

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 538.9:[544:546.28]

**Михалкович
Олег Михайлович**

**Модифицирование структуры и химического состава кремния и
стекла при ионном облучении и ионно-плазменном осаждении
металлических пленок (Ti, Co, Mo)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук
по специальности
01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

Минск – 2022

Научная работа выполнена в УО «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка».

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Гашлыков Игорь Серафимович,

доктор физико-математических наук, профессор.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Лукашевич Михаил Григорьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры полупроводников
и наноэлектроники
Белорусского государственного университета;

Поплавский Василий Владимирович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры физики
УО «Белорусский государственный
технологический университет».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГО «Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению».**

Защита состоится «04» марта 2022 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «__» февраля 2022 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



А.К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

К перспективным методам модифицирования свойств поверхности относится осаждение пленок при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ), т.е. ассистирование осуществляется ионами наносимого элемента. Осаждение металлов методом ОПАСИ позволяет увеличивать твердость поверхности, изменять ее шероховатость и смачиваемость, что представляет интерес при конструировании приборов оптоэлектроники, микроэлектроники, станкостроении. В кремнии, облученном ионами ксенона, наблюдается локальная магнитная упорядоченность, которая в сочетании с нанесением функциональных покрытий методом ОПАСИ может использоваться в микроэлектромеханических системах. При осаждении на кремний пленок переходных металлов, используя метод ОПАСИ, в тонких пленках образуются силициды этих металлов, имеющих широкое применение, что позволяет его использовать для получения таких соединений без использования высоких температур, как, например, при быстром термическом отжиге.

Пленка молибдена, нанесенная на стекло методом ОПАСИ, используется в качестве тыльного контакта в структуре солнечных элементов. Известно, что определение краевого угла смачивания поверхности тыльных контактов и других функциональных слоев изготавливаемых СЭ используется для экспресс-диагностики качества поверхности пленок при последующем нанесении поглощающих слоев, будущих СЭ на промежуточных этапах их изготовления. Полученные научные данные будут способствовать усовершенствованию технологии осаждения тонких пленок электрических контактов фотоэлектронных преобразователей.

Тонкие пленки титана и кобальта, наносимые на монокристаллический кремний в качестве модельных систем, удобно использовать для изучения дефектообразования и диффузионных процессов, сопутствующих осаждению пленок на подложку в условиях радиационного и температурного воздействия на разных этапах изготовления солнечных элементов. Ранее, используя способ ОПАСИ, выполнялись эксперименты по модифицированию свойств поверхности графита, алюминия, сталей, конструкционных и инструментальных сплавов, кремния и эластомеров. Были изучены физические процессы и свойства поверхности поликристаллических и аморфных материалов, модифицированных ионно-плазменной обработкой. Однако, малоизученными остаются процессы дефектообразования, радиационно-стимулированной диффузии, изменения элементного состава в области межфазной границы системы пленка/кремний, формируемой методом ОПАСИ, и влияние на них предварительной имплантации ионов ксенона. Также

недостаточно ясным остается вопрос о локализации внедренных атомов примеси в кремнии.

Управление локализацией атомов металла в кристаллической решетке кремния имеет принципиальное значение. Актуальность определяется тем, что знание распределения атомов примеси по узлам или междоузлиям необходимо при моделировании процессов диффузии, протекающих при изготовлении полупроводниковых приборов. Локализация в кристаллической решетке кремния атомов имплантируемых примесей определяется их взаимодействием с точечными радиационными дефектами. Представляется важным для получения годных изделий иметь сведения о пространственном распределении радиационных дефектов в кремнии и возможностью ими управлять.

Полученные при проведении настоящих исследований научные данные позволяют установить особенности процессов дефектообразования, радиационно-стимулированной диффузии, изменения элементного состава в области межфазной границы пленка/подложка при осаждении металлических пленок на кремний и, следовательно, управлять ими при нанесении пленок, активизируя диффузию атомов пленки в подложку по вакансионному механизму, предварительно облучая кремний ионами ксенона.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тематика диссертационных исследований включена в научный план БГПУ, НИР: “Модифицирование структуры и физико-химические свойства поверхности материалов, изучение механизмов и процессов при ионно-ассистированном осаждении покрытий на подложку из разных материалов” (БГПУ им. М. Танка – № ГР 20064079, 2006 – 2010), “Свойства твердотельных систем, конденсированных в неравновесных условиях” (БГПУ им. М. Танка – № ГР 20115432, 2011 – 2015), НИР “Исследование структуры и свойств тонких пленок полупроводниковых материалов систем PbS и SnS, получаемых методами физического вакуумного напыления” (№ ГР 20111183, 2011–2013; № ГР 20140986, 2014 – 2015) и входит в перечень приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, утвержденный Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190, пункт 8 «Многофункциональные материалы, и технологии».

Диссертационные исследования проводились при поддержке Министерством образования РБ: НИР № 505 “Физико-технологические основы инженерии лиофобности и лиофильности поверхности изделий ионно-

ассистированным газофазным осаждением покрытий” (№ ГР 20041573, 2004 – 2005), также Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, НИР № Ф 06 – 300 «Разработка физических и технологических основ модифицирования поверхности изделий ионно–ассистированным осаждением покрытий в условиях самооблучения (ИАНПУС) 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), НИР №Ф 11м-180 «Влияние ионно-лучевой обработки на нанотвердость и смачиваемость поверхности кремния» (№ ГР 20112860, 2011 –2013) и Государственным комитетом по науке и технологиям, НИР 1.40 «Исследование влияния условия формирования на микроструктуру тонкопленочных медьсодержащих халькогенидных полупроводниковых материалов, используемых для создания солнечных фотопреобразователей» (№ ГР 20161127, 2016 –2018).

Цель и задачи исследования

Целью работы являлось выявление особенностей физических процессов взаимодействия компонентов пленки с подложкой, происходящих при ассистированном собственными ионами осаждении Ti, Co на кремний после облучения его ионами Xe⁺ и определение поверхностных свойств пленок Mo на стекле. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи, решаемые в данной работе:

- формирование систем пленка/подложка при ионно-ассистированном осаждении металлических пленок (Ti, Co, Mo) на кремнии, в том числе облученный ускоренными ионами Xe⁺ (для пленок Ti и Co), и пленок Mo на стекле;
- проведение элементного анализа сформированных систем пленка/подложка;
- построение распределений концентраций радиационных дефектов по глубине в кремнии, облученном ионами ксенона и ассистирующими ионами;
- определение локализации атомов металлов в кристаллической решетке кремния, облученного ионами ксенона и ассистирующими ионами;
- определение влияния радиационных дефектов на процессы диффузии атомов пленки в подложку и атомов подложки в пленку;
- изучение морфологии и смачиваемости водой поверхности систем пленка/подложка и определение влияния предварительного облучения кремния ионами ксенона на морфологию и смачиваемость поверхности сформированных систем;

– развитие методики введения ксенона в кремний в качестве маркера для установления положения исходной поверхности подложки (ПИПП).

В качестве **объектов** исследования были выбраны системы пленка/подложка, сформированные ионно-ассистированным осаждением Ti, Co, Mo пленок на кремниевую подложку, в том числе облученную ускоренными ионами Xe^+ (для пленок Ti и Co) и пленок Mo на стеклянную подложку.

Предметом исследования являются: элементный состав сформированных систем пленка/подложка, дефектообразование в кремнии при осаждении пленок и при облучении ионами ксенона, механизмы взаимной диффузии атомов пленки и атомов подложки на межфазной границе в процессе формирования изучаемых систем, локализация атомов наносимой пленки в кристаллической решетке кремния, а также свойства поверхности (морфология, нанотвердость, гидрофильность) изготовленных систем.

Научная новизна

Впервые установлены особенности повреждения структуры кремния при ионно-ассистированном нанесении титановых и кобальтовых пленок в условиях облучения собственными ионами. Установлено, что при осаждении пленок, ассистированном собственными ионами, происходит снижение на 15 % слоевой концентрации атомов кремния, смещенных из узлов кристаллической решетки при облучении ионами ксенона и расширение профиля дефектов как в глубь подложки на 20 нм, так и к поверхности.

Впервые установлено, что преобладающим механизмом радиационно-стимулированной диффузии атомов металла (Ti и Co) в кремниевую подложку при ОПАСИ является вакансионный.

Определен режим введения ионов Xe^+ энергией 10 кэВ и флюенсом $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при котором влияние ионной имплантации ксенона в кремний на морфологию и смачиваемость дистиллированной водой поверхности систем пленка/подложка, сформированных методом ОПАСИ не существенно.

Впервые определено влияние предварительного облучения кремния ионами ксенона на локализацию в кристаллической решетке кремния атомов металлов (Ti и Co) осаждаемых пленок, заключающееся в уменьшении доли междоузельных атомов металла в решетке кремния с увеличением флюенса ионов ксенона.

Впервые установлено влияние толщины Mo пленки, осажженной на стеклянную подложку, на шероховатость и смачиваемость дистиллированной водой полученных систем пленка/подложка, заключающееся в уменьшении средней арифметической шероховатости пленки (R_a от 2,5 нм до 0,4 нм) и ее

смачиваемости (краевой угол смачивания от 22° до 65°) с ростом толщины (от 20 нм до 50 нм). Уточнено влияние на смачиваемость дистиллированной водой поверхности тонких пленок металла Ti, Co, Mo наносимых на кремний, при ассистировании собственными ионами химического элемента самих пленок.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные особенности повреждения структуры кремния при осаждении металлических пленок Ti и Co, ассистированном собственными ионами, при ускоряющем потенциале 7 кВ, плотности потока ассистирующих ионов $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, заключающиеся в том, что при предварительном облучении Si подложки ионами Xe^+ с энергией 10 – 40 кэВ и флюенсами от 1×10^{14} до $2,7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ происходит уменьшение в 2-2,7 раз концентрации радиационных дефектов, создаваемых в кремнии ассистирующими ионами путем радиационно-ускоренной восходящей диффузии атомов кремния в пленку и диффузии атомов металла в подложку по вакансионному механизму, что может быть использовано в дефектно-примесной полупроводниковой инженерии.

2. Режим введения атомов ксенона в кремниевую подложку в качестве маркера, путем имплантации энергией 10 кэВ и флюенсом $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, позволяющий установить положение межфазной границы в структуре пленка/подложка, формируемых осаждением элементов с атомной массой менее 127 а.е.м., при использовании метода POP с погрешностью в пределах разрешающей способности анализирующей системы, не оказывая влияние на среднюю арифметическую шероховатость (R_a) и смачиваемость тонких слоёв, что может иметь метрологическую значимость при производстве многокомпонентных тонкопленочных изделий.

3. Экспериментально установленные особенности управления морфологией и смачиваемостью дистиллированной водой поверхности тонких пленок металла Ti, Co, Mo, наносимых на подложку (кремний, стекло) при ассистировании собственными ионами, заключающиеся в том, что изменением ускоряющего потенциала от 3 до 10 кВ, толщины осаждаемой пленки от 20 нм до 180 нм обеспечивается получение гидрофильных (краевой угол смачивания от 22°), характеризующихся снижением средней арифметической шероховатости в интервале 2,5 – 0,4 нм и ростом краевого угла в системе Mo/стекло с 22° до 65° поверхностей, что может использоваться для экспресс-диагностики качества поверхности пленок будущих солнечных элементов на промежуточных этапах их изготовления.

Личный вклад соискателя ученой степени

Соискателем были получены системы пленка/подложка осаждением тонких Ti, Co, Mo пленок на кремний и Mo пленки на стекло. Непосредственно выполнены: послойный элементный анализ пленок на кремнии; исследовано дефектообразование в кремнии; определена локализация атомов осаждаемых пленок в кристаллической решетке кремния; получены 2D и 3D топографические снимки поверхности; измерена смачиваемость поверхности дистиллированной водой. Произведено обобщение экспериментальных результатов и их интерпретация. Развита методика введения ускоренных ионов ксенона в кремний в качестве маркера для установления положения исходной поверхности подложки.

Научный руководитель работы доктор физико-математических наук, профессор Ташлыков И. С. поставил цель и задачи проведения исследований, участвовал в обсуждении и интерпретации экспериментальных данных и обосновании моделей и механизмов.

Соавторы работ участвовали в синтезе тонких пленок (Бобрович О.Г), регистрации спектров резерфордского обратного рассеяния (Черныш В.С., Ермаков Ю.А., Барайшук С.М.), проведении исследований методом сканирующей зондовой микроскопии (Туровец А.И., Барайшук С.М.) и наноиндентирования (Барайшук С.М.), обсуждении результатов определения элементного состава (Жуковский П.В., Антонович И.П.).

Остальные соавторы работ занимались изучением вопросов, не затрагивающих тему диссертационной работы.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

XIII Республиканской научной конференции аспирантов, магистров и студентов по физике конденсированного состояния (Гродно, 26-28 апреля 2005); I Международной научно-практической конференции «Оптика неоднородных структур» (Могилев, 2-3 октября 2007); XXXVII – XLV Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 29-31 мая 2007, 27-29 мая 2008, 26-28 мая 2009, 25-27 мая 2010, 31 мая-2 июня 2011, 29-31 мая 2012, 28-30 мая 2013, 27-29 мая 2014, 26-28 мая 2015); V, VI, VIII, IX International Conferences “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” NEET (Zakopane, Poland, 12-15 июня 2007, 23-26 июня 2009, 18-21 июня 2013, 23-26 июня 2015); II – V Международных научных конференциях «Материалы и структуры современной электроники», (Минск, 5-6 октября 2006,

25-26 сентября 2008, 23-24 сентября 2010, 10-11 октября 2012); 7 – 9 Международных конференциях ”Взаимодействие излучений с твёрдым телом ВИТТ – 2007, 2011, 2013” (Минск, 26-28 сентября 2007, 20-22 сентября 2011, 24-27 сентября 2013); Международных конференциях “Актуальные проблемы физики твёрдого тела ФТТ – 2007, 2009, 2011, 2018” (Минск, 23-26 октября 2007, 20-23 октября 2009, 18-21 октября 2011, 24-28 сентября 2018); VII-th International conference on “Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons” (Poland, 16-19 июня 2008); X Международной конференции “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (Минск, 13-16 ноября 2012); Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика А.Н. Севченко (Минск, 27-28 февраля 2013); 2-ой Международной конференции Иран-Беларусь “Современные применения нанотехнологий” (Минск, 6-8 мая 2015).

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на физико-математическом факультете БГПУ (получено 5 актов о внедрении). Также результаты внедрены в технологический процесс для неразрушающего экспресс анализа поверхности на производстве металлоконструкций ООО «Медведев и К» (получено 3 акта о внедрении).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 41 научной работе, в том числе в 7 статьях в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,8 авторского листа), 3 статьях в других научных изданиях, 16 статьях в сборниках материалов научных конференций, 15 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и 1 приложения. Полный объём диссертации 142 страницы, в том числе 48 рисунков занимают 42 страницы, 9 таблиц на 9 страницах и 1 приложение на 16 страницах. Библиографический список содержит 216 наименований (на 22 страницах), включая список публикаций соискателя из 41 наименования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава содержит аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены основные методы ионно-лучевого модифицирования поверхности

твёрдого тела, включая осаждение пленок, ассистированное собственными ионами, влияние данных методов на физические свойства поверхности и приповерхностных слоев. Рассмотрены принципы ионно-ассистированного нанесения пленок в вакууме на изделия, теоретические модели, описывающие процессы, сопровождающие осаждение. Представлены данные экспериментальных и теоретических исследований, выполненных ранее другими учёными, о физико-химических процессах, происходящих в материалах при ионно-лучевом воздействии. Отмечены вопросы, которые остались неразрешёнными. Обосновано использование метода осаждения пленок в условиях ассистирования ионами осаждаемого материала.

Во второй главе описаны объекты исследования, а также использованные при их изучении методы и оборудование.

Пленки Ti, Co, Mo, осаждались на кремний и стекло методом ОПАСИ, используя резонансный вакуумный плазменно-дуговой источник. Ускоряющее напряжение ассистирующих ионов составляло 3, 7, 10 кВ при плотности потока ассистирующих ионов 10^{14} - 10^{15} см⁻²с⁻¹, скорости нанесения пленок 0,5 – 2,0 нм/мин. Вакуум в мишенной камере составлял $\sim 10^{-2}$ Па. В качестве подложек использовали пластины (100) и (111) кремния и стекло фотопластинок, очищенное от эмульсии. Часть пластин кремния предварительно облучалась ионами ксенона с энергией 10, 20 или 40 кэВ интегральным потоком от 1×10^{14} см⁻² до $2,7 \times 10^{15}$ см⁻². Имплантированный в кремний ксенон использовался в качестве маркера для установления ПИПП.

Описываются методы экспериментальных исследований: резерфордовское обратное рассеяние в сочетании с каналированием (РОР/КИ) ионов гелия и компьютерное моделирование, резонансные ядерные реакции (РЯР), атомно-силовая микроскопия (АСМ), а также измерения твёрдости и модуля Юнга при наноиндентировании, методика определения ПИПП путем внедрения в кремний атомов ксенона перед нанесением пленок, методика измерения равновесного краевого угла смачивания (РКУС) с погрешностью $< 1^\circ$.

В третьей главе обсуждаются результаты изучения физико-химических процессов, протекающих при формировании металлосодержащих (Ti, Co) пленок на кремнии, применяя метод ОПАСИ.

Проведённый с применением моделирующей программы RUMP анализ экспериментальных спектров РОР, на примере Co пленки, свидетельствует о наличии в составе нанесённых пленок кроме самих атомов металла, технологических примесей кислорода, углерода, водорода из гидроксильной группы вакуумного масла диффузионного насоса, а также атомов кремния, диффундирующих в пленку из подложки. На рисунке 1 представлено

распределение элементов по глубине в системах Co пленка/Si получаемых при нанесении кобальтовой пленки на кремний без введенного ксенонового маркера и с ним.

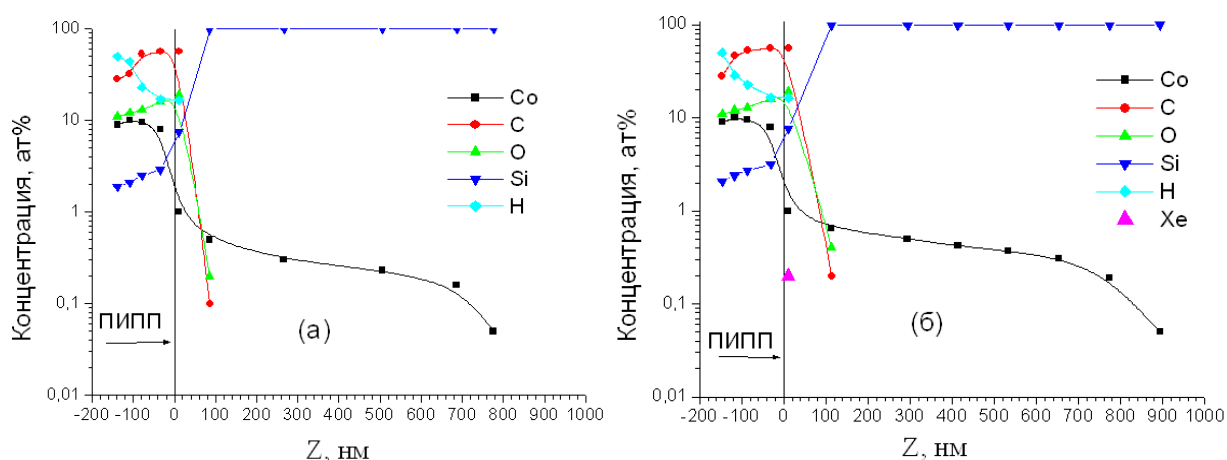


Рисунок 1. – Распределение элементов по глубине в структурах Co пленка/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии с маркером ($E_{Xe}=10$ кэВ, интегральный поток 3×10^{14} Xe/см²)

Из представленных на рисунке 1а кривых следует, что профиль Co характеризуется концентрацией, снижающейся от 9-10 ат % на поверхности до 1 ат % в области ПИПП. При проективном пробеге в кремнии ассистирующих ионов Co^+ , ускоренных в источнике при потенциале 7 кВ, рассчитанного с помощью программы TRIM, который составляет $R_p \pm \Delta R_p = 10,3 \pm 4,3$ нм, атомы Co идентифицируются в кремнии на глубине 780 нм с концентрацией 0,05 ат %. Если в подложку предварительно вводился маркер ксенона, то атомы кобальта проникают в кремний еще глубже (на 120 нм), рисунок 1б. При этом концентрация атомов кобальта на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1,5 раза. Такой эффект проникновения обусловлен радиационно-усиленной диффузией атомов металла в глубь Si по дефектам, созданным ионами Xe^+ . Физические процессы формирования структур Ti, Mo пленка/подложка качественно сопоставимы с процессами, протекающими при нанесении на кремний кобальтовых пленок.

В независимых экспериментах с применением РЯР $^1H(^{15}N, \alpha\gamma)^{12}C$, происходящей при взаимодействии ионов азота с $E=6,4$ МэВ с атомами водорода, было подтверждено присутствие в пленках на кремнии значительных концентраций водорода. Водород содержится только в пленках, не входит в Si, а его концентрация практически одинакова по всей толщине пленки, возрастая до 40 – 60 ат.% на поверхности для Ti пленки и 20 – 40 ат.% для Co. Большое количество водорода в структурах металлсодержащая пленка/кремний находится в составе химических соединений.

Сравнивая осевые и случайные спектры РОР, были определены механизмы диффузии атомов металлов в кремний при формировании структур

пленка/Si, изучены особенности радиационного повреждения структуры кремния, выполнены расчеты, позволившие установить локализацию атомов наносимых пленок в кристаллической структуре Si. На рисунке 2 представлены, необходимые для расчетов, спектры POP и POP/КИ от систем Ti пленка/Si, сформированной на предварительно облученном кремнии.

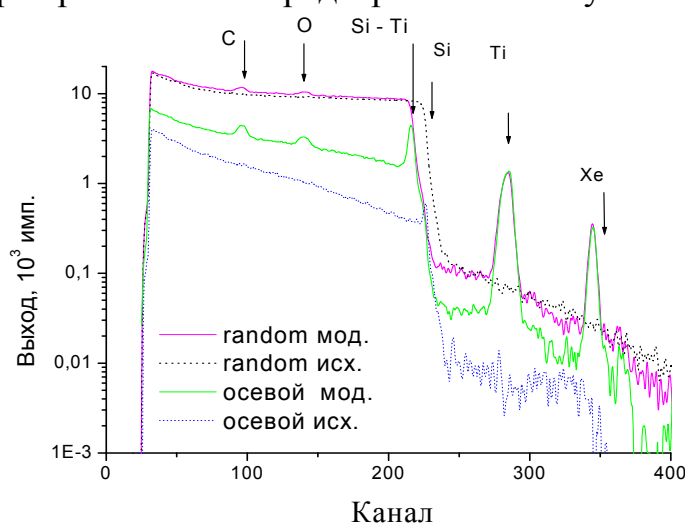


Рисунок 2. - Спектры POP и POP/КИ от структуры Ti – пленка/пластина (100) Si, предварительно облученная ионами Xe^+ с $E = 20$ кэВ и дозой $D=9 \times 10^{14}$ см $^{-2}$, сформированной методом ОПАСИ

Выход обратного рассеяния при каналировании ионов в кристалле, содержащем атомы металла наносимой пленки, увеличивается в области 220-270 каналов, по сравнению с выходом при каналировании от исходного кристалла, что свидетельствует о том, что в междоузлиях решетки кремния располагаются атомы металла пленки. Но он не достигает выхода случайного спектра от модифицированного образца, что указывает на то, что при нанесении пленки кристаллическая структура Si сохраняется и часть атомов титана находится в замещающих положениях. Анализ осевых и случайных спектров, приведенных на рисунке 2, позволяет определить, что большинство (~80%) атомов титана, продифундировавших в кремний, располагаются в узлах решетки Si. Таким образом, вакансионный механизм диффузии атомов металла в глубь Si является преобладающим.

Распределение концентраций по глубине, смещенных в междоузлия атомов Si при облучении ионами Xe^+ и последующем осаждении Ti на кремний, представлено на рисунке 3. Максимум концентрации атомов Si, смещенных из узлов кристаллической решетки при имплантации ионов Xe^+ , уменьшается при последующем нанесении пленок Ti и Co методом ОПАСИ, что обусловлено активацией диффузионных процессов атомов Si в глубь по междоузлиям и к поверхности подложки, что также способствует встречной диффузии атомов

кремния в пленку, с одной стороны, и диффузии атомов компонентов пленок в глубь подложки.

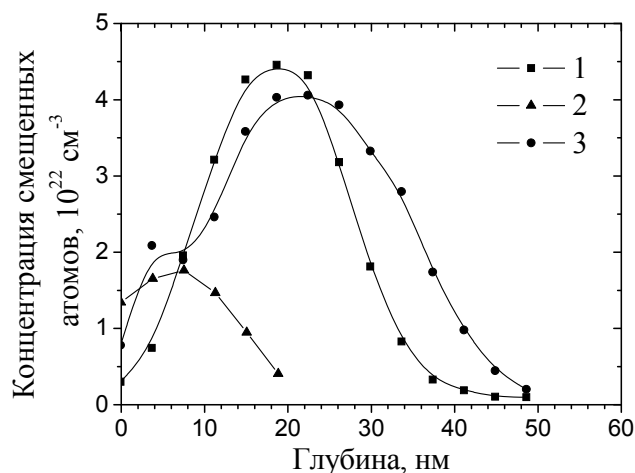


Рисунок 3. - Распределение концентрации дефектов по глубине в кремнии после имплантации ионов Xe^+ с $E = 40 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 27 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1), осаждения Ti на кремний (2), осаждения Ti на предварительно облученный ионами Xe^+ кремний (3)

Анализ распределения атомов кобальта в кремнии, предварительно облученном ионами Xe^+ с энергией 10 кэВ, подтверждает предположение о том, что вакансионный механизм диффузии атомов Co в решетке Si является основным. Предварительное облучение кремния ионами Xe^+ способствует увеличению доли атомов Co в замещающих положениях. Этот эффект имеет выраженную дозовую зависимость, что демонстрирует рисунок 4.

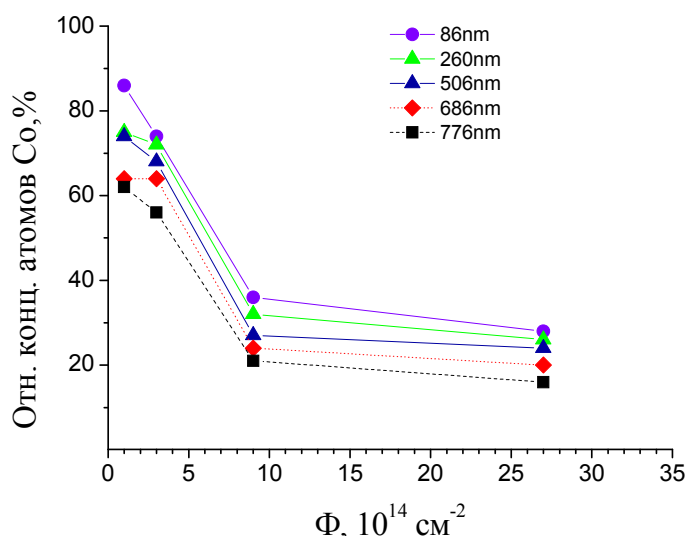


Рисунок 4. - Дозовая зависимость доли атомов кобальта, локализованных в междоузлиях кристаллической решетки кремния на разной глубине, в структурах Co покрытие/ Si , сформированных методом ОПАСИ на кремнии, предварительно облученном ионами Xe с энергией 10 кэВ и дозами в интервале $1 - 27 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$

При облучении кремния ионами ксенона с $E = 10 \text{ кэВ}$, когда доза увеличивается с $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, наблюдается уменьшение доли

междоузельных атомов кобальта с 86 % до 30 % на глубине проникновения 90 нм и с 60 % до 16 % соответственно на глубине 780 нм. Данная зависимость объясняется увеличением доли вакансий и активизацией тем самым процессов массопереноса по вакансионному механизму.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предварительное облучение пластин кремния малыми дозами (10^{14}см^{-2}) ионов Xe^+ с невысокой энергией (10 кВ) является эффективным средством управления процессами массопереноса при нанесении тонких металлических пленок на кремний.

В четвертой главе обсуждаются результаты изучения свойств поверхности модифицированных стекла и кремния, анализируются особенности топографии и смачиваемости дистиллированной водой поверхности подложек (кремния и стекла), модифицированных осаждением пленок Ti, Co, Mo. Приведены результаты анализа композиционного состава молибденовой пленки, осажденной на стекло.

При изучении влияния имплантации ионов Xe^+ на качество поверхности пластин кремния с применением атомно-силового микроскопа, было определено, что качество поверхностей высокое. Для исследования морфологии систем пленка/подложка и исходного кремния, а также определения ее параметров были выбраны площадки размером $5 \times 5 \text{ мкм}^2$. Значение средней арифметической шероховатости (R_a) кремниевых подложек составляет 0,2 нм. Показано, что предварительное экспонирование кремниевой подложки ионами Xe^+ с $E = 10 \text{ кэВ}$ и потоком $1 \cdot 10^{14} \text{ Xe/см}^2$ не изменяет качества поверхности подложки. Значение R_a для Ti пленок, осажденных на кремний методом ОПАСИ, составляет 1,1 нм. Значение средней арифметической шероховатости для Ti пленок, осажденных на кремний предварительно экспонированный ионами Xe^+ с $E = 10 \text{ кэВ}$ и дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ Xe/см}^2$ методом ОПАСИ, также составляет 1,1 нм.

Аналогичная особенность, заключающаяся в том, что предварительное облучение кремния ионами ксенона с $E = 10 \text{ кэВ}$ и дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ Xe/см}^2$ не вызывает существенного изменения морфологии поверхности, также была установлена и для Co пленок. Значение средней арифметической шероховатости для кобальтовых пленок, осажденных на кремний методом ОПАСИ, составляет 0,6 нм.

Для установления влияния облучения подложки кремния на такие свойства поверхности пленок, осажденных методом ОПАСИ, как гидрофобность и гидрофильность проводились измерения значений равновесного краевого угла смачивания дистиллированной водой по методу сидячей капли. Объем капли составлял 9.3 мкл. Время стабилизации капли составляло 60 секунд. Результаты измерений усреднялись по 7 значениям.

Значения равновесного краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности титановых и кобальтовых пленок, осажденных на кремнии методом ОПАСИ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. - Равновесный краевой угол смачивания водой поверхности модифицированного кремния

	Ti пленка						Co пленка					
	Подложка Si без облучения	Подложка Si с облучением					Подложка Si без облучения	Подложка Si с облучением				
		E _{хе} , кэВ	D, 10 ¹⁴ см ⁻²					E _{хе} , кэВ	D, 10 ¹⁴ см ⁻²			
			1	3	9	27			1	3	9	27
РКУС, град.	77,8	10	78,1	78,5	78,3	78,2	60,5	10	59,5	60,0	59,8	59,6
		20	78,2	77,9	78,5	78,1		20	60,1	59,8	59,2	59,6
		40	78,1	78,0	77,9	78,4		40	59,7	59,5	59,2	59,3

Таким образом, изучение поверхности кремния позволяет сделать вывод о том, что облучение кремния ионами ксенона в изученном интервале энергий и потоков позволяет эффективно определять ПИПП и не менять при этом структурных характеристик поверхности пленок.

Для установления воспроизводимости свойств поверхности Mo пленок, сформированных методом ОПАСИ, проводилось осаждение молибдена на стеклянную подложку при различных условиях (ускоряющий потенциал: 5 и 10 кВ, плотность ионного тока: 50-100 мкА/см², время нанесения: 4 и 5 часов). В результате получались пленки толщиной 20-50 нм. В качестве подложки использовали нитриново-кальциевое стекло от фотопластинок СП-1.

С ростом толщины Mo пленки на стеклянной подложке до 50 нм, значения параметров ее поверхности (шероховатости и смачиваемости дистиллированной водой) стремились к соответствующим значениям более толстой (120 нм) Mo пленки, осажденной на кремний, что продемонстрировано в таблице 2.

Таблица 2. - Характеристики топографии и смачиваемости дистиллированной водой поверхности исходного и модифицированного стекла

	Стекло	Стекло с Mo пленкой			Кремний с Mo пленкой Z=120 нм
		Z=20нм	Z=30 нм	Z=50 нм	
R _a , нм	2,54	1,57	0,89	0,42	0,28
РКУС, град	22	44	60,5	65	68

Морфология поверхности молибденовых пленок толщиной 50 нм, осажденных на стекло, качественно подобна морфологии поверхности металлосодержащих пленок Ti, Co, Mo, нанесенных на кремний.

Показано, что процесс формирования Mo пленок проходит в несколько этапов, каждый из которых имеет, соответственно, свои характеристики поверхности: появление кластеров пленки (островков роста), увеличение и слияние кластеров, развитие непрерывной пленки. Изменяя условия нанесения пленки, можно управлять шероховатостью поверхности и ее смачиваемостью (РКУС в пределах от 22° до 65°). На подложке из стекла методом ОПАСИ формируется пленка молибдена с поверхностью высокого качества (Ra 0,4 нм).

С использованием нанотвердомера «Fisher H100» проводились исследования механических свойств поверхности структур Ti, Co пленка/кремний методом наноиндентирования. Твердость поверхностного слоя пленок толщиной 180 нм больше при нанесении Ti в 2 раза и в 2,2 раза при нанесении Co по сравнению с твердостью Si составляющей $16,1 \pm 2,1$ ГПа. Так для титановой пленки усредненное значение нанотвердости составляет $31,3 \pm 15,6$ ГПа, для кобальтовой пленки – $38,7 \pm 18,2$ ГПа. У осажденных пленок Ti и Co наблюдается меньший модуль Юнга в сравнении с этим параметром для чистого кремния ($86,4 \pm 4,6$ ГПа). Так для Ti пленки эффективный модуль Юнга достигает значения в $38,4 \pm 2,7$ ГПа, а для Co пленки – $52,1 \pm 2,7$ ГПа. При увеличении глубины индентирования интегральная нанотвердость системы пленка/подложка приближается к нанотвердости исходного кремния. Факт разброса значений нанотвердости в разных точках поверхности пленок, достигающий 50%, объясняется тем, что пленка имеет значительную неоднородность механических свойств в силу гетерогенности фазового состава, вызванной особенностями, установленного ранее, “островкового” механизма роста пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые установлено, что концентрация радиационных дефектов, создаваемых в кремнии ассистирующими ионами при нанесении пленок Ti, Co, уменьшается в 2-2,7 раза, если кремниевая подложка предварительно облучена ионами Xe^+ энергией 10 кэВ при флюенсе $2,7 \times 10^{15}$ см⁻². Концентрация в максимуме профиля смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов ксенона, уменьшается в процессе ионно-ассистированного осаждения титановых и кобальтовых пленок. Выявленная особенность является

следствием радиационно-ускоренной взаимной диффузии атомов вещества пленки и подложки. Атомы наносимых металлов в приповерхностной области подложки располагаются преимущественно в междоузлиях (на глубине 90 нм Co – 86 %, а Ti – 58%) [1-4, 8, 11-15, 22, 23, 27-32, 36].

2. При сопоставлении осевых и случайных спектров резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия от структур Co/Si и Ti/Si установлено, что диффузия атомов металла в решетку кремния осуществляется по вакансионному механизму. Впервые показано, что при облучении кремния ионами Xe^+ с энергией 10 кэВ в результате увеличения дозы с 1×10^{14} до $2,7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается уменьшение относительной доли междоузельных атомов Co с 86 % до 30 %, а Ti с 58% до 27% на глубине проникновения 90 нм [2, 4, 5, 6, 16-20, 23, 30, 32, 33, 35, 36].

3. Установлено впервые, что предварительное облучение поверхности кремния ионами ксенона при энергии 10 кэВ и дозе 10^{14} см^{-2} приводит с возможной точностью, ограниченной разрешающей способностью анализирующей системы, к идентификации положения межфазной границы в структурах пленка/подложка, формируемых осаждением элементов с атомной массой менее 127 а.е.м. Показано, что предварительное облучение кремния ионами ксенона с дозой 10^{14} см^{-2} и энергией 10 кэВ перед нанесением пленок металлов титана и кобальта не оказывает влияние на среднюю арифметическую шероховатость (R_a) и смачиваемость тонких слоёв [2, 3, 5, 6, 11, 21-24, 37].

4. При измерениях методом “сидячей капли” впервые установлено, что с увеличением толщины от 20 до 50 нм пленки молибдена, наносимой на стекло, происходит увеличение равновесного краевого угла смачивания поверхности пленок водой от 22° до 65° . Показано, что процесс формирования пленок Mo проходит в несколько этапов, каждый из которых имеет, соответственно, свои характеристики поверхности: появление островков роста, увеличение и слияние островков, развитие непрерывной пленки. Параметры морфологии сплошной молибденовой пленки, осажденной на стекло, сопоставимы с соответствующими параметрами пленки Mo, нанесенной на кремний. Изменяя условия осаждения, используемый метод позволяет синтезировать пленки Mo с различной смачиваемостью их поверхности [7, 9, 10, 24-26, 34, 37-41].

5. При формировании пленки молибдена на стекле с использованием потенциала 5,0 либо 10,0 кВ впервые выявлена особенность, заключающаяся в том, что средняя арифметическая шероховатость (R_a) поверхности пленки уменьшается от 2,5 до 0,4 нм с увеличением толщины от 20 до 50 нм. Это позволяет получать поверхность Mo, удовлетворяющую самому высокому классу (14-му качеству) качества обработки поверхности. Установленные

особенности гидрофильности (гидрофобности) пленочных систем на основе молибдена, титана, кобальта на подложках из кремния и стекла, осажденные в условиях ассистирования собственными ионами, позволяют использовать измерение равновесного краевого угла смачивания, как способ оценки толщины, непрерывности и морфологии поверхности покрытий [7, 9, 10, 24-26, 34, 37-41].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для разработки и изготовления новых устройств микроэлектроники и оптоэлектроники на предприятиях и в организациях Республики Беларусь, таких как: ОАО “Интеграл”, ГНПО “Планар”, ОДО “Микротестмашины”, ЗАО “Пеленг”, СООО “Солар групп” и др.

Развита методика определения ПИПП при конструировании систем пленка/подложка введением в кремний низкоэнергетических ионов ксенона в качестве маркера. Рекомендуется использовать методику в лабораториях институтов, университетов, предприятий, в которых занимаются конструированием многослойных систем, формируемых нанесением пленок на подложку, для создания приборов микроэлектроники, используя методы физического вакуумного напыления. Полученные данные о механизме взаимной диффузии в системах пленка/подложка могут использоваться при разработке методик введения ксенона в подложку в технологических целях.

Выявленные особенности смачиваемости пленочных структур на подложках из кремния и стекла позволяет в рамках обратной задачи развить метод выявления характеристик структуры, сплошности, морфологии поверхности по данным равновесного краевого угла смачивания, что, например, используется для экспресс-диагностики качества поверхности пленок будущих солнечных элементов на промежуточных этапах их изготовления.

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на физико-математическом факультете БГПУ (5 актов о внедрении) и могут быть использованы в качестве дидактической базы на кафедрах физики других ВУЗов Республики Беларусь.

Полученные результаты используются в технологическом процессе для неразрушающего экспресс анализа поверхности на этапе обработки металлов и перед нанесением полимерных покрытий на производстве металлоконструкций ООО «Медведев и К», что позволило улучшить износостойкость поверхности полученных изделий до 25% (3 акта о внедрении).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. 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, iss. 9. – P. 637–641.

2. Ташлыков, И. С. Повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном осаждении Ti и Co покрытий / И. С. Ташлыков, О. М. Михалкович // *Физика и химия обработки материалов*. – 2008. – № 5. – С. 45–49.

3. Структура и повреждение кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением тонких пленок / И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович, И. П. Антонович // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2008. – № 3. – P. 112–114.

4. 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.

5. Composition of Co films/Si substrate systems prepared by means of self-ion assisted deposition and accompanying silicon damage / I. Tashlykov, P. Zhukowski, O. Mikhalkovich, Y. Ermakov, V. Chernysh // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2010. – № 7. – P. 122–124.

6. Бобрович, О. Г. Состав и морфология покрытий Ti, W, осажденных на кремний при ионном ассистировании / О. Г. Бобрович, О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // *Физика и химия обработки материалов*. – 2014. – № 1. – С. 31–36. (Bobrovich, O. G. Composition and morphology of Ti and W coatings deposited on silicon during ion-beam assistance / O. G. Bobrovich, O. M. Mikhalkovich, I. S. Tashlykov // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2015. – Vol. 6, № 3. – P. 229–233.).

7. Математическое определение краевого угла смачивания твердых тел водой методом моделирования контура капли, касательных к ней, поверхности и контактных углов / С. М. Барайшук, Х. Л. Хуан, О. М. Михалкович, О. Г. Бобрович // *Весці Беларус. дзярж. пед. ун-та. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка*. – 2017. – № 2. – С. 5–11.

Статьи в других научных журналах

8. Бобрович, О. Г. Повреждение структуры кремния при ионно-ассистированном осаждении металлосодержащего покрытия в условиях самооблучения / О. Г. Бобрович, И. С. Ташлыков, О. М. Михалкович // Труды Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 6, Физ.-мат. науки и информатика. – 2006. – № 14. – С. 82–84.

9. Surface properties of Me/Si structures prepared by means of self-ion assisted deposition / I. Tashlykov, P. Zhukowski, O. Mikhalkovich, S. Baraishuk // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 125, № 6. – P. 1306–1308.

10. Tashlykov, I. Analysis of composition, morphology and wettability of Mo thin layers deposited on glass / I. Tashlykov, P. Zhukowski, O. Mikhalkovich // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – № 11. – P. 229–231.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

11. 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. науч. тр. II Междунар. конф., Минск, 5–6 окт. 2006 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2006. – С. 20–25.

12. 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. 2007 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2007. – С. 335–337.

13. Ташлыков, И. С. Дефектообразование в кремнии при ионно-ассистированном нанесении тонких пленок / И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 23–26 окт. 2007 г. : в 3 т. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению ; редкол.: Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 3. – С. 80–82.

14. Ташлыков, И. С. Повреждение структуры кремния при нанесении тонких пленок методом ИАНПУС / И. С. Ташлыков, О. М. Михалкович // Оптика неоднородных структур – 2007 : материалы междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 2–3 окт. 2007 г. / Могилевский гос. ун-т имени А.А. Кулешова. – Могилев, 2007. – С. 3–6.

15. Дефектообразование в кремнии при нанесении металлопокрытий в условиях ионного ассистирования / О.М. Михалкович, И.С. Ташлыков // *Материалы и структуры современной электроники: сб. трудов III междунар. конф.* Минск, 25-26 сентября 2008 г. / Белорус. гос. ун-т., Мин. обр. РБ, Белорус. фонд фонд. иссл.; редкол.: В.Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2008, – С. 136–140.

16. Туровец, А. И. Элементарный состав, топография и смачиваемость поверхности графита и кремния, облученных ионами ксенона / А. И. Туровец, О.М. Михалкович, И. С. Ташлыков // *Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар науч. конф., Минск, 20–23 окт. 2009 г. : в 3 т. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению ; редкол.: Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 3. – С. 68–70.*

17. Михалкович, О. М. Влияние облучения ионами Xe^+ на диффузионные процессы в кремнии при ионно-ассистированном осаждении покрытий / О.М. Михалкович, И. С. Ташлыков // *Материалы и структуры современной электроники : сб. тр. IV Междунар. науч. конф., Минск, 23–24 сент. 2010 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 175–178.*

18. Михалкович, О. М. Массоперенос в Si при нанесении Ti тонких пленок, ассистированном собственными ионами / О. М. Михалкович, В. Е. Гусаков, И. С. Ташлыков // *Взаимодействие излучения с твёрдым телом : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сент. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2011. – С. 147–149.*

19. Михалкович, О. М. Влияние радиационных дефектов на массоперенос в системе Ti пленка/ Si подложка, формируемой методом ОПАСИ / О. М. Михалкович, В. Е. Гусаков, И. С. Ташлыков // *Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар науч. конф., Минск, 18–21 окт. 2011 г. : в 3 т. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению ; редкол.: Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 252–254*

20. Михалкович, О. М. Нанотвердость пленок и диффузия атомов Ti и Co в кремнии, модифицированном ионно-ассистированном осаждением покрытий в сочетании с облучением ионами Xe / О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук // *Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. трудов V Междунар. науч. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В.Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 54–56.*

21. Михалкович, О. М. Структура и свойства систем титановое покрытие/кремний, полученных осаждением титана на кремний в условиях облучения собственными ионами / О. М. Михалкович, С. М. Барайшук, И. С. Ташлыков // *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сб. докл. X междунар. конф., Минск, 13–16 нояб. 2012 г.*

/ Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Чижик [и др.]. – Минск, 2012. – С. 149–155.

22. Михалкович, О. М. Диффузионные процессы в кремнии, модифицированном осаждением Со покрытий в сочетании с облучением ионами Хе⁺ / О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы второй Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 февр. 2013 г. / НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред.), Ю. И. Дудчик. – Минск, 2013. – С. 228–230.

23. Михалкович, О. М. Композиционный состав и свойства поверхности систем Me/Si, получаемых осаждением тонких пленок Ti и Со при ассистировании собственными ионами / О. М. Михалкович, С. М. Барайшук, И. С. Ташлыков // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 10-й Междунар. конф., Минск, 24–27 сент. 2013 г. / Белорус. гос. ун-т. ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 317–319.

24. Mikhalkovich, O. Composition and wettability of Ti, Co and Mo nanodimension films surfaces produced on Si and glass by means of self-ion asisted deposition / O. Mikhalkovich, I. Tashlykov // Modern applications of nanotechnology : proc. of the 2nd Iran-Belarus Intern. conf., Minsk, 6–8 May 2015 / Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus ; ed. S. A. Chizhik [et. al.]. – Minsk, 2015. – Art. D036.

25. Свойства поверхности тыльных контактов для солнечных элементов на основе Al, модифицированного осаждением Мо в условиях ионного ассистирования / О. Г. Бобрович, С. М. Барайшук, А. И. Туровец, О. М. Михалкович // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24–28 сент. 2018 г. : в 3 т. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению ; редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 183–185.

26. Михалкович, О.М. Состав и свойства поверхности молибденовой пленки, сформированной на стекле методом ОПАСИ / О. М. Михалкович, В. С. Куликаускас, С. М. Барайшук // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 19-20 декабря 2019 г. / Белорус. гос. аграрно-технический ун-т. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 282-284.

Тезисы

27. Барайшук, С. М. Состав поверхности кремния с покрытиями, нанесенными в условиях ионного ассистирования / С. М. Барайшук,

О. М. Михалкович // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XIII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 26–28 апр. 2005 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы. – Гродно, 2005. – С. 273–276.

28. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном нанесении тонких плёнок. / И. С. Ташлыков, О. М. Бобрович, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович, И. П. Антонович // Тезисы докладов XXXVII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 29–31 мая 2007 г. / МГУ ; под ред. А. Ф. Тулинова. – М., 2007. – С. 120.

29. Structure and damage of silicon modified by means of thin films ion assisted deposition / I. S. Tashlykov, S. M. Baraishuk, O. M. Mikhalkovich, I. P. Antonovich // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 5-th Intern. conf., Zakopane, June 12–15 2007. / Lublin University of Technology ; ed.: T.N. Koltunowicz. – Lublin, 2007. – P. 79.

30. Михалкович, О. М. Повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном осаждении Ti и Co покрытий / О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // Тезисы докладов XXXVIII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2008 г. / МГУ ; под ред. А. Ф. Тулинова. – М., 2008. – С. 146.

31. Silicon damage and composition of Co films prepared by means of self-ion assisted deposition / I. S. Tashlykov, S. M. Baraishuk, O. M. Mikhalkovich, P. V. Zukowski // VII-th International Conference “Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons” : June 16–19, 2008, Kazimierz Dolny / Maria Curie-Sklodowska University ; ed.: J. Żuk, J. Filiks. – Lublin, 2008. – P. 163.

32. Влияние дозы ускоренных ионов Xe^+ на повреждение кремния при ионно-ассистированном нанесении Ti покрытий / И. С. Ташлыков, О. М. Михалкович, И. П. Антонович, А. И. Туровец, Ю. А. Ермаков, В. С. Черныш // Тезисы докладов XXXIX международной конференции по физике взаимодействия зараженных частиц с кристаллами, Москва, 26–28 мая 2009 г. / МГУ ; под ред. А. Ф. Тулинова. – М., 2009. – С. 127.

33. Composition and structure of Co films/Si substrate systems prepared by means of self-ion assisted deposition and accompanying silicon damage / I. S. Tashlykov, P. V. Zukowski, O. M. Mikhalkovich, Yu. A. Ermakov, V. S. Chernysh // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 6-th Intern. conf., Zakopane, June 23–26, 2009. / Lublin University of Technology ; ed.: T.N. Koltunowicz. – Lublin, 2009. – P. 72.

34. Влияние облучения кремния ионами Xe^+ на повреждение его структуры, морфологию и смачиваемость нанесенных на него Ti и Co покрытий / О. М. Михалкович, А. И. Туровец, И. С. Ташлыков, Ю. А. Ермаков,

В. С. Черныш // Тезисы докладов XL международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 25–27 мая 2010 г. / МГУ ; под ред. А. Ф. Тулинова. – М., 2010. – С. 177.

35. Михалкович, О. М. Массоперенос в кремнии элементов Со покрытия, нанесенного при ассистировании собственными ионами / О. М. Михалкович, В. Е. Гусаков, И. С. Ташлыков // Тезисы докладов XLI международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 2011 г. / МГУ ; под ред. А. Ф. Тулинова. – М., 2011. – С. 147.

36. Михалкович, О. М. Локализация атомов Со в облученном ионами кремнии при ионно-ассистированном нанесении на него тонких Со пленок / О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // Тезисы докладов XLII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 29–31 мая 2012 г. / МГУ ; под ред. М. И. Панасюка. – М., 2012. – С. 137.

37. Бобрович, О. Г. Состав и морфология покрытий (Ti, W), осажденных на кремний при ионном ассистировании / О. Г. Бобрович, О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // Тезисы докладов XLIII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 28–30 мая 2013 г. / МГУ ; под ред. М. И. Панасюка. – М., 2013. – С. 106.

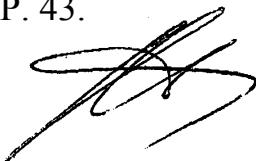
38. Surface properties of Me/Si structures prepared by means of self-ion assisted deposition / I. S. Tashlykov, P. Zhukowski, S. M. Baraishuk, O. M. Mikhalkovich // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implamantation : 8-th Intern. conf., Zakopane, June 18–21, 2013. / Lublin University of Technology ; ed.:T.N. Koltunowicz.– Lublin, 2013. – P. 73.

39. Композиционный состав поверхности тыльного контакта солнечных элементов, нанесенных на стеклянную подложку / О. М. Михалкович, О. Г. Бобрович, С. М. Барайшук, В. С. Куликаускас, А. И. Туровец, И. С. Ташлыков // Тезисы докладов XLIV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2014 г. / МГУ ; под ред. М. И. Панасюка. – М., 2014. – С. 118.

40. Элементный послойный анализ и свойства поверхности структур Мо пленка/стеклянная подложка, формируемых при ассистировании собственными ионами / О. М. Михалкович, О. Г. Бобрович, И. С. Ташлыков, В. С. Куликаускас // Тезисы докладов XLV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами,

Москва, 26–28 мая 2015 г. / МГУ ; под ред. М. И. Панасюка. – М., 2015. – С. 115.

41. Tashlykov, I. Analysis of composition, morphology and wettability of Mo thin layers deposited on glass / I. Tashlykov, O. Mikhalkovich, P. Zhukowski // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 9th Intern. conf., Zakopane, June 23–26, 2015. / Lublin University of Technology ; ed.:T.N. Koltunowicz.– Lublin, 2015. – P. 43.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke at the bottom.

РЕЗЮМЕ

Михалкович Олег Михайлович

Модифицирование структуры и химического состава кремния и стекла при ионном облучении и ионно-плазменном осаждении металлических пленок (Ti, Co, Mo)

Ключевые слова: ассистированное собственными ионами осаждение покрытий, кремний, радиационные дефекты, диффузия, локализация атомов, облучение ионами ксенона, гидрофильность, шероховатость, стекло.

Цель работы: выявление особенностей физических процессов взаимодействия компонентов пленки с подложкой, происходящих при ассистированном собственными ионами осаждении Ti, Co на кремний после облучения его ионами Xe⁺ и определение поверхностных свойств пленок Mo на стекле.

Методы исследования и использованная аппаратура: резерфордовское обратное рассеяние в сочетании с каналированием ионов гелия, компьютерное моделирование, резонансная ядерная реакция ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$, метод наноиндентирования, атомно-силовая микроскопия, метод “сидячей капли” определения равновесного краевого угла смачивания.

Полученные результаты и их новизна: установлены особенности повреждения структуры кремния при осаждении металлсодержащих пленок Ti и Co, ассистированном собственными ионами, при ускоряющем потенциале 7 кВ, плотности потока ассистирующих ионов $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Определена локализация в кристаллической решетке кремния атомов металлов (Ti и Co), осаждаемых при ассистировании собственными ионами пленок, и установлено влияние предварительного облучения кремния ионами ксенона на локализацию атомов осаждаемых металлов. Определено влияние предварительного облучения поверхности кремния ионами ксенона при энергии 10 кэВ и дозе 10^{14} см^{-2} на шероховатость и гидрофильность поверхности полученных титановых и кобальтовых пленок. Определено влияние толщины Mo пленки, осаждаемой на стеклянную подложку при ассистировании собственными ионами, на шероховатость и смачиваемость дистиллированной водой.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты работы могут быть использованы для конструирования многослойных систем микроэлектроники и оптоэлектроники, таких как фотоэлектрические преобразователи, а также для экспресс-диагностики качества поверхности пленок будущих солнечных элементов.

РЭЗІЮМЭ

Міхалковіч Алег Міхайлавіч

Мадэфікаванне структуры і хімічнага складу кремнію і шкла пры іённым апраменьванні і іённа-плазменным асаджэнні металічных пленак (Ti, Co, Mo)

Ключавыя словы: асістыраваннае ўласнымі іёнамі асаджэнне пакрыццяў, крэмній, радыяцыйныя дэфекты, дыфузія, лакалізацыя атамаў, апраменьванне іёнамі ксенона, гідрафільнасць, шурпатасць, шкло.

Мэта работы: выяўленне асаблівасцей фізічных працэсаў узаемадзеяння кампанентаў плёнка з матэрыялам, што праходзяць пры асістыраваным уласнымі іёнамі асаджэнні Ti, Co на крэмній пасля апраменьвання яго іёнамі Xe^+ і вызначэння паверхневых уласцівасцей пленак Mo на шкле.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: рэзерфордаўскае адваротнае расейванне ў спалучэнні з каналіраваннем іёнаў гелію, камп'ютарнае мадэляванне, рэзанансная ядзерная рэакцыя $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$, метады нанаіндэнціравання, атамна-сілавая мікраскапія, метады “сідзячай кроплі” вызначэння раўнаважнага краявога вугла змочвання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлены асаблівасці пашкоджання структуры кремнію пры асаджэнні металутрымліваючых плёнак Ti і Co, асістыраваным уласнымі іёнамі, пры паскараючым патэнцыяле 7 кВ, шчыльнасці патоку асістыруючых іёнаў $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Вызначана лакалізацыя ў крышталічнай рашотцы кремнію атамаў металаў (Ti і Co), асаджаемых пры асістыраванні ўласнымі іёнамі плёнак, і ўстаноўлены ўплыў папярэдняга апраменьвання кремнію іёнамі ксенона на лакалізацыю атамаў асаджаемых металаў. Вызначаны ўплыў папярэдняга апраменьвання паверхні кремнію іёнамі ксенона пры энергіі 10 кэВ і дозе 10^{14} см^{-2} на шурпатасць і гідрафільнасць паверхні атрыманых цитанавых і кобальтавых пленак. Вызначаны ўплыў таўшчыні Mo плёнка, асаджанай на шкляны матэрыял пры асістыраванні ўласнымі іёнамі, на шурпатасць і змочванне дысціліраванай вадой.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна ўжывання: рэзультаты работы могуць быць выкарыстаны для канструявання шматслойных сістэм мікраэлектронікі і оптаэлектронікі, такіх як фотаэлектрычныя пераўтваральнікі, а таксама для экспрэс-дыягностыкі якасці паверхні пленак будучых сонечных элементаў.

SUMMARY

Mikhalkovich Aleh Mikhailovich

Modification of the structure and chemical composition of silicon and glass with ion irradiation and ion-plasma deposition of metal films (Ti, Co, Mo)

Keywords: self-ion assisted deposition of coatings, silicon, radiation defects, diffusion, localization of atoms, irradiation with xenon ions, hydrophilicity, roughness, glass.

Aim of the work: revealing the features of the physical processes of interaction of the film components with the substrate at the self-ion assisted deposition of Ti, Co on silicon after Xe^+ ion irradiation and determining the surface properties of Mo films on glass.

Research method: Rutherford backscattering/Channeling Spectroscopy, computer modeling, resonance nuclear reaction $^1\text{H}(^{15}\text{N},\alpha\gamma)^{12}\text{C}$, nanoindentation method, atomic force microscope-based method, “sessile drop” method for determining the equilibrium contact angle

Obtained result and novelty: the features of damage to the structure of silicon under the self-ion assisted deposition of metal-containing Ti and Co films, at an accelerating potential of 7 kV, a flux density of assisting ions of 10^{14} – 10^{15} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ have been obtained.

In the silicon crystal lattice, the localization of metal atoms (Ti and Co), deposited by self-ions of the films have been determined. Effect of preliminary irradiation of silicon by xenon ions on the localization of atoms of depositing metals has been established.

The effect of preliminary irradiation of the silicon surface by xenon ions at energy of 10 keV and dose of 10^{14} cm^{-2} on the surface roughness and hydrophilicity of the obtained titanium and cobalt films has been determined.

The effect of Mo film thickness, deposited on a glass substrate at self-ions assisting, on the roughness and wettability by distilled water has been established.

Recommendation for use and area of application: the obtained results can be used for designing microelectronics and optoelectronics multilayer systems such as photovoltaic converters and for express diagnostics of the surface quality of films of future solar cells films.

