БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.211:539.23.234:537.534:621.793:532.64

БАРАЙШУК
СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА И КРЕМНИЯ ИОННО-АССИСТИРОВАННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Минск, 2010

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»

Научный руководитель– ТАШЛЫКОВ Игорь Серафимович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной физики, учреждение образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»

Официальные оппоненты: УГЛОВ Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики твердого тела, Белорусский государственный университет

АНДРЕЕВ Михаил Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, директор Обособленное хозрасчетное структурное подразделение «Институт сварки и защитных покрытий», Государственное научное учреждение «Порошковая металлургия»

Оппонирующая организация – Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Защита состоится 4 июня 2010 года в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 8, корпус юридического факультета, ауд. 407, тел. ученого секретаря: +375-17-209-55-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « » апреля 2010 г.

И.о. ученого секретаря
совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник А.Р. Челядинский

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Ионно-ассистированное нанесение покрытий является одним из основных и наиболее перспективных методов контролируемого введения примесей в полупроводниковые материалы и, прежде всего, в кремний – базовый материал микроэлектроники. Модификация поверхности кремния интересна и важна для микроэлектроники, поскольку позволяет сформировать на поверхности функциональные и пассивирующие слои, которые, к тому же, могут обладать различной смачиваемостью, высокими прочностными свойствами, что необходимо при работе приборов в различных средах. Осаждение покрытий на графит, который используется в качестве электродного материала, позволяет изменять электрохимические свойства поверхности модифицированного образца графита. Это обусловило выбор материалов подложки и покрытия для проведения исследований.

Ряд факторов, среди которых такие как: элементный и фазовый состав покрытий, их структура, адгезия к подложке, топография и другие, влияют на свойства модифицированной поверхности изделий [4–А, 13–А, 20–А]. Так, при ионно-ассистированном нанесении металлопокрытий на сталь можно управлять микротвёрдостью поверхности изделий, улучшить трибологические характеристики поверхностей, придать им устойчивость к коррозии, изменить электрохимические свойства. Многокомпонентные покрытия, содержащие включения металла, могут рассматриваться в качестве аналога твёрдой смазки. Металлсодержащие покрытия, нанесённые на эластомер, способствуют улучшению триботехнических и эксплуатационных характеристик поверхности изделий. Поэтому, при модифицировании свойств поверхности изделий нанесением покрытий необходима диагностика поверхности, исследование элементного и фазового состава поверхности, структуры и топографии поверхности, её механических характеристик. Мало изучены вопросы влияния ионно-плазменной обработки поверхности материалов на изменение топографии и смачиваемости поверхностей, которые являются крайне важными для создания солнечных элементов с высокой эффективностью фотопреобразования. Актуальным представляются задачи использования современных возможностей физического материаловедения применительно к существующим технологиям нанесения металлопокрытий на графит и кремний. В решении этих задач важная роль отводится совершенствованию методики получения снимков с применением АСМ [7–А], метода высокоточного измерения краевого угла смачивания и созданию соответствующего измерительного комплекса, развитию модели смачивания поверхности, учитывающей её гетерогенность и топографию [5–А, 11–А, 28–А].

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации включена в научный план БГПУ и входит в перечень приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы, утвержденный Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 № 512, пункт 2.2 «Физика, химия и механика поверхности; механика адаптативных материалов и конструкций; управление структурой и свойствами поверхности, в том числе на наноструктурном уровне».

Диссертационные исследования проводились в рамках задания Министерства образования на проведение НИР «Физико-технологические основы инженерии лиофильности и лиофобности поверхности изделий ионно-ассистированным газофазным осаждением покрытий» (№ГР 2004573, 2004-2006). Исследования были поддержаны Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований в рамках НИР №Т01–108 «Разработка физико-химических основ формирования на резине защитных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками ионно-ассистированным осаждением в условиях саморадиации» (№ ГР 20022414, 2002-2004), так же в рамках НИР №Ф 06-300 «Разработка физических и технологических основ модифицирования поверхности изделий ионно-ассистированным осаждением покрытий в условиях самооблучения с целью управления смачиваемостью в жидкостях, повышения качества герметизирующей способности резинотехнических изделий в рабочих средах, поверхности оптических элементов в приборах, электронных схем» (№ ГР 20064047, 2006-2008).

Цель и задачи исследования

Целью работы являлось установление закономерностей физических процессов формирования структур металлопокрытие (Ti, Cr, Co, Zr, Mo)/подложка (Si, графит), протекающих при ионно-ассистированном осаждении покрытий в условиях самооблучения и их влияние на свойства поверхности полученных структур.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи, решаемые в данной работе:

– получение структур покрытие/подложка ионно-ассистированным в условиях самооблучения нанесением тонких пленок Ti, Cr, Co, Zr, Mo на кремний и Cr на графит;

– установление послойного элементного состава структур покрытие/подложка, формируемых на кремнии и графите ионно-ассистированным нанесением покрытий в условиях самооблучения, когда ускоряющий потенциал равен 3 – 10 кВ;

– выявление закономерностей изменения топографии и шероховатости поверхности кремния и графита формируемых ионно-ассистированным

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

нанесением металлопокрытий в условиях разной плотности выделенной энергии, развитие методики получения изображения поверхности с применением атомно-силовой микроскопии;

– разработка метода, создание установки и программного обеспечения для измерения равновесного краевого угла смачивания с целью определения влияния композиционного состава и топографии на смачиваемость поверхности изделий;

– развитие физической модели изменения структуры и смачиваемости поверхности графита и кремния при ионно-ассистированном осаждении покрытий в условиях самооблучения;

– изучение нанотвердости и модуля Юнга поверхности структур покрытие/подложка.

В качестве объектов исследования диссертационной работы выбраны структуры металл/кремний и металл/графит, сформированные ионно–ассистированным осаждением на кремний n – типа с удельным сопротивлением 200 Ом·см Ti, Cr, Co, Zr, Mo покрытий, на графит марки МПГ–6 Cr покрытий в условиях самооблучения. Металлы Ti, Cr, Co, Zr, Mo выбраны потому, что они широко применяются для получения коррозийно-стойких, упрочняющих, защитных и декоративных покрытий в промышленности. Для получения структур применяли способ нанесения покрытий с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы. Применение этого источника, который размещается в вакуумной камере, откачиваемой паромасляным диффузным насосом, позволяет совместить процесс физического напыления нейтральной фракции материала электродов, изготовленных из названных металлов, с облучением формирующегося покрытия ионами тех же металлов с энергией, определяемой величиной отрицательного потенциала, приложенного к держателю подложки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально обнаруженные особенности ионно-ассистированного в условиях самооблучения при энергиях ассистирующих ионов 3-10кэВ нанесения покрытий Ti, Co, Zr, Mo на кремний, заключающиеся в формировании структур покрытие/подложка с твердостью поверхности в 1,8 - 2,3 раз превышающей твердость кремния. Разброс значений твердости по поверхности структур от 30 до 39 % свидетельствует о гетерогенности поверхности.

2. Развитая физическая модель взаимодействия жидкости с поверхностью структур, полученных ионно-ассистированным нанесением металлов в условиях самооблучения, учитывающая гетерогенность по составу поверхности, её шероховатость и отношение полной площади поверхности к проективной. Модель объясняет экспериментально установленное увеличение краевого угла смачивания поверхности кремния водой до 90.6°, 70.7°, 69.2° и

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ

77.0° при нанесении покрытий Ti, Cr, Co, Mo и изменении краевого угла смачивания графита до 58.90, 59.80, 62.90, 67.80, при изменении отношения полной площади поверхности к проективной до 1.04, 1.09, 1.17, 1.29.

3. Выявленные изменения морфологии поверхности графита при ионно-ассистированном осаждении хрома, заключающиеся в уменьшении шероховатости поверхности на 28% при толщине покрытия ~300 нм, росте на 42 % при толщине ~ 700 нм и уменьшении шероховатости при последующем увеличении толщины покрытия до 1мкм. Изменения морфологии поверхности согласуются с предложенной моделью, учитывающей заполнение покрытием естественных неровностей на исходной поверхности графита и зависимость топографии формируемой поверхности от толщины покрытий.

Личный вклад соискателя

Соискателем были получены структуры покрытие/подложка, применяя ионно-ассистированное нанесение тонких Ti, Cr, Co, Zr, Mo пленок на кремний и Cr на графит. Выполнены послойный элементный анализ покрытий на кремнии и графите с применением резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием экспериментальных спектров и резонансной ядерной реакции; исследования шероховатости и топографии поверхности модифицированных изделий с применением атомно-силовой микроскопии. Также проведены расчеты плотности энергии выделенной в каскадах атомных столкновений, измерения нанотвердости модифицированной поверхности кремния, краевого угла смачивания для различных структур, интерпретированы экспериментальные результаты, полученные при решении поставленных задач. Соискатель модернизировал известную методику измерения равновесного краевого угла смачивания, создал оригинальную установку для измерения краевого угла смачивания с погрешностью, не превышающей 1%. Построил модель взаимодействия контактирующей жидкости с гетерогенной, шероховатой поверхностью, получаемой методом ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения.

Научный руководитель работы Ташлыков И. С. поставил цель и задачи проведения исследований, участвовал в анализе и интерпретации экспериментальных данных и обосновании моделей и механизмов, приводящих к изменению свойств поверхности, происходящих при ионно-ассистированном нанесении покрытий.

Автор выражает благодарность Тульеву В.В., Бобровичу О.М. и П.П. Уляшкову за помощь при проведении экспериментов по нанесению покрытий. О.М. Михалковичу, О.Г. Верес, И.П. Антоновичу за обсуждение и обобщение результатов послойного элементного анализа структур. В.Ф. Гременку, И.И. Ташлыковой–Бушкевич, П.В. Жуковскому, Е.С. Гутько, В.Г. Шепелевичу,

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

участвовавшим в обсуждении результатов атомно-силовой микроскопии. С.М. Мурашко за помощь в написании программного обеспечения.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

VIII Республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов НИРС – 2003 (Минск, 2003), XII – XV Республиканской научной конференции аспирантов, магистров и студентов по физике конденсированного состояния (Гродно, 2004 – 2007), 5 Международной научно-практической конференции "Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество" (Минск, 2004), Научно-методической конференции «Актуальные проблемы физики, математики и информатики» (Минск, 2004), XXXIV – XXXIX Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2004 – 2009), IV, V International Conference "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation" NEET, (Zakopane, Poland, 2005, 2007), 10 Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь, (Минск, 2005), II Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». (Минск, 2006), 7 и 8 ом Международных семинарах "Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии" (Минск, 2006, 2008), Международной конференции "Взаимодействие излучений с твёрдым телом ВИТТ – 2007" (Минск, 2007), Международной конференции "Актуальные проблеммы физики твёрдого тела ФТТ – 2007" (Минск, 2007).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований опубликованы в 30 научных работах, в том числе в 8 статьях в научных рецензируемых журналах общим объемом 5,51 авторского листа, 9 статьях в сборниках трудов международных научных конференций, 13 тезисах докладов. Общий объём публикаций – 10.56 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, библиографического списка. Полный объём диссертации 129 страниц, в том числе 14 таблиц, 47 рисунков на 20 страницах; библиографический список состоит из списка использованных источников (169 наименований на 14 страницах) и списка публикаций соискателя (30 наименований на 4 страницах); 2 приложения на 6 страницах.

РЕПОЗИТОРИЙ ВГПУ

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены основные методы ионно-лучевого модифицирования поверхности твёрдого тела, влияние данных методов на физические свойства поверхности и приповерхностных слоев.

Рассмотрены принципы ионно-ассистированного нанесения покрытий в вакууме на изделия, теоретические модели, описывающие процессы внедрения ионов и атомов отдачи, атомное перемешивание в каскадах атомных столкновений, распыление поверхности, радиационно-стимулированный массоперенос, изменение физических свойств приповерхностных слоев. Показаны основные направления совершенствования процессов формирования покрытий на изделиях. Представлены данные экспериментальных и теоретических исследований выполненных ранее другими учёными, по физико-химическим процессам, происходящим в материалах при ионно-лучевом воздействии. Отмечены вопросы, которые остались неразрешёнными. Показаны преимущества метода ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения, такие как наблюдаемая на атомном уровне адгезия покрытия к подложке и отсутствие нежелательных примесей благородных газов, требуемое качество модифицированных поверхностей изделий.

Во второй главе описаны объекты исследования и использованные при проведении их изучения в данной работе методы и оборудование.

Покрытия на основе Ti, Cr, Co, Zr, Mo осаждались на подложку методом ионно-ассистированного нанесения покрытий в условиях самооблучения (ИАНПУС), в котором радиационное ассистирование обеспечивается ускоренными ионами материала основы покрытия. Для получения структур покрытие/графит и покрытие/кремний методом ИАНПУС использовался резонансный вакуумный плазменно-дуговой источник, в котором электроды были изготовлены из материала наносимого покрытия. Такой способ нанесения позволяет получить регулируемые потоки ионов основы покрытия с плотностью I и нейтральных атомов с плотностью A. Воздействие ускоренных ионов на рост плёнки и её физические свойства зависит от типа иона, его энергии и отношения I/A. В поставленных экспериментах плотность потока ассистирующих ионов 10^{14}-10^{15} см$^{-2}$с$^{-1}$, вакуум в мишенной камере ~10^{-2} Па.

Рассмотрены методы, позволившие определить элементный состав и распределение компонентов по глубине в сформированных структурах тонкая плёнка/подложка. В частности, приведены физические основы метода резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием экспериментальных спектров РОР с применением программы RUMP. Для измерения пространственного распределения ^{1}H по глубине покрытия в структурах Me/Si была применена

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

резонансная ядерная реакция $^{1}H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$, при энергии ионов азота 6.4 МэВ. Эксперименты проводились на экспериментальном комплексе спектроскопии γ – излучения института ядерной физики имени М. Планка в Гейдельберге. Использованный метод атомно-силовой микроскопии позволил получить информацию о топографии исходных и модифицированных изделий, данные о шероховатости поверхности. Описана методика измерения равновесного краевого угла смачивания (РКУС), которая была применена для получения данных о гидрофильности и гидрофобности поверхности образцов. Разработанная установка для измерения КУС демонстрируется на рис. 1.

Рисунок 1 - Схема измерения краевого угла смачивания

На поверхность образца 1, закреплённого на столике 2, с помощью шприца 3 помещается капля жидкости 4. Процесс позиционирования и выдавливания капли производятся шаговыми двигателями при помощи блока управления 5. Изображение, подсвеченное монохроматическим источником света 7, регистрируется цифровой фотокамерой 6. Краевой угол смачивания измеряли автоматически по углу касательной к поверхности капли, используя компьютерное моделирование изображения формы капли на образце и положения касательной к линии трёхфазного контакта. Значение РКУС усредняли по 10 измерениям. Погрешность при измерениях не превышала 1%. В качестве смачивающей жидкости применялась бидистиллированная вода.

Измерение нанотвёрдости и модуля Юнга в работе проводилось при помощи нанотвердомера «Fisher H100». Нагрузка на индентор изменялась в интервале от 0.4 до 20 мН. Глубина проникновения индентора составляла 50–300 нм. Экспериментальные данные обрабатывались методом Оливера–Фарра.

Комбинация описанных методов исследования позволяет получить достаточно полную картину по элементному и химическому составу поверхности, структуре поверхности и влиянии этих факторов на РКУС.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ

В третьей главе обсуждаются результаты изучения физических процессов на поверхности кремния при модифицировании ионно-ассистированным осаждением металлсодержащих покрытий. Анализируются результаты ионно-ассистированного осаждения в условиях самооблучения тонких плёнок на основе Ti, Cr, Co, Zr, Mo на пластины (111) и (100) Si. Нанесение покрытий осуществлялось при ускоряющем потенциале 3-10 кВ. Скорость нанесения покрытий от 0,5 до 2 нм/мин, отношении I/A=0.02-0.5.

Анализ экспериментальных спектров РОР на примере Mo покрытия показывает наличие в составе нанесённых покрытий кроме атомов металла, рис.2, примесей кислорода, углерода, а также кремния, диффундирующего в покрытие из подложки. Моделирование экспериментальных спектров РОР с применением компьютерной программы RUMP установлено наличие водорода в покрытиях. В независимых экспериментах с применением резонансной ядерной реакции $^{1}H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$ было подтверждено присутствие водорода в металлопокрытиях на кремнии.

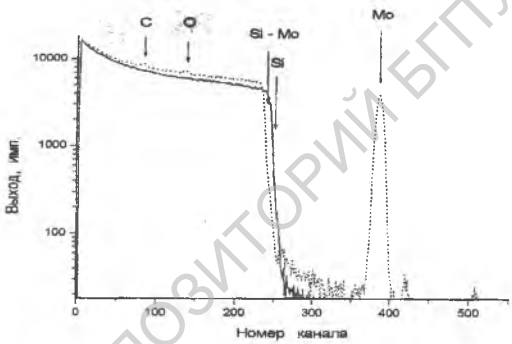

Рисунок 2 – Энергетический спектр ОР ионов He^{+} с E_0=1.4 МэВ от кремния (111) Si, модифицированного ионно-ассистированным нанесением покрытий на основе молибдена при ускоряющем потенциале 3 кВ

При анализе профилей распределения элементов в структурах металлсодержащее покрытие/кремний установлено взаимопроникновение компонентов покрытия и атомов подложки. На рис. 3 представлено глубинное распределение атомов в структуре Mo покрытие/подложка, полученное при моделировании экспериментального спектра, показанного на рис. 2 (пунктир). В приповерхностной области содержится 6 ат % Mo, 40,5 ат % водорода, почти столько же углерода, 10,5 ат % кислорода и 1 ат % кремния. Профиль металла характеризуется концентрацией, снижающейся от 6 ат % на поверхности до 0.3 ат % в области ПИПП системы, что отчётливо проявляется на рис.3. Кислород

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

распределен в покрытии равномерно, а в кремнии его концентрация снижается в несколько раз, но остается выше, чем концентрация металла.

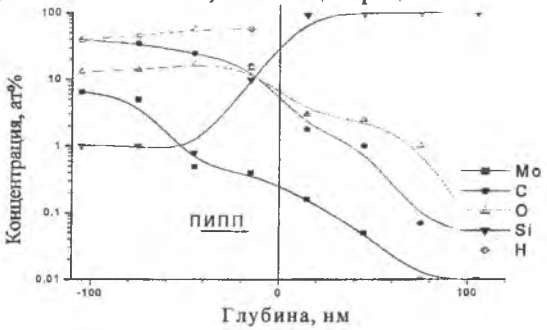

Рисунок 3 – Профили распределения компонентов в системе Mo – Si после ионно-ассистированного нанесения Mo на кремний

Концентрация H возрастает с 45 ат % на поверхности покрытий до 60 ат % вблизи межфазной границы. Концентрация C в покрытии выше, чем O, а в кремнии ниже. В состав покрытия входит примесь кремния, концентрация которого составляет ~1 ат %. Поведение компонентов покрытий на основе Ti, Co, наносимых на кремний сходно. В условиях облучения ионами металлов с энергией в интервале 3–10кэВ наблюдается радиационно-стимулированная диффузия атомов покрытия в подложку и атомов подложки в покрытие.

При изучении топографии поверхности исходного и модифицированного кремния было определено изменение параметров поверхности, табл. 1.

Таблица 1 - Характеристики топографии и РКУС водой поверхности исходного и модифицированного кремния

Параметр	Кремний исходный	Ti	Cr	Co	Mo
Средняя шероховатость, нм	0,17	1,10	0,65	0,74	0,87
Отношение полной площади участка к его проективной площади	1,0027	1,0044	1,0068	1,0073	1,0057
РКУС, град.	68,1	90,6	70,7	69,2	77.0

Как следует из данных, приведенных в таблице, средняя шероховатость исходного кремния весьма незначительна <0.2 нм и изменяется до 1.1 нм для кремния с покрытием на основе Ti. Полная площадь фрагмента практически не отличается от проективной. Качественно подобные свойства проявляются при анализе топографии поверхности кремния с Cr, Co, Mo покрытиями.

Анализ значений РКУС водой поверхности кремния, модифицированной осаждением покрытий на основе металлов, приведенных в таблице 1, позволяет

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

сделать вывод о возможности управления смачиваемостью кремния изменением состава и топографии поверхности, используя метод ИАНПУС.

Развита физическая модель взаимодействия контактирующей жидкости с гетерогенной, шероховатой поверхностью, которая выделяет три основных фактора, влияющих на статическую смачиваемость поверхности:

1. Химический состав поверхности материала, который обуславливает свободную поверхностную энергию;
2. Гетерогенность состава поверхности;
3. Реальные свойства топографии поверхности (её шероховатость);

Учёт этих факторов позволяет в более общей форме определить РКУС с учётом влияния элементного состава поверхности и её топографии.

Рассмотрим фактор влияния неоднородности на смачивание. При малых размерах неоднородностей (до ~200 нм^2, как в наших исследованиях) становится возможным вводить усредненное значение свободной поверхностной энергии, которая рассчитывается из аддитивных вкладов участков различного состава

$$\begin{aligned} \sigma_{TЖ} &= \varphi'\sigma'_{TЖ} + \varphi''\sigma''_{TЖ} \\ \sigma_{TГ} &= \varphi'\sigma'_{TГ} + \varphi''\sigma''_{TГ} \end{aligned}, \qquad (1)$$

где σ' и σ'' поверхностные энергии для участков первого и второго рода соответственно, а φ' и φ'' доли этих участков.

$$\cos\theta_P = k\left[\varphi'(2\frac{W'_A}{W'_K}-1)+\varphi''(2\frac{W''_A}{W''_K}-1)\right], \qquad (2)$$

здесь W'_A и W''_A – потенциальная работа адгезии, а W'_K W''_K – потенциальная работа когезии для материала первого и второго рода соответственно, k – отношение фактической полной площади поверхности к её проективной площади на плоскость, охваченную контуром капли. Это выражение учитывает все 3 основных фактора, влияющие на РКУС и имеет одно допущение: размеры капли должны значительно превосходить неровности на поверхности.

Таким образом, задача проектирования поверхности с заранее заданным РКУС представляется в виде получения на поверхности однородного по элементному составу и равномерно распределенного по поверхности покрытия, удовлетворяющего условиям:

- известной поверхностной энергии (потенциальной энергии адгезии и когезии) для материалов подложки и основы покрытия;
- гетерогенности поверхности с размерами неоднородностей, не превышающими по площади 200 нм^2;
- с заданными параметрами шероховатости;
- заданным отношением долей участков различных материалов.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Анализ результатов измерений механических характеристик (рис. 4) показал, что интегральная нанотвердость покрытий на основе исследованных металлов сравнима с нанотвердостью поверхности исходного кремния. При нанесении покрытий наблюдается уменьшение модуля Юнга у всех изучаемых систем покрытие/подложка на 20 – 40%.

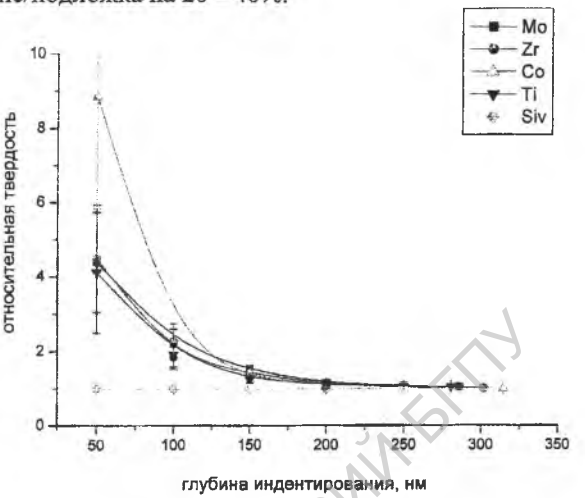

Рисунок 4 – Графики зависимости нанотвердости поверхности сформированных структур от глубины индентирования

Твердость непосредственно покрытий в 1.8–2.3 раз выше, чем твердость исходного кремния и сопоставима с твердостью алмазоподобных покрытий. Наибольшая твердость наблюдается для Co покрытий, достигая ~ 39 ГПа. Эффективный модуль Юнга покрытий в ~ 1.5 – 2.5 раза меньше чем у поверхности кремния.

Четвёртая глава посвящена изучению физико-химических процессов и изменениям в структуре поверхности графита, модифицированной методом ИАНПУС. Осаждение покрытий на основе Cr осуществлялось при энергии ассистирующих ионов в различных экспериментах от 5 до 10 кВ. Отношение I/A от 0.5 до 6, а скорость осаждения покрытий была от 1 до 4 нм/мин. Толщина наносимых покрытий в разных экспериментах была от ~300 до ~1050 нм, вакуум при осаждении покрытий составлял ~10^{-2} Па. Время осаждения покрытий 1, 3, 6 и 12 часов. Такие условия обеспечивают адгезию покрытия к подложке на атомном уровне в результате взаимопроникновения элементов покрытия в подложку в области межфазной границы и встречной диффузии атомов мишени в наносимое покрытие.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

С применением метода РОР в сочетании с компьютерным моделированием было установлено (рис. 5), что в состав получаемых покрытий на графите входят атомы наносимого металла, технологические примеси (кислород, водород и углерод) из остаточного вакуума мишенной камеры, а также атомы кремния и углерода, появляющиеся в покрытии в результате встречной диффузии из подложки.

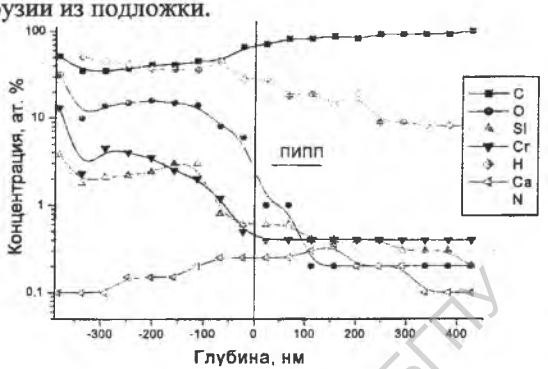

Рисунок 5 - Профили компонентов по глубине в структуре хром/графит, полученные моделированием экспериментального спектра РОР

Как видно, концентрация хрома снижается с 10 ат % на поверхности до ~ 0.6 ат % в области межфазной границы раздела покрытие/подложка. При этом атомы хрома с концентрацией ~0.5 ат % обнаруживаются в графитовой подложке на глубине свыше 350 нм, что свидетельствует о радиационно-стимулированной диффузии Cr в подложку.

Распределения атомов кислорода по глубине качественно согласуется с распределением хрома, однако его концентрация в покрытии выше в 6-9 раз, а в графите, начиная с глубины ~100 нм концентрация O в ~3 раза меньше, чем Cr. Концентрация H и C в покрытии соизмеримы, достигая на разных глубинах 40-50 ат%. Вместе с тем, в отличие от систем покрытие/сталь, алюминий, кремний, в которых водород локализуется только в металлопокрытиях, при нанесении покрытий на графит наблюдается проникновение водорода в глубь графита с концентрацией до 8-9 ат % на глубине ~350 нм.

Распределение хрома в полученных структурах качественно согласуется с полученными ранее данными для покрытия из Co и Mo, однако впервые установлена зависимость концентрации металла в наносимом покрытии от времени нанесения, которая проявляется в стабилизации концентрации хрома на поверхности по мере увеличения времени осаждения покрытия.

Изучена поверхность графита, модифицированного нанесением хрома. Средняя шероховатость площадок исходного графита размером 25 мкм^2 составляет 24,27 нм, после нанесения покрытия толщиной ~320 нм

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

шероховатость поверхности уменьшается на ~28%, при дальнейшем росте толщины покрытия шероховатость плавно растёт и при ~540 нм становиться сопоставимой с шероховатостью исходного образца, а когда толщина покрытия возрастает до ~1мкм – достигает значения 34,36 нм.

Смачивание графита дистиллированной водой изучалось в условии стабилизации капли в течение 120с. При измерении РКУС значение для систем покрытие/подложка, полученных нанесением покрытия в течение одного часа, меньше, чем значение для исходного графита на 2 %, РКУС, увеличивается и при толщине покрытия ~700 нм, достигая своего максимума 68^0(+15,6 %).

После нанесения покрытия толщиной >800 нм наблюдается стабилизация в изменении РКУС, его значение уменьшается на 2-3 %. Это свидетельствует о том, что при толщинах покрытия ~700 нм и более покрытие становится однородным и равномерным по составу и основным фактором, влияющим на смачиваемость, становиться вклад топографии нанесённого покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Методом резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием экспериментальных спектров в программе RUMP, а также методом резонансной ядерной реакции $^1H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$ обнаружено, что в системах покрытие/подложка, полученных при ионно-ассистированном в условиях самооблучения нанесении тонких пленок Ti, Co, Mo на кремний и Cr на графит, когда энергия ассистирования составляет от 3 до 10 кэВ, в состав полученных покрытий входят металл, водород, углерод, кислород, кремний, образуя химические соединения с атомами металла. Концентрация атомов металла спадает от 8.6, 8.5, 6.5 ат.% на поверхности соответствующих систем, полученных осаждением на кремний, до 1.0, 1.0, 0.3 ат.% в области межфазной границы и с концентрацией хрома 8.6 – 9.5 ат.% на поверхности до 1.1 – 1.6 ат.% в области межфазной границы покрытий/графит. Металлы идентифицируются в подложках на глубине более 100 нм с концентрацией 0.03, 0.04, 0.01 ат.% соответственно в кремнии и 0.5 ат.% в графите.

Установлено, что глубина проникновения компонентов покрытия в подложку многократно превышает значения теоретически рассчитанного пробега ассистирующих ионов в подложке с учетом страгглинга, что обусловлено радиационно-стимулированной диффузией атомов металлов, углерода, кислорода в кремний и дополнительно атомов водорода в графит за счет известного механизма миграции дефектов, индуцированной ионным облучением в процессе ионно-ассистированного нанесения тонких пленок. Радиационно-стимулированная диффузия так же ответственна за не

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

спадающую по экспоненциальному закону встречную диффузию атомов кремния в покрытие с концентрацией, достигающей 1.4, 2.0, 1.0 ат.% в соответствующих системах. Формирование гидридов, карбидов, оксидов и силицидов металлов в результате процессов, протекающих в каскадах атомных столкновений при торможении ассистирующих ионов согласно известной модели, подтверждается наличием в составе покрытий водорода, углерода, кислорода и атомов подложки, которые участвуют в структурно фазовых превращениях.

Обнаруженное явление взаимопроникновения атомов покрытия в подложку и атомов подложки в покрытие при снижении энергии ассистирующих ионов до 3 кэВ может быть использовано для нанесения покрытий, обладающих адгезией к подложке на атомном уровне. Образование в покрытиях химических соединений способствует изменению свойств поверхности [1–А, 2–А, 4–А - 6–А, 8–А -16–А, 18–А - 21–А, 24–А, 26–А - 28–А].

2. Методом наноиндентирования обнаружено, что значение интегральной твердости систем соизмеримо с твердостью исходного кремния для всех исследованных систем на основе кремния и составляет 16±3 ГПа. Интегральный модуль Юнга для систем Ti/Si, Co/Si, Zr/Si, Mo/Si составляет соответственно 58%, 80%, 73%, 66% от модуля Юнга исходного кремния.

Используя данные, полученные для интегральной твердости систем и известную модель, позволяющую оценить твердость тонких пленок, нанесенных на подложки известной твердости, установлено, что твердость поверхностного слоя покрытия толщиной 100 нм составляет 36.1, 30.0, 38.7, 31.3 ГПа соответственно, что в 1,8 – 2,3 раз тверже поверхности исходного кремния. Высокая твердость полученных покрытий дополнительно подтверждает факт вхождения в состав покрытий карбидов, оксидов, гидридов металлов которые, как известно, являются основой для алмазоподобных пленок [3–А, 25–А, 30–А].

3. Методом атомно-силовой микроскопии обнаружено, что при ионно-ассистированном в условиях самооблучения нанесении хромовых покрытий при ускоряющем потенциале 10 кВ шероховатость исходного графита, составляющая 24.3 нм, уменьшается до 17.4 нм, когда толщина покрытий составляет ~ 320 нм. При толщине покрытия ~ 540 нм этот параметр составляет 23.7 нм и достигает максимального значения в 34.4 нм при толщине покрытий ~ 700 нм, далее спадает до 28.4 нм при увеличении толщины покрытий до ~1050 нм.

Немонотонный характер изменения шероховатости согласуется с моделью изменения топографии поверхности, учитывающей, что в начале процесса осаждения хромовых покрытий естественные неровности на исходной поверхности графита заполняются материалом покрытия. При достижении толщины покрытий, сопоставимой с размером неровностей на исходной

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

поверхности, её шероховатость зависит как от структуры подложки, так и от топографии покрытия, а с дальнейшим ростом толщины покрытий параметры неровности поверхности системы покрытие/подложка определяются параметрами топографии самой тонкой пленки, которые снижаются до значений шероховатости наносимого покрытия [5–А, 7–А, 17–А, 26–А, 29–А].

4. Для измерения равновесного краевого угла смачивания с получением значений, характеризующихся кратным (по сравнению с известными установками) снижением погрешности измерений, не превышающей 1.0 %, создана установка, в которой изображение капли на поверхности образца автоматически регистрируется цифровой камерой, имеющей выход на компьютер и управляемой дистанционно. Обработку полученных изображений проводят с применением разработанной программы Angle, с помощью которой без вмешательства оператора осуществляется измерение равновесного краевого угла смачивания по автоматически построенному изображению касательной к поверхности капли в точках трёхфазного контакта. Изображение точки трехфазного контакта получают в результате работы программы по разделению групповыми фильтрами точек изображения капли на поверхности образца по принадлежности одной из трёх фаз: подложка, жидкость, воздух.

Установка может быть использована в измерениях краевого угла смачивания поверхности изделий жидкостями, в работах по изменению смачиваемости поверхности [5–А, 11–А].

5. Обнаружено, что равновесный краевой угол смачивания водой поверхности исходного кремния, равный 68.1°, после нанесения титанового, хромового, кобальтового и молибденового покрытия увеличился до 90.6°, 70.7°, 69.2°, 77.0° соответственно.

Установлен факт влияния на смачиваемость поверхности систем покрытие/кремний композиционного состава наносимого покрытия, содержащего атомы металла, водорода, углерода, кислорода и атомы подложки, входящие в покрытие в результате восходящей диффузии. Установленный факт согласуется с моделью, описывающей взаимодействие с жидкостью поверхности, которая гетерогенна по химическому составу по площади поверхности, что подтверждает наличие в составе покрытий химических соединений, в состав которых входят водород, углерод, кислород, атомы подложки и металла и обуславливает необходимость учёта вклада фазового состава покрытий в свободную поверхностную энергию.

Обнаруженное влияния элементного состава покрытий на равновесный краевой угол смачивания водой поверхности модифицированных изделий может быть использовано для управления смачиваемостью поверхности изделий [5–А, 11–А,13–А, 20–А, 23–А].

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

6. Обнаружено, что равновесный краевой угол смачивания водой поверхности графита, равный 59.3°, после модифицирования поверхности нанесением хромовых покрытий составляет 58.9° для покрытия толщиной 320 нм, 59.8° - 540 нм, 67.8° - 700 нм и 62.9° при толщине покрытий 1050 нм.

Установлено, что на смачиваемость поверхности графита с хромовым покрытием влияет шероховатость поверхности. Варьированием шероховатостью поверхности получаемых металлопокрытий можно регулировать смачиваемость поверхности графита. Развита физическая модель, описывающая взаимодействие с жидкостью поверхности металлсодержащего покрытия, нанесённого на графит при ионном ассистировании в условиях самооблучения, которая учитывает параметры топографии поверхности, а именно шероховатость, проективную и полную площадь и состав поверхности, охватываемой контуром капли [5–А, 17–А, 26–А, 29–А].

Рекомендации по практическому применению

Результаты диссертационного исследования представляют научный и практический интерес, так как позволяют формировать гидрофильные или гидрофобные покрытия на поверхности изделий, формирование поверхности изделий с заданным равновесным краевым углом смачивания водой, управлять композиционным составом и шероховатостью поверхности. В работе проведены комплексные исследования состава и свойств поверхности структур покрытие-подложка, полученных методом ионно-ассистированного осаждения покрытий на основе металлов на графит и кремний. Возможность модификации смачиваемости поверхности позволяет применять осаждение покрытий для формирования поверхностей функциональных элементов с необходимыми свойствами.

Результаты исследований рекомендуются для использования при разработке новых устройств микроэлектроники, поверхность которых должна обладать заданными свойствами для работы в ответственных условиях.

Результаты представляют интерес для ряда предприятий и организаций Республики Беларусь: НПО «Интеграл», ГНПО «Планар», ОДО «Микротестмашины». Используются в учебном процессе на физическом факультете БГПУ, а также рекомендуются для использования на физических кафедрах в БГУ, БНТУ, БГУИР. В научно-исследовательских институтах, занимающихся изучением и модификацией свойств поверхности материалов.

Развитая методика снятия снимков АСМ рекомендуется для проведения исследований поверхности с использованием АСМ. Предложенная схема снижения уровня вибрации рекомендуется для применения в условиях промышленного использования АСМ и других чувствительных к вибрации приборов, в частности для контроля изделий микроэлектроники. Модернизированный метод измерения РКУС и созданная установка, рекомендуется для применения в научно исследовательских лабораториях.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах :

1–А. Элементны склад паверхні крэмнію, мадыфікаванага асаджэннем пакрыцця на аснове малібдену / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Весці Беларус. дзярж. пед. ун–та. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. – 2004. – №3(41). – С. 3–6.

2–А. Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co) – покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний / И.С. Ташлыков, О.М. Бобрович, В.В. Тульев, С.М. Барайшук // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №1. – С. 54–58.

3–А. Механические свойства и топография поверхности кремния, модифицированного ионно-ассистированным осаждением покрытий / И.С. Ташлыков, В.В.Тульев, С.М. Барайшук, П.П. Уляшков. // Труды Белорус. гос. технолог. ун–та. Сер. 6, Физико–математические науки и информатика. – 2006. – Вып. 14. – С. 85–87.

4–А. Analysis of the composition of Ti–based thin films deposited on silicon by means of self-ion assisted deposition / I.S. Tashlykov, P.V. Zukowski, S.M. Baraishuk, O.M. Mikhalkovich // Radiation Effects and Defects in Solids. – 2007. – Vol. 162. – P. 637–641.

5–А. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением хромовых покрытий / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Известия вузов. Сер. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – Москва. – №1. – 2008. – С. 30–35.

6–А. Структура и повреждение кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением тонких пленок / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.П. Антонович // Przeglad Elektrotechniczny. – 2008. – №3. – P. 111 – 113.

7–А. Структурный и фазовый анализ быстрозатвердевших сплавов Al–Fe / И.И. Ташлыкова–Бушкевич, Е.С. Гутько, В.Г. Шепелевич, С.М. Барайшук // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – М. – №4. – 2008. – С. 69–75.

8–А. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном нанесении тонких пленок / И.С. Ташлыков, О.Г. Бобрович, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.П. Антонович // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 5. – С. 92–95.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Статьи в сборниках материалов научных конференций:

9–А. Барайшук, С.М. Изучение состава покрытий на основе Мо, Осажденных на кремний в условиях ионного ассистирования / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Актуальные проблемы физики, математики и информатики: материалы студ. науч.–методич. конф., посвящ. 30–летию физич. и матем. фак. БГПУ Минск, 5 мая 2004 г. / Белорус. гос. пед. ун–т; редкол.: С.И. Василец [и др.]. – Минск, 2004. – С. 4–9.

10–А. Ташлыков, И.С. Дефектообразование в кремнии при ионно-ассистированном осаждении металлопокрытий / И.С. Ташлыков, О.М. Бобрович, С.М. Барайшук // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: сб. науч. трудов 5 Междунар. науч.–практич. конф. Минск, 13–15 октября 2004 г. / Белорус. гос. ун–т.; редкол.: В.Б. Оджаев [и др.]. Минск, 2004. – С. 118–120.

11–А. Ташлыков, И.С. Состав, структура и смачиваемость поверхности изделий, модифицированных ионно-ассистированным нанесением покрытий / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.П. Антонович // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: proc. IV int. conf. Zakopane, Poland. – June 21–24. – 2005. / Lublin univ. of technol.; ed. P.Wegierek [et al.]. – Lublin, 2005. – P. 171–174.

12–А. Ташлыков, И.С. Диагностика поверхности кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением тонких плёнок / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Материалы и структуры современной электроники: сб. трудов II Междунар. конф. Минск, 5–6 октября 2006г. / Белорус. гос. ун–т., Мин. обр. РБ, Белорус. фонд фунд. иссл.; редкол.: В.Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2006. – С. 20–25.

13–А. Барайшук, С.М. Топография и свойства поверхности изделий, модифицированных ионно–ассистированным осаждением покрытий / С.М. Барайшук, И.С. Ташлыков, О.Г. Верес // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии VII Междун. семинар Минск, 1–3 ноября 2006г. / Институт тепло– и массообмена НАН Беларус. редкол.: А.И. Свириденок [и др.]. – Минск, 2006. – С. 217–222.

14–А. Ташлыков, И.С. Повреждение структуры кремния при ионно–ассистированном осаждении покрытий / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Взаимодействие излучения с твёрдым телом: материалы 7–й Междунар. конф. Минск, 26–28 сент. 2007г. / Белорус. гос. ун–т., Мин. обр. РБ, Белорус. Фонд Фунд. иссл. НАН; редкол.: В.М. Аницик [и др.]. – Минск, 2007. – С. 335–337.

15–А. Tashlykov, I.S. Composition and structure of low dimension films deposited on solid and nonrigid materials / I.S. Tashlykov, O.G. Veres, S.M.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Baraishuk // Physics, Chemistry and application of nanostructures: proceeding of the international conference Nanomeeting 22–25 may 2007. / Belarusian State Univ. of informatics and Radioelectronics; ed. : V. E. Borisenko [et.al.]. – Singapore, World Scientific Publishing, 2007. – P. 503 – 506.

16–А. Ташлыков, И.С. Дефектообразование в кремнии при ионно–ассистированном нанесении тонких пленок / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Актуальные проблемы физики твёрдого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. – 23–26 октября 2007 г./ НАН Беларуси, Объед. Институт физики твердого тела и полупроводников, Фонд Фунд. иссл.; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, БГУ. –2007. – Т 3. – С. 80–82.

17–А. Барайшук, С.М. Применение АСМ при изучении морфологии поверхности графита, подвергнутого ионно-лучевой обработке / С.М. Барайшук, И.С. Ташлыков, А.И. Туровец // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии VIII междун. семинар Минск, 8–10 октября 2008г. / Институт тепло– и массообмена НАН Беларус. редкол.: А.И. Свириденок [и др.]. – Минск, 2008. – С. 80–85.

Тезисы докладов:

18–А. Барайшук, С.М. Изучение состава покрытий на основе Мо, осаждённого на кремний в условиях ионного ассистирования / С. М. Барайшук // НИРС – 2003: сборник тезисов докладов науч. конф., Минск, 9–10 декабря 2003 г.: в 4 ч. / Белорус. нац. технич. ун–т; редкол.: [и др.]. – Минск, 2003. – Ч. 2. – С. 167.

19–А. Барайшук, С.М. Изучение состава покрытий на основе Мо, осаждённого на кремний в условиях ионного ассистирования / С.М. Барайшук // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XII Республ. науч. конф. асп., маг. и студ. Гродно, 21–23 апреля 2004 г. / Гродн. гос. ун–т; редкол.: В.В. Сенько [и др.]. – Гродно, 2004. – С. 126–129.

20–А. Ташлыков, И.С. Композиционный состав и смачиваемость поверхности кремния, модифицированного ионно–ассистированным осаждением покрытий / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXIV междунар. конф. Москва, 31 мая – 2 июня 2004г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2004. – С. 146.

21–А. Барайшук, С.М. Состав поверхности кремния с покрытиями, нанесенными в условиях ионного-ассистирования / С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIII Республ. науч. конф. асп., маг. и студ. Гродно, 26–28 апреля 2005г. / Гродн. гос. ун – т; редкол.: В.Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2005. – С. 273–276.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

22–А. Ташлыков, И.С. Повреждение структуры кремния при ионно–ассистированном осаждении покрытий в условиях самооблучения / И.С. Ташлыков, О.М. Бобрович, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXV междунар. конф. Москва, 31 мая – 2 июня 2005г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2005. – С. 176.

23–А. Барайшук, С.М. Топография и шероховатость поверхности кремния, модифицированного нанесением покрытий / С.М. Барайшук, И.С. Ташлыков // НИРС 2005: сборник тезисов докладов 10–й респ. науч. конф. студ. и асп. высших учебных заведений Республики Беларусь, Минск, 14 – 16 февраля 2006г. / Белорус. гос. ун–т.; редкол.: Т. А. Дик [и др.] – Минск, 2005. – С. 211.

24–А. Барайшук, С.М. Повреждение структуры и топография поверхности при ионно–ассистированом осаждении покрытий / С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIV Республ. науч. конф. асп., маг. и студ. Гродно, 26–28 апреля 2006г. / Гродн. гос. ун–т; редкол.: В.Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2006. – С. 125–129.

25–А. Ташлыков, И.С. Нанотвердость и топография поверхности кремния с покрытиями, нанесёнными при ионном ассистированиии / И.С. Ташлыков, В.В.Тульев, С.М. Барайшук, П.П. Уляшков // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVI междунар. конф. Москва, 30 мая – 1 июня 2006г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2006. – С. 151.

26–А. Барайшук, С.М. Изучение состава и топографии поверхности покрытий на основе хрома осаждённых на графит / С.М. Барайшук // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIV Республ. науч. конф. асп., маг. и студ. Гродно, 25–27 апреля 2007г. / Гродн. гос. ун–т; редкол.: Е.И. Ровба [и др.]. – Гродно, 2007. – С. 171–174.

27–А. Ташлыков, И.С. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно–ассистированном нанесении тонких плёнок / И.С. Ташлыков, О.М. Бобрович, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVII междунар. конф. Москва, 29–31 мая 2007г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2007. – С. 120.

28–А. Tashlykov, I.S. Structure and damage of silicon modified by means of thin films ion assisted deposition / I.S. Tashlykov, P.V. Zukowski, S.M. Baraishuk, O.M. Mikhalkovich, I.P. Antonovich // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: proc. V int. conf. Zakopane, Poland, June 12–15, 2007. / Lublin univ. of technol.; ed. P.Wegierek [et al.]. –Lublin, 2007. – P. 79.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

29–А. Ташлыков, И.С. Влияние нанесения хромовых покрытий на краевой угол смачивания графита / И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXVIII междунар. конф. Москва, 27–29 мая 2008г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2008. – С. 123.

30–А. Барайшук, С.М. Модифицирование нанотвердости и морфологии поверхности кремния ионно- асистированным нанесением тонких пленок / С.М. Барайшук, В.В. Тульев, В.Ф. Гременок, И.С. Ташлыков// Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов XXXIX междунар. конф. Москва, 26–28 мая 2009г. / Моск. гос. ун–т; редкол.: А.Ф. Тулинов [и др.]. – Москва, 2009. – С. 126.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

РЕЗЮМЕ

Барайшук Сергей Михайлович

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА И КРЕМНИЯ ИОННО-АССИСТИРОВАННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

Ключевые слова: ионно-ассистированное нанесение покрытий, состав покрытий, металлсодержащее покрытие, кремний, графит, краевой угол смачивания, шероховатость, толщина покрытия, нанотвердость.

В настоящей работе впервые установлено влияние процессов осаждения металлсодержащих покрытий на основе Ti, Cr, Co, Zr, Mo при осаждении на кремний и Cr на графит при ионном ассистировании в условиях самооблучения на топографию поверхности формируемых структур покрытие/подложка и равновесный краевой угол смачивания, нанотвердость.

С применением резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия и компьютерного моделирования экспериментальных спектров РОР программой RUMP, а также резонансной ядерной реакции $^{1}H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$, при энергии ионов азота 6.4 МэВ, установлен послойный композиционный состав структур покрытие/подложка, полученных при энергии ассистирования от 3 до 7 кэВ.

Методом атомно-силовой микроскопии получены данные о шероховатости поверхности, значения полной и проективной площади поверхности, установлены параметры поверхности кремния и графита с нанесенными покрытиями, установлена закономерность управления шероховатостью модифицируемой поверхности графита изменением толщины покрытия.

При помощи нанотвердомера «Fisher H100» измерена нанотвердость и модуль Юнга. Твердость полученных на кремнии покрытий в 1.8–2.3 раза выше, чем твердость исходного кремния и сопоставима с твердостью алмазоподобных покрытий. При этом наблюдается уменьшение эффективного модуля Юнга у всех изучаемых систем покрытие/подложка на 20–40%.

Для измерения равновесного краевого угла смачивания создана установка, погрешность измерений которой менее 1%. Выполнены измерения равновесного краевого угла смачивания бидистиллированной водой поверхности конструкций покрытие/кремний, хром/графит, в результате которых установлено, что смачиваемостью поверхности графита и кремния можно управлять путем нанесения покрытий разной толщины.

Представлена физическая модель, развивающая представление о влиянии композиционного состава и шероховатости поверхности на взаимодействие жидкости с металлсодержащим покрытием.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

РЭЗЮМЭ

Барайшук Сяргей Міхайлавіч

МАДЫФІКАЦЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦЕЙ ПАВЕРХНІ ГРАФІТУ І КРЭМНІЮ ІОННА-АСІСЦІРАВАНЫМ АСАДЖЭННЕМ МЕТАЛУТРЫМЛІВАЮЧЫХ ПАКРЫЦЦЯЎ

Ключавыя словы: іонна-асісціраванае нанясенне пакрыццяў, склад пакрыццяў, металутрымліваючае пакрыццё, крэмній, графіт, краявы вугал змочвання, шурпатасць, таўшчыня пакрыцця, нанацвёрдасць.

У дадзенай рабоце ўпершыню вызначаны ўплыў працэсаў асаджэння металутрымліваючых пакрыццяў, асновай якіх з'яўляюцца Ti, Cr, Co, Zr, Mo, пры асаджэнні на крэмній і Cr на графіт пры іонным асісціраванні ва ўмовах самаапраменьвання на тапаграфію паверхні фарміраваных структур пакрыццё/падложка і раўнаважны краявы вугал змочвання, нанацвёрдасць.

З ужываннем рэзерфордаўскага адваротнага рассейвання іонаў гелію і камп'ютарнага мадэлявання эксперыментальных спектраў РАР праграмай RUMP, а таксама рэзананснай ядзернай рэакцыі $^{1}H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$, пры энергіі іонаў азоту 6.4 МэВ вызначаны паслойны кампазіцыйны склад структур пакрыццё/падложка, атрыманых ва ўмовах, калі энергія асісціравання была роўная ад 3 да 7 кэВ.

Метадам атамна-сілавой мікраскапіі атрыманы даныя аб шурпатасці паверхні, значэнні поўнай і праектыўнай плошчы паверхні, вызначаны параметры паверхні крэмнію і графіту з нанесенымі пакрыццямі, вызначана заканамернасць кіравання шурпатасцю мадыфікуемай паверхні графіту змяненнем таўшчыні пакрыцця.

Пры дапамозе нанацвердамера «Fisher H100» вымерана нанацвёрдасць і модуль Юнга. Цвёрдасць атрыманых на крэмнію пакрыццяў у 1.8–2.3 раза вышэйшая за цвёрдасць пернапачатковага крэмнію і супастаўляльная з цвёрдасцю алмазападобных пакрыццяў. Пры гэтым назіраецца памяншэнне эфектыўнага модуля Юнга ва ўсіх вывучаемых сістэм пакрыццё/падложка на 20–40%.

Для вымярэння раўнаважнага краявога вугла змочвання створана ўстаноўка, хібнасць вымярэнняў якой не перавышае 1%. Выкананы вымярэнні раўнаважнага краявога вугла змочвання бідыстыляванай вадой паверхні канструкцый пакрыццё/крэмній, хром/графіт, у выніку якіх вызначана, што змочвальнасцю паверхні графіту і крэмнію магчыма кіраваць шляхам нанясення пакрыццяў рознай таўшчыні.

Прадэманстравана фізічная мадэль, якая развівае ўяўленне аб уплыве кампазіцыйнага складу і шурпатасці паверхні на ўзаемадзеянне вадкасці з металутрымліваючым пакрыццём.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

THE RESUME

Baraishuk Siargey Mikhailovich

MODIFICATION OF SURFACE PROPERTIES OF GRAPHITE AND SILICON ENHANCED BY ION-ASSISTED DEPOSITION OF METALLIC COATINGS

Keywords: ion-assisted coating, composition of coating, metallic coating, silicon, graphite, wetting angle, roughness, coating thickness, nanohardness.

In this work, the influence of processes of sedimentation of metal including coats based on Ti, Cr, Co, Zr, Mo on silicon and Cr on graphite was determined at ion-assisting in the conditions of self-irradiation, on the topography of a surface of shaping structures a coat/substrate, and an equilibrium wetting angle of wetting, nanohardness.

With application of the Rutherford backscattering of ions of helium and computer modeling of the observational spectra POP by program RUMP, and also resonant kernel response $^{1}H(^{15}N,\alpha\gamma)^{12}C$, at energy of ions of nitrogen 6.4 MeV, the level-by-level composite composition of structures a coat/substrate obtained at the assisted energy from 3 to 7 кeV.

Using the method of atomic-power microscopy the data about roughness of a surface, value of the full and projective surface area, parameters of a surface of silicon and graphite with the superimposed coats are determined; legitimacy of guidance by a roughness of a modified surface of graphite change of a thickness of a coat is determined.

With the help of a nanohardoscope «Fisher H100» ,the nanohardness and Ung modules were measured. The hardness of the coats obtained on silicon is 1.8 – 2.3 times higher than the hardness of initial silicon and is comparable to hardness of diamond-like coats. Reduction of the effective Ung module of all systems a coat/substrate by 20 - 40 % is observed.

For the measuring of an equilibrium wetting angle of wetting, the parameters are created with a measuring uncertainty of less than 1 %. Measuring of an equilibrium wetting angle of wetting by bidistilled water of a surface of constructions a coat/silicon, chrome/graphite, it has been determined that wettability of a surface of graphite and silicon can be driven by coating with a different thickness.

A physical model, which develops representation of the influence of a composite composition and a roughness of a surface on interaction of fluid with metal containing surface is presented.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Подписано в печать 22.04.2010. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.
Дополнительный тираж 30 экз. Заказ 334.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
ЛП № 02330/0494178 от 03.04.2009.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.