

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 539.216.2:539.12.043(043.3)+  
544.2-126(043.3)

**НАЖИМ  
ФИРАС А.**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПЛЕНОК ПОЛИИМИДА, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ  
 $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$**

**Автореферат**

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

Минск, 2012

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель – **Лукашевич Михаил Григорьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, доцент кафедры физики  
полупроводников и наноэлектроники  
физического факультета Белорусского  
государственного университета.

Официальные оппоненты: **Углов Владимир Васильевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры физики  
твердого тела физического факультета  
Белорусского государственного  
университета;

**Почтенный Артем Евгеньевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, доцент кафедры физики учреждения  
образования “Белорусский государственный  
технологический университет”.

Оппонирующая организация – Белорусский национальный технический  
университет.

Защита состоится 01 июня 2012 г. 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; телефон ученого секретаря (017) 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке  
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 28 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор физико-математических наук  
профессор

А.К. Федотов

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается все больший интерес к синтезу и изучению всего комплекса структурных, электрических и оптических свойств металлополимерных композиционных материалов вследствие их поистине уникальных свойств из-за проявления в них как классических, так и квантовых размерных эффектов, которые на макроскопическом уровне позволяют глубже продвинуться в понимании электронных состояний и процессов в таких системах. С другой стороны, такие системы имеют огромные потенциальные возможности их практического применения из-за наличия у них уникальных сенсорных, каталитических, электропроводящих, магнитных, нелинейно-оптических и целого ряда других свойств, среди которых необходимо подчеркнуть биосовместимость.

Ионная имплантация (ИИ), являющаяся одним из универсальных способов изменения физических свойств приповерхностных слоев практически любых твердых тел. Она выгодно отличается совместимостью с технологическими процессами современной микро- и нанoeлектроники, возможностью формирования “скрытых” заглубленных слоев с заранее заданными свойствами под поверхностью мишени и неомогенных структур с различным фактором заполнения.

Выполненные в последние годы исследования позволили в значительной степени продвинуться в понимании процессов, происходящих в полимерных материалах при бомбардировке последних различными ионами в широком интервале энергий, доз и плотностей ионного тока. Так в настоящее время считается общепризнанным, что улучшение механических характеристик модифицированных имплантацией полимеров в основном определяется армирующим действием образующихся при имплантации углеродсодержащих частиц.

Наблюдаемые при имплантации огромные изменения проводимости и переход диэлектрик-металл также обусловлены не ионным легированием, а образованием углеродсодержащих структур в модифицированном имплантацией приповерхностном слое, на которое в случае имплантации ионов металлов накладывается зарождение металлических включений, их рост и агломерация.

Несмотря на то, что коэффициент преломления приповерхностного модифицированного имплантацией слоя может значительно увеличиваться, тем не менее, основным направлением исследований оптики композиционных материалов является поиск сред, обладающих выраженными нелинейно-оптическими характеристиками, которые могут обуславливаться делокализованными  $\pi$ -электронами. Наличие  $\pi$ -электронных связей в исходной

структуре полимерной матрицы, ее модификация в процессе ионно-лучевой обработки, а также формирование металлических наночастиц, в которых возможно проявление поверхностного плазменного резонанса в широком диапазоне длин волн, позволяет отнести сформированные ионной имплантацией в полимерной матрице структуры непосредственно к системам у которых наблюдается делокализация электронов. Особый интерес представляет имплантация ионов переходных металлов в полимер в результате которой возможно формирование как магнитных, так и немагнитных наночастиц, находящихся в суперпарамагнитном или ферромагнитном режимах, что позволяет исследовать спиновую зависимость электронных состояний и процессов туннелирования и рассеяния, создавать гибкие проводящие и изолирующие среды с магнитным упорядочением, представляющие огромный интерес для создания устройств записи, хранения и считывания информации со сверхвысокой плотностью в том числе и на основе магнитооптических эффектов.

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что получение наноструктурированных композиционных материалов методом ИИ, изучение их структурных, электрических, гальваномагнитных и оптических характеристик является актуальным как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета. Тема работы соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 15 мая 2005 г., в частности пунктам 3.3 “структура и свойства кристаллических и неупорядоченных систем, научные основы создания новых магнитных, сегнетоэлектрических, полупроводниковых, сверхпроводящих, квантово-электронных и сверхтвердых материалов”, 7.3 “физические и химические процессы в полупроводниках, тонких слоях и пленках твердого тела и на границе раздела фаз”, 7.6 “оптические, электронные приборы и оборудование, включая лазерно-оптическое оборудование и технологии, аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации; опто-, микро- и наноэлектронные системы и устройства”.

Результаты исследований, представленных в диссертации, были выполнены в рамках НИР государственной комплексной программы научных исследований “Электроника” (2006 – 2010 гг.) проект № 698/06 “Разработать

функциональные элементы микро- и наноэлектроники на основе композиционных материалов металл (полупроводник)–полимер (стекло)” № гос. рег. 20062735, а также Гранта Белорусского государственного университета «Оптические и магнитные характеристики нанокластеров магнитных и немагнитных металлов сформированных в полиимиде методом ионной имплантации » (Приказ о конкурсе грантов № 1203 – ПС от 16.12.2010).

### **Цель и задачи исследования**

Основная цель работы заключалась в установлении закономерностей изменения морфологии, микротвердости, электронно- и магнитотранспортных, а также оптических характеристик пленок полиимида, имплантированных ионами переходных металлов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Установить основные закономерности изменения структуры, морфологии и микротвердости модифицированных пленок полиимида.
2. Изучить температурные зависимости проводимости имплантированных пленок и установить механизмы переноса носителей заряда, а также определить пороговые режимы имплантации ионов металлов для достижения перехода диэлектрик–металл.
3. Установить особенности туннелирования и рассеяния носителей заряда во внешнем магнитном поле при наличии в диэлектрической пленке полимерной матрицы магнитных включений, которые могут находиться в суперпарамагнитном и ферромагнитном режимах, а также немагнитных наночастиц.
4. Установить основные закономерности изменения оптических характеристик пленок полиимида (отражение, пропускание и экстинкция), содержащих включения наночастиц серебра, сформированных ионной имплантацией.

В качестве объекта исследований были выбраны пленки полиимида (ПИ)  $(C_{22}H_{10}N_2O_5)_n$  толщиной 40 мкм, которые имплантировались ионами магнитных металлов:

- кобальта ( $Co^+$ ) с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = 4, 8 \text{ и } 12 \text{ мкА/см}^2$ ;
- никеля ( $Ni^+$ ) с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = 4, 8 \text{ и } 12 \text{ мкА/см}^2$ , а также немагнитных металлов;
- меди ( $Cu^+$ ) с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = 4, 8 \text{ и } 12 \text{ мкА/см}^2$ ;
- серебра ( $Ag^+$ ) с энергией 30 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = 4 \text{ и } 8 \text{ мкА/см}^2$ .

Выбор полиимида в первую очередь обусловлен его высокими эксплуатационными характеристиками такими как: высокую термическую стабильность, высокие механические свойства, высокую химическую стойкость и высокие изоляционные характеристики.

Выбор имплантируемых ионов и режимов имплантации (энергия и плотность ионного тока) обусловлен созданием тонких приповерхностных слоев с разной величиной проводимости на диэлектрической и металлической сторонах перехода диэлектрик-металл, содержащих включения как немагнитных, так и магнитных наночастиц в суперпарамагнитном и ферромагнитном режимах и возможностью варьирования размерами синтезируемых наночастиц.

Предметом исследований явились закономерности изменения морфологии, прочностных характеристик, а также электрических, гальваномагнитных и оптических характеристик пленок полиимида при их модификации имплантацией ионов переходных металлов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Установленные закономерности изменения морфологии и микротвердости пленок полиимида, имплантированных ионами серебра с энергией 30 кэВ и никеля 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $4 \text{ мкА/см}^2$ , заключающиеся в увеличении шероховатости до 3,5 нм, микротвердости до 0,46 ГПа и до 12 нм и 0,36 ГПа при имплантации ионов серебра и никеля соответственно, что обусловлено выходом легколетучих газообразных компонент при деструкции полимера в процессе имплантации, формированием не только углеродных, но и металлических включений в приповерхностном слое, что обеспечивает износостойкость созданного металлополимерного композита.

2. Совокупность экспериментальных результатов исследования электрических и гальваномагнитных свойств пленок полиимида, имплантированных ионами меди и кобальта с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока от 4 до 12 мкА/см<sup>2</sup>, на основании которых:

- разработана феноменологическая модель проводимости модифицированного имплантацией ионов меди слоя полиимида, основанная на туннелировании  $\pi$ -электронов и отличающаяся учетом блокировки  $\pi$ -электронов графитоподобных кластеров атомами меди, встраивающимися между плоскостями графита, которая объясняет отсутствие при данных режимах имплантации ионов меди перехода диэлектрик-металл по сравнению с имплантацией ионов кобальта;

- предложен механизм отрицательного магниторезистивного эффекта с немонотонной зависимостью от магнитного поля в полиимиде, имплантированном ионами кобальта, учитывающий спиновую зависимость электронных процессов переноса и отличающийся учетом движения доменных стенок при намагничивании металлополимерного композита с магнитным упорядочением, что может найти применение при разработке датчиков магнитного поля и спинтронных устройств записи и хранения информации.

3. Установленные закономерности отражения и экстинкции пленок полиимида, имплантированных ионами серебра с энергией 30 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока 4 и 8 мкА/см<sup>2</sup>, в диапазоне длин волн 200–1100 нм заключающиеся в:

- обнаружении поверхностного плазменного резонанса на сформированных имплантацией в полиимиде наночастицах серебра;
- увеличении коэффициента отражения модифицированных пленок в ультрафиолетовой области спектра (полосы с максимумами  $\lambda_1 = 210 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2 = 254 \text{ нм}$  и  $\lambda_3 = 311 \text{ нм}$ ) при падении света на неимплантированную поверхность, обусловленном модификацией пленки за пределами пробега ионов;
- большей величине экстинкции при падении света на неимплантированную поверхность по сравнению с имплантированной, обусловленной разной интенсивностью входящего с разных сторон в многослойную структуру света и многократным отражением на границе раздела модифицированный слой-пленка, что обеспечивает использование созданных металлополимерных композиционных материалов в оптоэлектронике.

### **Личный вклад соискателя**

Экспериментальные исследования структурных, электронно-транспортных и оптических характеристик полиимида, имплантированного ионами переходных металлов, обработка результатов и формулирование выводов были проделаны соискателем. Диссертационная работа выполнена под руководством кандидата физико-математических наук, доцента Лукашевича Михаила Григорьевича, сформулировавшего цель и задачи исследований, принимавшего участие в обсуждении результатов и решавшего организационные вопросы проведения исследований в центре структурных исследований БГУ. Соавторы работ Базаров В.В., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. проводили имплантацию, Хайбуллин Р.И., Бринкевич Д.И., Бумай Ю.А., Долгих Н.И., Вабищевич С.А., Оджаев В.Б. принимали участие в обсуждении результатов. Помощь в приготовлении образцов, проведении измерений и обработке результатов оказывали аспиранты Волобуев В.С, Харченко А.А.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- III Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». г. Минск, 2008 г.
- XVII Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» г. Гродно, 2009 г.
- 8-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» г. Минск, 2009 г.
- Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». г. Минск, 2009 г.
- XVIII Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» г. Гродно, 2010 г.
- IV Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». г. Минск, 2010 г.

Результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета (2010, 2011 и 2012 гг.)

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных работах, в числе которых 6 статей в научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,67 авторских листа), 6 статей в сборниках трудов конференций, 4 тезисов докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 104 страницы; работа содержит 34 рисунка на 29 страницах; 2 таблицы на 1 странице; 1 приложение на 4 страницах. Библиографический список на 11 страницах состоит из 133 наименований, включая собственные публикации автора.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

**В главе 1** проведен анализ литературных данных, посвященных изучению структуры, электронно-транспортных и оптических свойств ряда полимеров, модифицированных ИИ в широком интервале энергий и режимов имплантации. Так обработка поверхности твердых тел ионным пучком приводит к изменению как морфологии, так и прочностных характеристик



приповерхностных слоев, которое в случае полимерных материалов обычно связывается с карбонизацией приповерхностного слоя. Однако сведений о таких изменениях при имплантации пленок ПИ ионами переходных металлов с энергиями до 100 кэВ высокими дозами, когда наряду с процессами карбонизации следует ожидать формирования металлических включений не имеется. Несмотря на то, что электрические характеристики пленок ПИ, имплантированных ионами кобальта, исследованы достаточно полно, тем не менее, такие исследования не проведены для случая имплантации ионов металлов не обладающих магнетизмом. Сравнение этих результатов позволит выявить роль спиновой составляющей в процессах электронного транспорта и влияние магнетизма формирующихся при имплантации металлических включений на их морфологию, а также оценить химическое влияние внедряемых ионов на электрофизические характеристики формируемых металлополимерных композиционных материалов. Отсутствуют данные по гальваномагнитным явлениям в полиимиде, имплантированном ионами магнитных металлов, а также не проведено сравнение со случаем наличия немагнитных металлических включений с разными режимами переноса электронов. Основные экспериментальные исследования по синтезу наночастиц серебра ИИ и изучению их оптических характеристик проведены при имплантации ионов в стекло. Однако сведений о формировании нанокластеров серебра при ионной имплантации в пленки полиимида и их оптических характеристиках при падении света на имплантируемую и неимплантированную поверхности не найдено.

Все это потребовало проведения комплексного исследования структурных, электронно-транспортных, магнитотранспортных и оптических характеристик пленок полиимида, имплантированных ионами металлов как обладающих, так и не обладающих магнитными свойствами.

**В главе 2** обосновывается выбор ионов для имплантации, который определялся близостью по массе и наличием или отсутствием магнетизма; энергии имплантации – величиной пробега ионов, которая соответствовала приповерхностной модификации пленки. Расчет пробегов ионов проводился с помощью программы TRIM. Имплантация ионов во всех случаях осуществлялась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже  $P=10^{-5}$  Па на импланторе ИЛУ – 3 в Казанском физико-техническом институте.

Пленки полиимида были имплантированы ионами серебра ( $Ag^+$ ) с энергией 30 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> и плотности ионного тока  $j = 4$  и 8 мкА/см<sup>2</sup>, никеля ( $Ni^+$ ) с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> и плотности ионного тока  $j = 4, 8$  и 12 мкА/см<sup>2</sup>, меди ( $Cu^+$ ) и кобальта ( $Co^+$ ) энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при плотности ионного тока  $j = 4, 8$  и 12 мкА/см<sup>2</sup>.

Морфология модифицированной поверхности исследовалась методом атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на приборе Solver P47- PRO. Использовались кантилеверы серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Измерения микротвердости проводились по стандартной методике на приборе ПМТ-3. Температурная зависимость сопротивления измерялась в режиме постоянного тока в интервале температур 300 – 40 К, а магниторезистивный эффект при 4,2 К в магнитном поле до 5,0 Тл. Спектры пропускания и отражения регистрировались при комнатной температуре спектрофотометром PROSCAN MC-122 в диапазоне длин волн 200 – 1100 нм.

В главе 3 приведены результаты исследования изменения морфологии и микротвердости пленок ПИ при имплантации ионами никеля и серебра. Исследования АСМ показали, что рельеф поверхности исходной пленки достаточно гладкий, средняя шероховатость составляет  $R_a = 1,2$  нм. Существенные изменения морфологии поверхности ПИ при имплантации наблюдаются при дозах  $\cdot 50^{16}$  см<sup>-2</sup> и выше. Имплантация ионов серебра приводит к появлению на имплантируемой поверхности полимерной пленки колоколообразных образований с высотой до 20 нм и диаметром основания до 100 нм. При увеличении дозы имплантации высота этих образований уменьшается, а диаметр их основания увеличивается. При этом увеличивается количество таких новообразований на единице площади и начинается их перекрытие. Средняя величина шероховатости достигает значения  $R_a = 2,24$  нм. При дозе имплантации серебра  $1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>, вышеописанные неоднородности сливаются, превращаясь в лабиринтоподобную структуру с максимальным значением шероховатости  $R_a = 3,5$  нм. Сравнение изображений АСМ пленок имплантированных ионами никеля и серебра показало, что характер модификации поверхности практически не зависит от вида иона, однако, для ионов никеля, имеющих меньшую массу по сравнению с ионами серебра, изменение морфологии поверхности начиналось при больших дозах. В отличие от имплантации серебра средняя шероховатость растет значительно быстрее и достигает значения  $R_a = 12$  нм (рисунок 1).

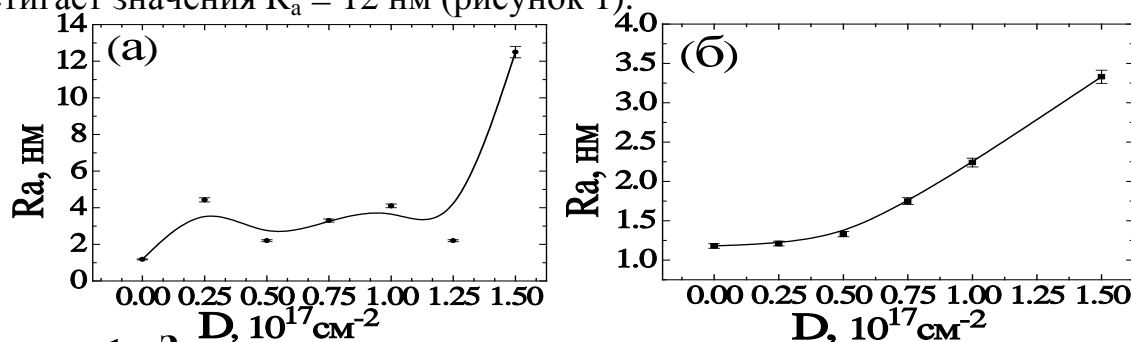


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости поверхности пленок полиимида, имплантированных ионами никеля (а) и серебра (б) от дозы имплантации при плотности ионного тока  $j = 4$  мкА/см<sup>2</sup>

Изменение морфологии поверхности имплантированной полимерной пленки обусловлено свеллингом (swelling) – “вздутием” поверхности полимера под действием различных факторов, которыми в случае имплантации ионов металла могут быть: 1) выход газообразных продуктов деструкции полимера, 2) локальный разогрев матрицы в области ионного трека, 3) образование углеродных и металлических нанокластеров в приповерхностном слое полимера, 4) распыление приповерхностного слоя полимера в процессе имплантации.

Выход газообразных продуктов деструкции полимера не может быть основной причиной формирования колоколообразных образований вследствие их больших размеров (до 100 нм в основании). Их формирование скорее всего обусловлено особенностью молекулярной структуры и спецификой радиационного воздействия на полимеры, которая определяется сильной неоднородностью макроструктуры полимера. Это дает основание предположить, что в результате ионной имплантации процессу разбухания, в первую очередь, подвержены аморфные области полимера, что способствует выталкиванию «кристаллических» включений, «плавающих» в аморфной фазе. Находящиеся до облучения вблизи поверхности «кристаллические» включения полимера вследствие эффекта «выталкивания» могут формировать колоколообразные образования с субмикронными размерами.

Микроиндентирование как исходного, так и имплантированных ионами никеля и серебра пленок полиимида показало, что после процесса индентирования имплантированных образцов полиимида при всех используемых нагрузках на поверхности полимеров отчетливо наблюдается отпечаток четырех ребер призмы индентора, а сам отпечаток хорошо наблюдается только в поляризованном свете. Отпечаток индентора имеет форму квадрата с вогнутыми внутрь сторонами. Это свидетельствует, во-первых, о наличии достаточно существенного упругого последействия после снятия нагрузки и, во-вторых, об однородности механических свойств исследованных образцов.

При увеличении дозы имплантации доля упругой деформации падает и при дозах свыше  $7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  деформация становится преимущественно пластической, т.е. коэффициент восстановления отпечатка (отношение диагоналей невосстановленного к восстановленному отпечатку  $d_{\text{невост}}/d_{\text{вост}}$ ) равен 1. Таким образом, до доз ИИ  $7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в исследуемых образцах имплантированных ионами никеля и серебра полиимида наблюдается переход от частично упругой к пластической деформации.

Микротвердость имплантированных образцов существенно понижается (примерно в 2 раза) при возрастании нагрузки от 5 до 20 г, а при дальнейшем росте нагрузки изменяется незначительно. При нагрузке 100 г величина

микротвердости была неизменна и составляла около  $H \sim 0,19$  ГПа. Такое поведение механических свойств полимера обусловлено наличием в нем тонкого приповерхностного слоя с высокой твердостью. За пределами этого слоя изменения прочностных характеристик полимера не наблюдается.

Изменение микротвердости при имплантации показано на рисунке 2.

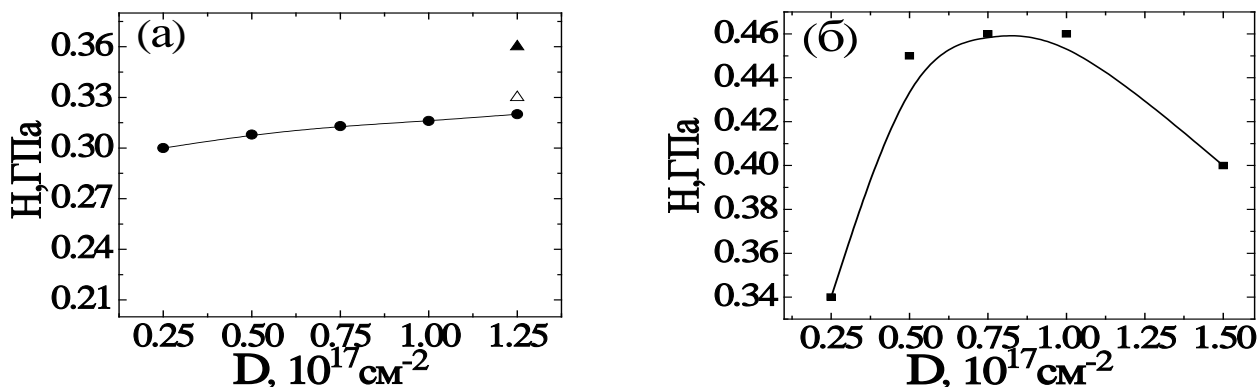


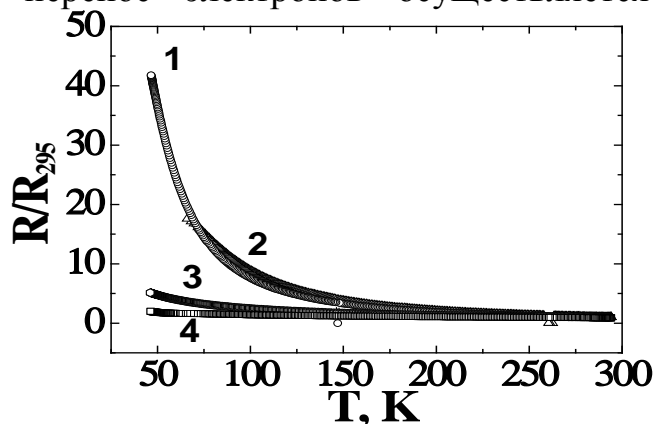
Рисунок 2 – Зависимость микротвердости пленок ПИ, имплантированных ионами никеля (а) и серебра (б) при  $j = 4$  мкА/см<sup>2</sup> от дозы имплантации. Треугольниками отмечены значения микротвердости при максимальной дозе  $j = 8$  мкА/см<sup>2</sup> (светлый треугольник) и  $j = 12$  мкА/см<sup>2</sup> (темный треугольник). Величина нагрузки – 5 г

Величина микротвердости выходит на насыщение уже при минимальной дозе имплантации  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . В образцах, имплантированных тяжелыми ионами серебра, эффект приповерхностного упрочнения был выражен сильнее – приповерхностная микротвердость была выше в 1,5 раза. Приближенная оценка величины микротвердости приповерхностного слоя показала, что она имеет величину  $H \sim 3,5$  ГПа и, более чем на порядок, превосходит микротвердость не имплантированных пленок полиимида  $H = 0,19$  ГПа.

При имплантации ионов металлов дозами выше  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в имплантированных полимерах наблюдается зарождение и рост наночастиц имплантированного металла. Размеры таких металлических включений могут достигать сотен нанометров. Поэтому увеличение микротвердости пленок полиимида, имплантированных ионами серебра и никеля вызывается не только армирующим действием углеродных кластеров с разной гибридизацией молекулярных орбиталей, но и формирующимися при ионной имплантации металлическими включениями. Снижение приповерхностной микротвердости при имплантации ионами серебра дозой  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  обусловлено, вероятнее всего, развитием упругих напряжений в имплантированном слое.

В главе 4 рассмотрены вопросы изменения электронно-транспортных и магнитотранспортных характеристик пленок ПИ в зависимости от дозы и режимов имплантации ионов  $\text{Co}^+$  и  $\text{Cu}^+$ . В отличие от имплантации ионов кобальта, температурный коэффициент сопротивления при имплантации ионов

меди имеет только отрицательный знак (рисунок 3). Анализ температурной зависимости локальной энергии активации показал, что в случае имплантации ионов меди перехода диэлектрик-металл не наблюдается, а низкотемпературный перенос электронов осуществляется межкластерным туннелированием.



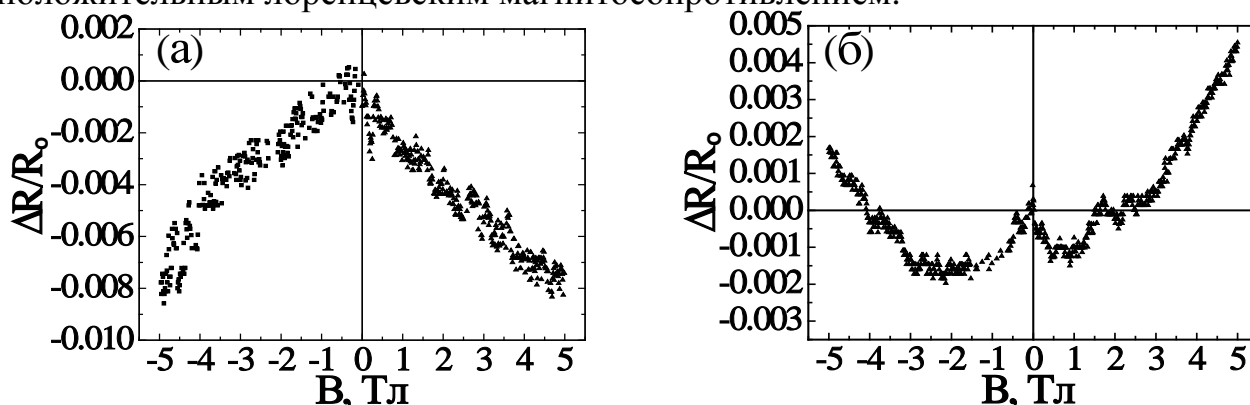
**Рисунок 3 – Температурные зависимости сопротивления, отнесенного к значению при комнатной температуре, для пленок полиимида, имплантированных ионами меди с разными дозами при разных плотностях ионного тока:  $D, \text{см}^{-2}$ : 1–  $5 \cdot 10^{16}$ ; 2, 3, 4–  $1,25 \cdot 10^{17}$ .  $j, \text{мкА/см}^2$ : 1, 2– 4; 3– 8; 4– 12**

Отсутствие перехода диэлектрик-металл в ПИ при имплантации меди по сравнению с кобальтом обусловлено, с одной стороны, химическим воздействием внедряемой примеси на процесс графитизации и электронную структуру облученного карбонизированного слоя полимера, и, с другой стороны, морфологией формирующихся в проводящем слое металлических наночастиц. Введение меди в молекулярные сетки графита вызывает в них значительные изменения. А именно, близкорасположенные к меди  $p_z$  – электроны углерода примеси формируют с  $s$  -,  $p_x$  -,  $p_y$  – электронами  $sp^3$  – орбитали, а не характерные для графита сопряженные  $\pi$  -связи. Это снижает, в целом, степень делокализации  $p_z$  электронов и ведет к уменьшению проводящих свойств.

Магниторезистивный эффект при  $T = 4,2 \text{ К}$  в пленках полиимида, имплантированных ионами кобальта, отрицателен независимо от режима переноса электронов (рисунок 4). На диэлектрической стороне перехода он имеет немонотонную зависимость от магнитного поля, обусловленную спин-зависимым рассеянием на доменных стенках и магнитных нанокластерах с максимумами при  $B_{\perp} \approx 0,25 \text{ Тл}$  и  $B_{\parallel} \approx 0,12 \text{ Тл}$  для случаев перпендикулярной и параллельной ориентаций магнитного поля по отношению к плоскости пленки.

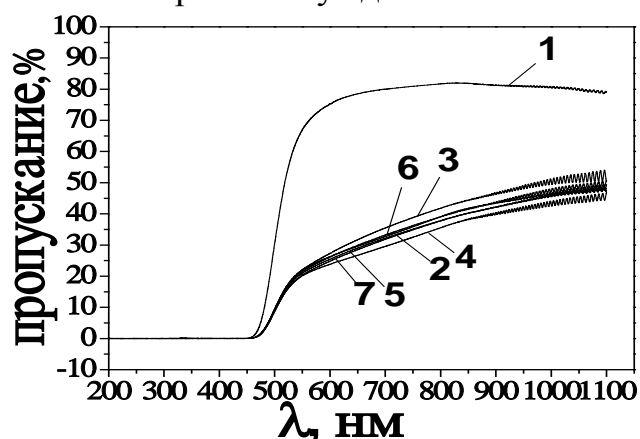
На металлической стороне перехода в режиме слабой локализации заряда наблюдается смена знака магниторезистивного эффекта с отрицательного на положительный вследствие аддитивного сложения отрицательной и

положительной компонент, обусловленных, соответственно, подавлением полем процессов слабой локализации и анизотропным эффектом с положительным лоренцевским магнитосопротивлением.



**Рисунок 4 – Магнитосопротивление при  $T = 4,2$  К пленки полиимида, имплантированной ионами кобальта дозой  $D = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при  $j = 4 \text{ мкА/см}^2$  (диэлектрический режим переноса электронов) (а) и дозой  $D = 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при  $j = 12 \text{ мкА/см}^2$  (металлическим режим переноса электронов) (б) для перпендикулярной ориентации магнитного поля по отношению к плоскости пленки**

В главе 5 методом оптической спектроскопии изучено формирование в приповерхностной области пленки наночастиц серебра. Обнаружено увеличение коэффициентов отражения и поглощения во всем спектральном диапазоне при измерении как с имплантированной, так и с неимплантированной сторон. Для исходного образца характерна резкая граница поглощения в области длин волн  $\lambda \approx 500 \text{ нм}$ , которая обусловлена переходом  $\pi$ -электронной системы полимера в возбужденное состояние  $\pi - \pi^*$  (рисунок 5).

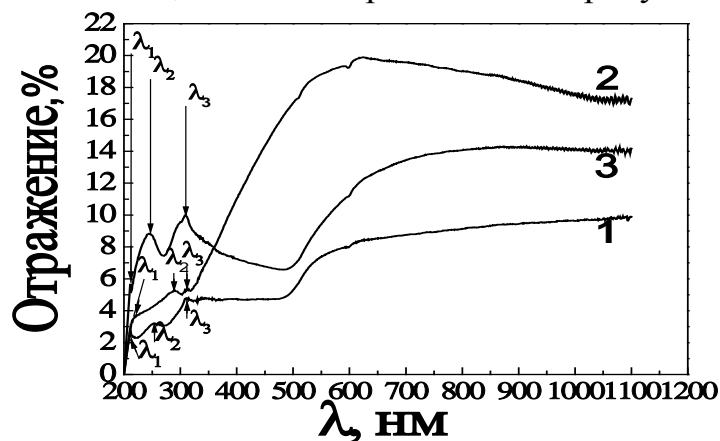


**Рисунок 5 – Спектральная зависимость пропускания исходной (1) и имплантированных ионами серебра пленок полиимида.  $D, \text{ см}^{-2}$ : 2–  $2,5 \cdot 10^{16}$ ; 3–  $5,0 \cdot 10^{16}$ ; 4–  $7,5 \cdot 10^{16}$ ; 5–  $1,0 \cdot 10^{17}$ ; 6–  $1,5 \cdot 10^{17}$ ; 7–  $1,0 \cdot 10^{17}$ ;  $j, \text{ мкА/см}^2$ : (2-6)– 4; 7– 8**

В области прозрачности коэффициент пропускания существенно уменьшается уже при первой дозе имплантации. Такое уменьшение коэффициента пропускания связано с процессом карбонизации

приповерхностного слоя пленки, так как коэффициент поглощения аморфного углерода практически равен единице. Этому также способствует и формирование наночастиц серебра в приповерхностном слое.

Спектральные зависимости коэффициента отражения, измеренные с имплантированной и неимплантированной сторон, для образца, имплантированного дозой  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  приведены на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Спектральная зависимость коэффициента отражения исходной (1) и имплантированных ионами серебра пленок полиимида, измеренные с имплантированной (2) и неимплантированной (3) сторон.  $D, \text{см}^{-2}: 1,5 \cdot 10^{17}$ ;  $j, \text{мкА/см}^2: 4$**

В исходной пленке коэффициент отражения практически не зависит от стороны падения света (кривая 1), имеет наибольшую величину в области прозрачности и для него в ультрафиолетовой области спектра наблюдается три слабо выраженных максимума при  $\lambda_1 = 210$ ,  $\lambda_2 = 254$  и  $\lambda_3 = 311$  нм.

С имплантированной стороны, наблюдается широкая полоса отражения, максимум которой смещается в длинноволновую область спектра с увеличением дозы, что позволяет связать ее с поверхностным плазменным резонансом на границе раздела наночастица серебра - полимер. При регистрации спектра отражения с неимплантированной стороны (кривая 3) плазменная полоса отражения наночастиц серебра выражена слабее и максимальной величины коэффициент отражения достигает при  $\lambda \approx 800$  нм. Сдвиг максимума плазменных полос отражения в длинноволновую область при измерении с неимплантированной стороны связан с неоднородным распределением ионно-синтезированных наночастиц серебра по глубине, что приводит к разному отражению от имплантированной и неимплантированной сторон. В этом случае наиболее крупные частицы серебра расположены вблизи облученной поверхности, тогда как мелкие простираются вглубь образца.

При измерении с имплантированной стороны характерные для исходного образца пики отражения при  $\lambda_1 = 210$ ,  $\lambda_2 = 254$  и  $\lambda_3 = 311$  нм практически не проявляются. В спектрах, измеренных с неимплантированной

стороны, наблюдается усиление отражения при этих длинах волн (кривая 3), что связано с модификацией полимера за пределами пробега ионов. Отсутствие этого эффекта при измерении с имплантированной стороны обусловлено сильной карбонизацией приповерхностного слоя.

В области прозрачности ПИ коэффициент отражения значительно больше с имплантированной стороны, и он максимален при минимальной дозе имплантации. Увеличение дозы имплантации приводит к его незначительному уменьшению, в то время как с неимплантированной стороны наблюдается насыщение. Отмеченные закономерности изменения спектральных и дозовых зависимостей коэффициента отражения связаны с формированием больших кластеров серебра вблизи имплантированной поверхности ПИ, значительно большей величиной коэффициента отражения серебра по сравнению с полиимидом, их экранированием углеродными кластерами, а также образованием металлоуглеродных включений по типу ядро-оболочка.

Формирование в приповерхностном слое пленки углеродных и металлических включений позволяет предположить наличие внутренней границы раздела модифицированный слой-пленка и, как следствие, многократного переотражения от нее. Это приводит к тому, что при падении света на неимплантированную поверхность коэффициент экстинкции больше, чем при падении света на имплантированную.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

На основании полученных результатов изучения структурных, электрических и оптических характеристик пленок полиимида, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$  можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что при имплантации ионов серебра с энергией 30 кэВ и никеля с энергией 40 кэВ в полиимид в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = \text{мкА/см}^2$  шероховатость увеличивается от 1,2 нм до 3,5 нм и 12 нм соответственно вследствие выхода газообразных продуктов деструкции полимера, ионно-лучевого распыления и формирования углеродных и металлических нанокластеров в приповерхностном слое полимерной пленки [1, 4, 8].

2. Показано, что при имплантации ионов серебра с энергией 30 кэВ и никеля с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока от до  $12 \text{ мкА/см}^2$  в пленки полиимида микротвердость увеличивается до 0,46 ГПа и 0,36 ГПа соответственно, что обусловлено армированием приповерхностного слоя вследствие формирования углеродных и металлических нанокластеров [4, 12].



3. Предложена основанная на туннелировании  $\pi$ -электронов феноменологическая модель переноса носителей заряда в полиимиде, имплантированном ионами меди с энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока от 4 до 12 мкА/см<sup>2</sup>, которая учитывает блокировку  $\pi$ -электронов графитоподобных кластеров атомами меди, встраивающимися между плоскостями графита, что по сравнению с имплантацией ионов кобальта, не позволяет достичь перехода диэлектрик-металл [3, 6, 10, 14].

4. Показано, что магниторезистивный эффект в пленках полиимида, имплантированных ионами кобальта энергией 40 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотностях ионного тока от 4 до 12 мкА/см<sup>2</sup> отрицателен и имеет немонотонную зависимость от магнитного поля, что обусловлено спиновой зависимостью электронных процессов переноса и движением доменных стенок вследствие наличия ферромагнитного упорядочения кластеров кобальта при низких температурах [2, 9].

5. Методом оптической спектроскопии показано, что при имплантации ионов серебра с энергией 30 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока от до 8 мкА/см<sup>2</sup> в пленки полиимида в приповерхностном модифицированном слое формируются наночастицы серебра, что приводит к увеличению коэффициентов отражения и экстинкции в спектральном диапазоне 200–1100 нм и появлению полос поверхностного плазменного резонанса в интервале длин волн 620–800 нм при падении света как на имплантированную, так и с неимплантированную поверхности [5, 7, 11, 13, 15, 16].

6. Установлено, что в имплантированном ионами серебра в полиимиде коэффициент экстинкции больше при измерении с неимплантированной стороны, чем с имплантированной, что обусловлено разной интенсивностью входящего с разных сторон в многослойную структуру света и многократным внутренним отражением на границе раздела модифицированный слой-полимерная пленка, а также усиление интенсивности полос отражения при  $\lambda_1 = 210 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2 = 254 \text{ нм}$  и  $\lambda_3 = 311 \text{ нм}$ , обусловленное перестройкой в полимерной матрице на глубинах, превышающих средний проецированный пробег ионов серебра. Показано, что при дозах имплантации больших  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  коэффициенты отражения и экстинкции в области прозрачности полиимида при  $\lambda = 800 \text{ нм}$  практически не зависят от дозы имплантации из-за завершения процесса карбонизации, а формирующиеся при имплантации кластеры серебра имеют неоднородное распределение по глубине, при котором наиболее крупные кластеры расположены вблизи имплантированной поверхности, а более мелкие в глубине модифицированного слоя [5, 7, 11, 13, 15, 16].

## **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Установленные закономерности изменения структурных, электрических и оптических характеристик пленок ПИ, имплантированных ионами  $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$ , могут быть физической основой получения гибких проводящих или изолирующих слоев с заданными характеристиками. Они могут найти применение при разработке функциональных элементов электронной техники, в частности в спинтронике, при разработке датчиков магнитного поля, создании запоминающих сред и приборов считывания информации на магниторезистивном эффекте, а также нового поколения приборов интегральной оптики, оптоэлектроники и нанофотоники.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при чтении лекций по специальным курсам “Электронные состояния и процессы в конденсированных средах”, “Физика электропроводящих полимеров”, а также в настоящее время внедрены в учебный процесс кафедры физики полупроводников и наноэлектроники путем постановки новой лабораторной работы цикла “Современные методы исследований” для студентов специализации “Новые материалы и технологии” “Оптические характеристики наноструктурных композитов, синтезированных ионной имплантацией полимерных пленок”.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в научных журналах**

1. Волобуев, В.С. Морфология и композиционный состав приповерхностных слоёв полиэтилентерефталата и полиимида, имплантированных ионами никеля / В.С. Волобуев, Ф.А. Нажим // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2009. – № 3. – С. 48–51.
2. Магниторезистивный эффект в полимерных композитах с нанокластерами магнитных и немагнитных металлов / Ф.А. Нажим, М.Г. Лукашевич, В.В. Базаров, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 3. – С. 22–26.
3. Особенности электрических свойств пленок полиимида, имплантированных ионами меди и кобальта / Ф.А. Нажим, М.Г. Лукашевич, В.И. Нуждин, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2010. – №. 2. – С. 100–105.
4. Физико-механические свойства приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида, модифицированных имплантацией ионов никеля / С.А. Вабищевич, Д.И. Бринкевич, В.С. Волобуев, Ф.А. Нажим, М.Г.

Лукашевич, В.Б. Оджаев, В.Ф. Валеев, Р.И. Хайбуллин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 74–82.

5. Оптические свойства пленок полиимида, имплантированных ионами серебра / Ю.А. Бумай, В.Ф. Валеев, Н.И. Долгих, М.Г. Лукашевич, Ф.А. Нажим, В.И. Нуждин, В.Б. Оджаев // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 54–58.

6. Najim, F.A. DC and AC electron-transport properties of polyimide foils implanted by  $\text{Co}^+$  and  $\text{Cu}^+$  ions / F.A. Najim, M.G. Lukashevich // J. of Al-Qadisiya for Pure Science. – 2011. – Vol. 16, № 2. – P. 1–8.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

7. Оптические свойства полиэтилентерефталата и полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля / Ю.А. Бумай, В.С. Волобуев, В.Ф. Валеев, Н.И. Долгих, М.Г. Лукашевич, Ф.А. Нажим, Р.И. Хайбуллин // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / Белорус. гос. ун-т, Белорус. респ. фонд фундам. исслед. ; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 214–217.

8. Модификация приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида имплантацией ионов никеля / Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич, В.Ф. Валеев, В.С. Волобуев, Ф.А. Нажим, М.Г. Лукашевич, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2009 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2009. – С. 148–150.

9. Магнитотранспортные характеристики полиимида, имплантированного ионами кобальта и меди / Ф.А. Нажим, М.Г. Лукашевич, В.В. Базаров, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2009 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2009. – С. 186–188.

10. DC and AC electric characterization of PI foils implanted by  $\text{Cu}^+$  ions / F.A. Najim, M.G. Lukashevich, R.I. Khaibullin, V.I. Nuzhdin, V.B. Odzhaev // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск 20–23 окт. 2009 г. : в 3 т. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по материаловедению, Белорус. респ. фонд фундам. исслед. ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 110–112.

11. Оптические характеристики металлополимерных композитов, синтезированных имплантацией серебра в ПЭТ и ПИ / В.С. Волобуев, Ю.А. Бумай, М.Г. Лукашевич, Ф.А. Нажим, В.И. Нуждин, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 20–23 окт. 2009 г. : в 3 т. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по материаловедению, Белорус. респ. Фонд фундам.

исслед. ; редкол.: Н.М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 3. – С. 306–308.

12. Физико-механические свойства пленок полиэтилентерефталата и полиимида, имплантированных ионами  $\text{Ag}^+$  / С.А. Вабищевич, В.С. Волобуев, Д.И. Бринкевич, М.Г. Лукашевич, Ф.А. Нажим // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф.; Минск, 23–24 сент. 2010 г. / Белорус. гос. ун-т, Белорус. респ. фонд фундам. исслед. ; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 204–207.

### **Тезисы докладов**

13. Нажим, Ф.А. Модификация оптических свойств полиэфирэфиркетона имплантацией ионов никеля / Ф.А. Нажим // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16–17 апр. 2009 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2009. – С. 164–166.

14. Нажим, Ф.А. Электрические характеристики полиимида, имплантированного ионами кобальта и меди / Ф.А. Нажим // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16–17 апр. 2009 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2009. – С. 166–168.

15. Нажим, Ф.А. Оптических свойства полиимида, имплантированного ионами переходных металлов / Ф.А. Нажим, А.А. Харченко // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVIII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21–23 апр. 2010 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 173–175.

16. Харченко, А.А. Лабораторная работа для специализации «новые материалы и технологии» «оптические характеристики наноструктурных композитов синтезированных ионной имплантацией полимерных пленок» / А.А. Харченко, Ф.А. Нажим, В.С. Волобуев // Физика конденсированного состояния : тез. докл. XVIII Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21–23 апр. 2010 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 382–384.

**РЕЗЮМЕ**  
**Нажим Фирас А.**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПЛЕНОК ПОЛИИМИДА, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ  
 $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$**

**Ключевые слова:** полиимид, ионная имплантация, морфология поверхности, микротвердость, переход диэлектрик-металл, магнитосопротивление, оптические свойства.

**Цель работы:** заключалась в установлении закономерностей изменения морфологии, микротвердости, электронно- и магнитотранспортных, а также оптических характеристик пленок полиимидов, имплантированных ионами переходных металлов.

**Методы исследования:** Атомно-силовая микроскопия, микроиндентирование, измерение температурных зависимостей сопротивления, магнитосопротивления, спектров отражения и пропускания.

**Полученные результаты и их новизна.** Установлено, что при имплантации ионов серебра и никеля в пленки полиимидов, как шероховатость, так и микротвердость модифицированных пленок увеличиваются.

Предложена феноменологическая модель переноса носителей заряда в полиимиде, имплантированном ионами меди, которая учитывает блокировку  $\pi$ -электронов графитоподобных кластеров атомами меди, встраивающимися между плоскостями графита, что, в отличие от имплантации ионов кобальта, не позволяет достичь перехода диэлектрик-металл. Показано, что магниторезистивный эффект в пленках полиимидов, имплантированных ионами кобальта, отрицателен независимо от режима переноса носителей заряда и имеет немонотонную зависимость от магнитного поля.

Установлено, что при имплантации ионов серебра в пленки полиимидов в приповерхностном модифицированном слое формируются наночастицы серебра, что приводит к появлению полос отражения поверхностного плазменного резонанса. Обнаружена большая величина коэффициента экстинкции при измерении с неимплантированной стороны, а также усиление интенсивности полос отражения при  $\lambda_1 = 210$  нм,  $\lambda_2 = 254$  нм и  $\lambda_3 = 311$  нм, обусловленное перестройкой полиимидов на глубинах, превышающих средний проецированный пробег ионов серебра.

**Область применения:** физика низкоразмерных и спин-зависимых электронных состояний и процессов в конденсированных средах.

**РЭЗІЮМЭ**  
**Нажым Фірас А.**

**ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ І АПТЫЧНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ  
ПЛЁНАК ПОЛІІМІДУ, ІМПЛАНТАВАНЫХ ІЁНАМІ  
 $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  І  $\text{Ag}^+$**

**Ключавыя словы:** поліімід, іённая імплантацыя, марфалогія паверхні, мікрацвердасць, пераход дыэлектрык-метал, магнітасупраціўленне, аптычныя ўласцівасці.

**Мэта работы:** асноўная мэта работы складалася ва ўсталяванні заканамернасцей змены марфалогіі, мікрацвердасці, электронна-і магнітатранспартных, а таксама аптычных уласцівасцей плёнак полііміду, імплантаваных іёнамі пераходных металаў.

**Метады даследавання:** Атамна-сілавая мікраскапія, мікраіндэнтаванне, вымярэнне тэмпературных залежнасцей супраціўлення, магнітасупраціўлення, спектраў аптычнага адбіцця і прапускання.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Устаноўлена, што пры імплантацыі іёнаў серабра і нікелю ў плёнку полііміду шурпатасці і мікрацвердасці мадыфікаваных плёнак павялічваюцца.

Прапанавана фенаменалагічная мадэль пераносу носбітаў зараду ў поліімідзе, імплантаваным іёнамі медзі, якая ўлічвае затрыманне  $\pi$  –электронаў графітападобных кластэраў атамамі медзі, якія ўлезлі паміж пласкасцямі графіту, што не дазволіла дасягнуць пераходу дыэлектрык-метал. Паказана, што магнітарэзістыўны эфект ў плёнках полііміду, імплантаваных іёнамі кобальту, адмоўны і мае неманатонную залежнасць ад магнітнага поля.

Устаноўлена, што пры імплантацыі іёнаў серабра ў плёнку полііміду ў прыпаверхнасным слоі нараджаюцца наначасцічкі серабра, што прыводзіць да паяўлення палос паверхнаснага плазменнага рэзанансу. Выяўлена больш вялікае значэнне каэфіцыента экстынкцыі пры вымярэнні з неімплантаванага боку плёнку, а таксама ўзмацненне інтэнсіўнасці палос адбіцця пры  $\lambda_1 = 210$  нм,  $\lambda_2 = 254$  нм і  $\lambda_3 = 311$  нм, абумоўленае перабудовай полііміду на глыбінях, якія перавышаюць сярэдні праецыраваны прабег іёнаў серабра.

**Вобласць прымянення:** фізіка нізкаразмерных і спін-залежных электронных станаў і працэсаў у кандэнсаваных асяроддзях.

**SUMMARY**  
**Najim Firas A.**

**ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF POLYIMIDE FILMS  
IMPLANTED BY  $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  and  $\text{Ag}^+$  IONS**

**Keywords:** polyimide, ion implantation, surface morphology, microhardness, insulator-metal transition, magnetoresistance, optical properties.

**The purpose:** The main objective of the work is to determine the patterns of the structure and morphology of the surface, electron and magnetotransport and optical properties of polyimide films which is implanted by transition metal ions.

**Methods of investigation:** Atomic-force microscopy, microindentation, measurement of the temperature dependence on resistance, magnetoresistance, reflection and transmission spectra.

**Obtained results and their novelty:** It was estimated that implantation of silver and nickel ions into polyimide leads to increase roughness and microhardness.

The phenomenological model of charge carrier transport in polyimide implanted by copper ions, which takes into consideration  $\pi$ -electron blocking by copper atoms incorporated between graphite planes, that in contrast to the implantation of cobalt ions, does not allow reaching to the insulator-metal transition. It was shown that magnetoresistance of cobalt implanted polyimide is negative independently of charge carrier transport and have nonmonotonic magnetic field dependence.

It was observed that implantation of silver ions into polyimide film leads to silver nanoparticle formation and appearance the peaks of surface plasmon resonance. The higher value of extinction coefficient as well as amplification reflectance at  $\lambda_1 = 210$ ,  $\lambda_2 = 254$  and  $\lambda_3 = 311$  nm, due to rearrangement of the polyimide at depths exceeding the projected range of silver ions.

**Field of application:** physics of low dimensional and spin-depended on electron states and processes in the condensed matters.