектроскопии КРС, существует в аморфном виде. Повышение температуры осаждения до 900 и 1000°C приводит к образованию кристаллов графита размером до 5 нм

в пленках, полученных из газовых смесей, содержащих ГМДС и ТДЭАС, соответственно.

Магнитные характеристики пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных из газовой смеси ферроцена, ТДЭАС и водорода, близки к характеристикам пленок, полученных из смесей с гелием. Методом РФА показано, что в пленках, полученных из смеси, содержащей водород, присутствует силицид железа Fe_5Si_3 , являющийся ферромагнитным при комнатной температуре с величиной коэрцитивной силы ~ 15 Э. Увеличение температуры осаждения пленок с 900 до 1000°C приводит к росту значения намагниченности насыщения с 5 до 18 э.м.е./см³.

Удельная проводимость пленок (от 1.6×10^{-4} до 5.3×10^{-2} См/м), полученных из смесей, содержащих водород, ниже, чем проводимость пленок, полученных из смесей с гелием. Это может быть связано с меньшей долей кристаллов графита и большим содержанием связи Si-N при осаждении пленок из смесей с водородом. Совокупность результатов магнитных и электрофизических измерений показывает, что введение водорода в газовую смесь позволяет осуществлять контроль удельной проводимости пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ независимо от магнитных параметров, таких как коэрцитивная сила и намагниченность насыщения.

3.2.3. Осаждение пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ из газовых смесей ферроцена, кремнийорганического соединения и аммиака

Использование аммиака в смесях с ферроценом и ГМДС или ТДЭАС в процессах синтеза пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ приводит к увеличению концентрации азота в них с 15 ат. % (при использовании гелия или водорода) до 25-30 ат. %. Необходимо отметить, что использование газовой смеси, состоящей из ферроцена, ТДЭАС и аммиака привело к получению пленок с минимальной концентрацией углерода 25-30 ат. %. Содержащийся в молекуле аммиака азот входит в состав пленок и, таким образом, позволяет контролировать их элементный состав.

В ИК-спектрах пленок, осажденных из смесей, содержащих аммиак, присутствует характерная полоса поглощения, которая является суперпозицией полос валентных колебаний связей Si-C и Si-N. Относительная интегральная интенсивность этих полос значительно меньше по сравнению с пленками, полученными из газовых смесей, содержащих гелий или водород. Повышение доли связей Si-N в пленках согласуется с данными элементного анализа, приведенными выше.

Из данных спектроскопии КРС можно сделать вывод о том, что использование аммиака приводит к аморфизации углерода и отсутствию кристаллов графита в пленках, что может оказать значительное влияние на проводимость пленок.

Как уже отмечалось при изучении пленок, осажденных из смесей, содержащих водород, природа дополнительного газа не оказывает влияния

на магнитные свойства пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$. Коэрцитивная сила для этих пленок имеет величину $\sim 14\text{-}15$ Э, что близко к характерному значению для силицидов железа Fe_5Si_3 и Fe_3Si . Намагниченность насыщения пленок, полученных из смеси ферроцена, ТДЭАС и аммиака увеличивается от 5 до 20 э.м.е./см³ при увеличении температуры осаждения от 900 до 1000°С.

Удельная проводимость пленок, полученных из смесей с аммиаком, значительно ниже по сравнению с пленками, полученными из других газовых смесей. Однако, общие закономерности изменения проводимости при изменении экспериментальных условий аналогичны описанным выше. С ростом температуры осаждения проводимость пленок увеличивается от 1.0×10^{-10} до 7.1×10^{-3} См/м, что может быть связано с увеличением доли кристаллических центров, которые могут участвовать в переносе заряда по прыжковому механизму.

В **заключении** диссертационной работы кратко подведены итоги исследования, указано возможное дальнейшее развитие работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С использованием метода LPCVD разработаны новые процессы осаждения ферромагнитных пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ при температурах 800-1000°С из трехкомпонентных газовых смесей ферроцена, гексаметилдисилазана/*трис*(диэтиламино)силана и гелия/водорода/аммиака на подложках Si(100), а также пленок из двухкомпонентных газовых смесей ферроцена и гелия/водорода на подложках Si(100), плавленого кварца и Al_2O_3 .
2. Установлено, что осаждение пленок из паров ферроцена в присутствии гелия на подложки плавленого кварца и Al_2O_3 , в составе которых кремний существует в связанном состоянии или отсутствует, приводит к образованию фаз $\alpha\text{-Fe}$, цементита Fe_3C , аморфного углерода и графита.
3. Показано, что использование подложки Si(100) для осаждения пленок из газовых смесей ферроцена и гелия/водорода приводит к образованию ориентированных структур $\alpha\text{-FeSi}_2$. Ориентация кристаллов дисилицида железа относительно поверхности подложки зависит от температуры осаждения: синтез при 900°С приводит к $\alpha\text{-FeSi}_2(001)\|\text{Si}(100)$, а осаждение при 1000°С – к $\alpha\text{-FeSi}_2(111)\|\text{Si}(100)$;
4. Установлены зависимости структуры, химического и фазового состава пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$ от экспериментальных параметров (температуры осаждения, состава используемого кремнийорганического соединения и используемого дополнительного газа):
 - а) пленки, полученные в температурном диапазоне 800-850°С, являются аморфными и содержат в своем составе

1-3 ат. % Fe. Пленки, осажденные при температурах 900-1000°C, являются композитными: в аморфной матрице распределены кристаллы силицидов железа Fe_5Si_3 , Fe_3Si или $FeSi$, β -SiC и графита. С ростом температуры осаждения в этом температурном интервале увеличивается содержание и размер кристаллов силицидов железа;

б) соотношение долей химических связей Si-C/Si-N в пленках зависит от строения и химического состава молекул исходных кремнийорганических веществ: у пленок, полученных из смеси ферроцена, гексаметилдисилазана и гелия, это соотношение выше (8-10), чем у пленок, полученных из смеси ферроцена, *трис*(диэтиламино)силана и гелия (2);

в) использование водорода или аммиака в качестве дополнительных газов приводит к уменьшению содержания графита в пленках. Использование аммиака приводит к значительному увеличению концентрации азота в пленках $SiC_xN_y:Fe$.

5. Определен интервал температур осаждения 900-1000°C, в котором получаемые пленки $SiC_xN_y:Fe$ являются ферромагнитными с малой величиной коэрцитивной силы (~15 Э). Величина намагниченности насыщения этих пленок достигает 21 э.м.е./см³, что делает их перспективными для создания инжектора спинполяризованного тока в устройствах спинтроники.
6. Показано, что удельная проводимость пленок $SiC_xN_y:Fe$ изменяется в широком диапазоне от 10^{-10} до 6.9×10^{-2} См/м. Использование аммиака приводит к меньшим значениям проводимости пленок за счет увеличения количества азота и доли связей Si-N. Удельная проводимость пленок, полученных при 1000°C, изменяется от 2.0×10^{-3} до 6.9×10^{-2} См/м, что близко к удельной проводимости кремния и необходимо для создания инжекторов в устройствах спинтроники.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Pushkarev R.V., Fainer N.I., Katsui H., Kaichev V.V., Goto T. Structural features and surface composition of epitaxial α - $FeSi_2$ films obtained by CVD // *Materials and Design* – 2018. – V. 137. – P. 422-429.
2. Файнер Н.И., Пушкарев Р.В., Голубенко А.Н., Румянцев Ю.М., Максимовский Е.А., Каичев В.В. Синтез слоев Si-C-N-Fe из летучих кремнийорганических веществ-предшественников и ферроцена. Часть I. синтез, химический и фазовый состав железосодержащих слоев, полученных термическим разложением ферроцена // *Физика и химия стекла*. – 2015. – V. 41. – N. 6. – С. 851-860.
3. Пушкарев Р.В., Файнер Н.И., Голубенко А.Н., Румянцев Ю.М., Надолинный В.А., Максимовский Е.А., Коротаев Е.В., Каичев В.. Синтез

- слоев Si-C-N-Fe из летучих кремнийорганических веществ-предшественников и ферроцена. Часть II. Характеризация слоев $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{Fe}_z$, полученных термическим разложением трис(диэтиламино)силана, ферроцена и гелия // Физика и химия стекла. – 2016. – V. 42. – N. 5. – С. 65-73.
4. Пушкарев Р.В., Файнер Н., Маурия К.К. Изучение фазового состава тонких пленок SiC_xFe_y и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{Fe}_z$ с помощью рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения пучка (GIXRD) // Журнал структурной химии. – 2015. – V. 56. – N. 6. – С. 1230-1232.
 5. Файнер Н.И., Пушкарев Р.В., Шестаков В.А., Гутаковский А.К. Влияние условий синтеза на структуру и свойства новых материалов $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{Me}_z$ для спинтроники // Журнал структурной химии. – 2017. – V. 58. – N. 8. – С. 1543-1552.
 6. Pushkarev R.V., Fainer N.I., Maurya K.K. Structural and magnetic properties of nanocomposite iron-containing SiC_xN_y films // Superlattices and Microstructures – 2017. – V. 102. – P. 119-126.
 7. Пушкарев Р.В., Файнер Н.И. Ферромагнитные материалы на основе нанокompозитных пленок карбонитрида кремния // Материалы конкурса-конференции молодых учёных, посвященного 60-летию ИХ СО РАН. – Новосибирск, 2017. – С. 15

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.х.н. Файнер Надежде Ильиничне за опыт, знания и наставления, полученные в ходе работы, а также за возможность проведения самостоятельных исследований. Также автор выражает большую благодарность к.х.н. Косиновой М.Л., к.х.н. Румянцеву Ю.М., д.х.н., профессору Солодовникову С.Ф. и всему коллективу лаборатории функциональных пленок и покрытий за ценные советы и конструктивную критику работы. Выполнение этой работы было бы невозможно без помощи коллег, которые провели точные и информативные измерения. Автор выражает благодарности: д.х.н., профессору Рахлину В.И. (ИрИХ СО РАН, Иркутск) за синтез ТДЭАС, Алферовой Н.И. (ИХ СО РАН, Новосибирск) за изучение пленок методом ИК-спектроскопии, Кожемяченко С.И. (ИХ СО РАН, Новосибирск) за изучение пленок методом КРС-спектроскопии, к.ф.-м.н. Каичеву В.В. (ИК СО РАН, Новосибирск) за изучение пленок методом РФЭ-спектроскопии, к.х.н. Королькову И.В. (ИХ СО РАН, Новосибирск), к.х.н. Максимовскому Е.А. (ИХ СО РАН) и PhD Маурии К.К. (NPL, Индия) за изучение пленок методом РФА, PhD Катсуи Х. (IMR, Япония) и профессору Гото Т. (IMR, Япония) за изучение пленок методом полевых фигур, к.ф.-м.н. Гутаковскому А.К. (ИФП СО РАН, Новосибирск) за изучение пленок методом ПЭМ, к.ф.-м.н. Кириенко В.В. (ИФП СО РАН, Новосибирск) за измерения электропроводности,

д.ф.-м.н. Надолинному В.А. (ИНХ СО РАН, Новосибирск) за изучение пленок методом спектроскопии ЭПР, к.ф.-м.н. Мацынину А.А. (ИФ СО РАН, Красноярск) за изучение магнитных характеристик пленок, Назарову Д.В. (СПбГУ, Санкт-Петербург) за изучение магнитных характеристик пленок.

Отдельно автор хочет поблагодарить своих родителей и супругу, которые поддерживали его на протяжении всей работы, а также своего коллегу – Меренкова И.С. за мотивацию и хорошее настроение.

ПУШКАРЕВ Роман Владимирович

**Пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$: синтез из газовой фазы,
структура и функциональные свойства**

Изд. лиц. ИД № ИД № 04060 от 20.02.2001.

Подписано к печати и в свет 29.06.2018г.

Формат 60×84/16. Бумага № 1. Гарнитура “Times New Roman”

Печать офсетная. Печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 120. Заказ № 172
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт неорганической химии им. А.В. Николаева
Сибирского отделения Российской академии наук
Просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090