

3  
k 21

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

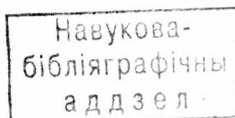
УДК 537.534: 535.854

**КАРВАТ**  
Чеслав Станиславович

**ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНТАКТОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



МИНСК – 2003

34.6 + 31.264.22  
К 21

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

Работа выполнена в Белорусском государственном университете  
и  
Люблинском техническом университете

Научные консультанты: член-корреспондент НАН Беларуси  
доктор физико-математических наук  
профессор Комаров Фадей Фадесвич,  
НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко  
Белгосуниверситета, лаборатория эллионики  
доктор физических наук  
профессор Павел Жуковский  
Люблинский технический университет, кафедра  
электрических аппаратов и техники высоких напряжений

20504263

ные оппоненты: доктор технич. наук, профессор  
Белый Алексей Владимирович,  
Физико-технический институт НАН Беларуси,  
отдел пучковых и плазменных технологий

доктор физ.- мат. наук, профессор  
Погребняк Александр Дмитриевич,  
Сумский Институт модификации поверхности, Украина

доктор технич. наук, профессор  
Филипенко Владимир Александрович,  
УП "Белмикросистемы" НПО Интеграл, ГЦ "Белмикрoанализ"

Оппонирующая организация - Белорусский национальный технический  
университет

Защита состоится "31" октября 2003 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите  
диссертаций Д02.01.16 в Белорусском государственном университете по адресу:  
220050, Минск, проспект Ф. Скорины, 4 (гл. корпус), ауд. 206, тел. ученого секретаря  
226-55-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
государственного университета.

Автореферат разослан "26" сентября 2003 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
канд. физ.-мат. наук  
доцент



В.Ф. Стельмах

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации Развитие современной техники привело к тому, что с каждым годом все больше используются устройства и электрические аппараты, которые питаются от сети низкого напряжения.

Для включения и выключения рабочих токов, а также токов проявляющихся во время помех (перенагрузка, короткое замыкание и т.п.) используется широкая гамма выключателей. Работа различных устройств и аппаратов предполагается в течение многих лет, а число переключений – от 10000 (выключатель для аппаратов) до 100000 и более в системах автоматики (например, реле). Исправность действия выключателей в большинстве случаев определяет надежность целых систем или отдельных аппаратов. Процессы прерывания и включения токов происходят с помощью контактных пар. Во время размыкания контактов происходит зажигание электрической дуги, которая приводит к возникновению высоких температур и в связи с этим к нагреванию контактов, эрозии их поверхностей, ионизации атомов в окружающей среде, нагреванию и деградации материала корпуса выключателя.

Работа разрывных контактов может происходить в сложных климатических или производственных условиях, например: высокой влажности, запыленности, повышенной температуры, присутствия в атмосфере химически активных соединений и т.п. Поэтому контакты выключателя должны быть устойчивы к вышеуказанным внешним воздействиям. В электрических устройствах разрывные контакты чаще всего изготавливаются из меди. Часто на медь гальванически наносится серебро или применяются накладки из сплавов серебра с другими металлами.

Улучшение механических свойств, коррозионной стойкости и износостойкости металлов может быть достигнуто с использованием методов и процессов ионной имплантации. В частности, проведенные до настоящего времени исследования подтвердили положительное влияние имплантации ионов азота на эксплуатационные свойства стали и иных металлов и сплавов.

Доступные литературные данные содержат небольшое количество информации относительно модификации ионными пучками материалов, используемых в электротехнике, в том числе меди и ее сплавов, ионами азота с разными энергиями и дозами.

Вследствие этого нами были проведены работы, целью которых было определение изменения электрических и трибологических свойств, а также микротвердости образцов меди и латуни, модифицированных ионами азота с разными энергиями и дозами. При модификации меди и латуни методами имплантации и динамического ионного перемешивания использовались ионы азота, а материалами, осажденными на образцах, были золото, серебро, никель, вольфрам и молибден. Такие же технологии применялись при модификации медных контактов выключателей для приборов. Определенный

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

методом RBS элементный состав имплантированных слоев меди и сплавов позволил найти корреляцию физико-химических свойств приповерхностных слоев с параметрами имплантации и определить ее оптимальные режимы.

Были разработаны специализированный ионный имплантатор и измерительные стенды. Исследование изменения падения напряжения на разрывных контактах и температуры контактных пар позволило определить состояние поверхности контактов во время циклической работы выключателя. Исследования проведены для выключателей с контактами: гальванически покрытыми серебром, медными (немодифицированными), химически полированными, имплантированными, а также химически полированными и имплантированными ионами азота. Эти исследования позволили определить влияние обработки поверхности контактов на условия их работы, а особенно на значения максимальной температуры контактов, которое, как установлено в проведенных исследованиях, в значительной степени определяет надежность работы выключателей. Предложен и разработан новый оригинальный способ однопучкового динамического ионного перемешивания. Полученные данные позволили определить влияние динамического ионного перемешивания атомов золота, серебра, никеля, молибдена и вольфрама на свойства модифицированных слоев. Определены изменения электрических свойств, микротвердости, а также распределения по глубине вводимых примесей, что позволило выяснить изменение свойств, а также процессы, происходящие в модифицированном слое, связанные с появлением дефектов, радиационно-стимулированной диффузией, а также миграцией примесей. Компьютерные расчеты процессов, происходящих во время динамического ионного перемешивания, и их сравнение с результатами эксперимента позволили прогнозировать оптимальные условия имплантации для получения требуемых свойств приповерхностных слоев материала.

Проведение исследований модифицированных методом динамического ионного перемешивания контактов выключателей, показало, что ионно-лучевые технологии позволяют осуществить полезную модификацию медных контактов с целью улучшения их эксплуатационных свойств и времени жизни контактных пар.

Необходимо отметить, что преобладающая часть проведенных исследований была выполнена на оригинальной созданной при выполнении работ исследовательской аппаратуре, а анализ полученных результатов измерений проведен впервые. Созданная аппаратура, разработанные и протестированные компьютерные программы, используемые для проведения измерений и обработки результатов, позволяют прогнозировать дальнейшие исследования для объяснения многочисленных проблем, связанных с использованием ионных технологий для нанесения покрытий на контактных и иных системах. Полученные результаты исследований, приведенные для выключателей для приборов могут быть использованы и для создания переключающих систем аппаратов и электроэнергетических устройств

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

3

средних мощностей, обеспечивающих высокую надежность работы в различных эксплуатационных условиях.

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

Диссертационная работа выполнялась в рамках Проектов, финансируемых Комитетом Научных Исследований Польши: № 8 T10C 026 10 (1996 – 97г.) „Изменение эксплуатационных параметров поверхностных слоев контактных материалов под воздействием ионной имплантации”; № 8 T10B 016 18 (2000 – 01г.) „Исследование изменения эксплуатационных параметров электротехнических материалов под влиянием двухпучковой ионной имплантации и динамического ионного перемешивания”; № 4 T10A 055 24 (2003 – 04г.) „Исследование многокомпонентных покрытий контактов выключателей для аппаратов, нанесенных методом динамического ионного перемешивания” научным руководителем которых был соискатель, а также в рамках планов научно-исследовательских работ Люблинского технического университета № S – 38/E/2002 “Влияние ионной имплантации и эксплуатации на параметры электротехнических материалов и устройств”, утвержденных ректором (1997 – 2002 годы).

**Цель работы** заключается в установлении: влияния предложенных ионно-лучевых технологий на свойства модифицированных поверхностей электротехнических материалов и эксплуатационные параметры контактов выключателей для приборов, а также причин их изменения при использовании изготовленной аппаратуры и разработанных методов исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выбрать вид обработки поверхностей исследованных образцов электротехнических материалов для получения повторяемости результатов измерений.
2. Разработать конструкцию, изготовить и запустить в эксплуатацию простой и надежный ионный имплантатор для модификации металлов, определить параметры и стабильность работы источника ионов и процесса имплантации, а также предельные режимы этих процессов.
3. Разработать способ проведения динамического ионного перемешивания слоев.
4. Построить экспериментальный стенд для исследования электрических свойств модифицированных слоев методом измерения падения напряжения на контакте исследованный образец – зондирующий электрод в зависимости от силы притяжения.
5. Определить влияние ионной имплантации с разными энергиями и дозами ионов азота на микротвердость меди и латуни и разработать способ определения микротвердости двухслойных систем, сильно отличающихся твердостью.
6. На основе полученных спектров RBS определить распределение по глубине концентрации атомов примеси, обосновать физико-

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

4

математическую модель процессов, происходящих во время модификации поверхности методами высокодозной имплантации и динамического ионного перемешивания, провести расчеты и сравнение с результатами экспериментов теоретических данных.

7. Исследовать микротвердость и электрические свойства меди и латуни, имплантированных ионами азота разных энергий и модифицированных динамическим ионным перемешиванием с нанесением атомов слоев Au, Ag, Ni, W, Mo и выбрать оптимальные дозы имплантации и режимы перемешивания.
8. Спроектировать и построить стенд для измерений падения напряжения и температуры выключателей и компьютерной регистрации результатов измерений во время циклической работы, определить процессы, происходящие на поверхности контактов и влияние состояния поверхности на их свойства.
9. Исследовать электрические и тепловые свойства выключателей для приборов с рабочими режимами:  $U \cong 250$  В,  $I \cong 10(4)$  А с медными контактными парами, имплантированными ионами азота и определить оптимальные параметры обработки, улучшающие параметры выключателей.
10. Исследовать выключатели с контактами, покрытыми методом динамического ионного перемешивания слоями Au, Ag, Ni, W и Mo и выбрать условия нанесения покрытий, использование которых приводит к уменьшению температуры и переходного сопротивления, а также подавлению электрической дуги.

**Объект исследования.** Верхние слои электротехнических материалов (медь, латунь), неимплантированные и имплантированные ионами азота и модифицированные динамическим ионным перемешиванием атомов никеля, золота, вольфрама, серебра и молибдена; поверхности контактных пар электрических выключателей подвергнутых таким же самым ионным обработкам.

**Предметом исследований** являлись химический состав, электрические, механические, трибологические свойства контактных материалов легированных ионами азота и модифицированных динамическим ионным перемешиванием, а также электрические и тепловые свойства исходных медных и модифицированных ионными технологиями контактов.

**Методология и методы проведенного исследования.** Ионная имплантация проводилась на исследовательских имплантаторах UNIMAS-79 и МКРСz-99. В ходе работ были использованы стандартные хорошо апробированные методы измерений микротвердости Виккерса, электрического сопротивления, температуры, резефордовского обратного рассеивания (RBS). Для нанесения слоев методом однопучкового динамического ионного перемешивания был разработан специальный оригинальный способ.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

5

## Научная новизна и значимость полученных результатов.

1. Впервые обнаружено, что имплантация электротехнической меди ионами атомарного и молекулярного азота с энергией до 200 кэВ дозами от  $1,3 \times 10^{17}$  до  $7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  ограничивает процессы структурно-фазовых превращений с участием кислорода, что стабилизирует величину переходного сопротивления при длительном хранении.
2. Показано, что при ионной имплантации и динамическом ионном перемешивании меди ионами азота дозами свыше  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  происходит увеличение ширины профилей распределения азота, обусловленное радиационно-стимулированной диффузией.
3. На основе анализа зависимостей микротвердости, определяемой по методу Виккерса, от силы воздействия на пирамиду для систем подложка – имплантированный или нанесенный методом динамического ионного перемешивания слой установлено, что объективная информация об изменении микротвердости системы может быть получена при сравнении величин сил, необходимых для проникновения пирамиды на одинаковую глубину.
4. Установлено, что модификация поверхности меди методом динамического ионного перемешивания (металлы Au, Ag, Ni, W, Mo) ионами молекулярного азота с энергией 110 кэВ, доза  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  приводит к возрастанию микротвердости по Виккерсу от 1,5 раз для золота и до 4 раз для никеля.
5. Установлено, что в процессе многократно повторяющихся переключений выключателей с медными или гальванически покрытыми серебром контактами наблюдаются участки медленного уменьшения переходного сопротивления в течение нескольких сотен переключений и роста в течение около 1000 циклов с выходом на насыщение.
6. Впервые экспериментально показано, что для медных контактов, имплантированных ионами молекулярного азота (доза  $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ), исчезают участки медленного уменьшения переходного сопротивления, а наблюдаются резкие, в течение одного-нескольких циклов, уменьшения переходного сопротивления.
7. Впервые экспериментально обнаружено, что для медных контактов, модифицированных однопучковым динамическим ионным перемешиванием (никель, вольфрам или золото), наблюдаются сверхлинейные зависимости переходного сопротивления от силы нагрузки на контакт.
8. Впервые проведены численные расчеты процесса осаждения слоев металлов методом однопучкового динамического осаждения, количественно описывающие результаты, полученные для меди при перемешивании ионами молекулярного азота атомов углерода, золота и молибдена.
9. Впервые предложены и реализованы методы, способы и устройства формирования и функциональной диагностики контактных материалов и

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

6

контактов электрических аппаратов, отличающихся существенным повышением производительности при решении технологических задач и достоверности при диагностике главных элементов электрических аппаратов на стадиях их разработки, производства, хранения и эксплуатации.

## **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Практическая значимость работы заключается в создании и апробации новых эффективных способов и устройств формирования покрытий методами ионных технологий.
2. Разработаны устройства непрерывной функциональной диагностики величины переходного сопротивления и рабочей температуры выключателя после каждого многократного повторяющегося переключения в условиях эксплуатации.
3. Разработаны технологические операции комбинированной обработки медных контактов электрических аппаратов, включающие химическую полировку и имплантацию ионами молекулярного азота с энергией до 200 кэВ, дозы около  $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , обеспечивающие стабилизацию переходного сопротивления при длительном хранении и уменьшающие необратимую деградацию выключателей.
4. Разработан новый способ однолучкового динамического ионного перемешивания, применение которого для нанесения покрытий из никеля, вольфрама и серебра на медные контакты выключателей радикально увеличивает число циклов переключений с низкими значениями переходного сопротивления (меньше 25 мОм) и температуры (меньше 110 °С) и уменьшает число циклов с высокими их значениями (соответственно выше 45 мОм и 150 °С).

**Внедрение и использование** полученных результатов представлено следующим образом:

- внедрение технологии нанесения защитных покрытий блоков искровых промежутков вентильных разрядников с использованием однолучкового динамического ионного перемешивания в Производственном предприятии "Безполь", г. Мышков, Польша (акт внедрения);
- внедрение компьютерной установки непрерывной диагностики температуры и переходного сопротивления выключателей в Электромеханическом предприятии "Эльват", г. Вроцлав, Польша (акт внедрения).

## **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Разработанный и апробированный комплекс новых эффективных способов и устройств формирования и функциональной диагностики контактных материалов и электрических аппаратов на стадиях их разработки, производства, хранения и эксплуатации, содержащий:
  - источник ионов нового типа для имплантации металлов;
  - имплантатор для модификации металлов ионными технологиями;

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

7

- устройство непрерывной диагностики величины переходного сопротивления и рабочей температуры контакта после каждого многократного повторяющегося переключения;
- устройство для формирования покрытий методом динамического ионного перемешивания;
- программное обеспечение для управления, сбора данных и анализа результатов диагностики контактов электрических аппаратов;
- результаты расчета профилей распределения элементов в слоях, сформированных ионно-лучевыми технологиями.

Применение разработанного комплекса позволило установить физические механизмы процессов, протекающих при осуществлении ионных технологий и эксплуатационных воздействий на исходные материалы и элементы контактов электрических аппаратов в условиях, соответствующим реальным условиям их производства и эксплуатации.

2. Новый способ стабилизации параметров контактных пар электрических аппаратов при длительном хранении и снижения вероятности их необратимой деградации в процессе эксплуатации, отличающийся использованием комбинированной обработки рабочих поверхностей медных контактов с помощью химической полировки и модификации ионами  $N_2^+$ .
3. Модель периодического изменения переходного сопротивления контактных пар и самоочистки их рабочих поверхностей от пленки с повышенным электрическим сопротивлением, учитывающая эксплуатационные условия работы контактов (повышенную температуру и ионизационные процессы), осаждение продуктов деструкции материала корпуса на рабочую поверхность, циклическую ударную нагрузку при каждом переключении, накопление механических напряжений в переходном слое между пленкой и металлом до критического состояния. Модель согласуется с экспериментально наблюдаемыми особенностями циклического изменения параметров контактов, полученных в процессе непрерывной экспресс-диагностики контактного сопротивления после каждого многократно повторяющегося переключения, соответствующего реальным условиям длительной эксплуатации.
4. Результаты расчетов динамического ионного перемешивания для идентификации процессов изменения элементного состава в приповерхностной области контактов при одно- и двупучковой высокодозной имплантации ионов, а также ионно-ассистированного осаждения слоев для разработки и реализации новых высокоэффективных способов и устройств формирования многокомпонентных и стабильных покрытий контактов электрических аппаратов.

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя состоял в постановке задач, выполнении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов. Соавторы участвовали в выполнении некоторых теоретических расчетов, в разработке и создании экспериментальных установок, решении ряда конкретных задач, а также в обсуждении результатов.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

8

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на четырех Международных конференциях "Взаимодействие излучений с твердым телом" (Минск) I – 1995г., II – 1997г., III – 1999г., IV – 2001г.; научной конференции „Nowe materiały i technologie w elektrotechnice” (Łódź, Polska, 1995 r.); на трех международных симпозиумах „New electrical and electronic technologies and their industrial implementation” (Polska, Lublin – 1995r., Kazimierz Dolny – 2001r., Zakopane – 2003r.); научном симпозиуме „Nowoczesne technologie elektrostacyjne” (Polska, Białystok, 1995r.); V и VII республиканских семинарах „Techniki jonowe” (Polska, Szklarska Poręba – 1996, 2001r.); II научной конференции „Postępy w elektrotechnologii” (Polska, Szklarska Poręba, 1996 r.); двух научно-технических конференциях „Jakość wyrobów elektrotechnicznych i elektronicznych” (Polska, Nałęczów – 1996r., Świnoujście – 1998r.); двух IV и VII семинарах „Powierzchnie i struktury cienkowarstwowe” (Polska, Kazimierz Dolny, 1996 и 1999r.); Международном Симпозиуме „Ion implantation of science and technology” (Polska, Nałęczów, 1997); III школе-конференции „Metrologia wspomagana komputerowo” (Polska, Zegrze k/Warszawy, 1997r.); трех научно-технических симпозиумах „Technologie elektrostacyjne i elektronowo-jonowe” (Polska, Białystok, V – 1997, VI – 1999, VII – 2001 r.); конференции "Физика плазмы и плазменные технологии" (Минск, 1997 г.); трех международных симпозиумах „Ion implantation and other application of ions and electrons” (Polska, Kazimierz Dolny, II – 1998, III – 2000, IV – 2002 r.); III Международной конференции „Plasma physics and plasma technology” (Minsk, 2000); VII научно-техническом симпозиуме „Elektrotechnologie w nowoczesnym przemyśle” (Polska, Białystok, 2001 r.); IV Международной конференции „Modification of Properties of Surface Layers on Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams” (Ukraine, Feodosiya, 2001); II Европейской конференции „Nuclear science and its application” (Republic of Kazakhstan, Almaty, 2002).

**Опубликованность результатов.** Все выводы и результаты диссертационной работы подтверждены публикациями в двух монографиях (1 – единолично), 18 статьях в научных журналах (3 – без соавторов), 28 статьях в сборниках материалов научных конференций (2 – без соавторов), 11 тезисах докладов, 7 патентах и положительных решениях по заявкам на патенты. Общее количество страниц опубликованных материалов – 567 стр. (281 – без соавторов).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников из 173 наименований, приложения. Работа изложена на 213 страницах, включая 96 рисунков на 95 страницах, приложение на 9 страницах.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены результаты исследований влияния ионной имплантации на приповерхностные слои меди и ее сплавов. Имплантация высоких доз ионов сопровождается появлением особенностей в поведении примесей и дефектов структуры, а также характеризуется формированием новых фаз. Подобные явления происходят в металлах во время ионного перемешивания, а также при динамическом ионном перемешивании. В литературе указывается на то, что ионная имплантация приводит к улучшению механических и трибологических свойств, увеличивает коррозионную стойкость, а также каталитическую активность некоторых материалов.

Существует небольшое количество публикаций, касающихся ионной модификации электротехнических материалов, таких как медь и ее сплавы.

Представлена конструкция имплантатора МКРСz-99 разработанного, построенного и запущенного в эксплуатацию на кафедре электрических аппаратов и ТВН Люблинского технического университета (рис. 1). Имплантатор обеспечивает высокую производительность ионно-лучевых обработок, относительно дешев и удобен в эксплуатации, так как не содержит магнитного сепаратора ионного пучка.

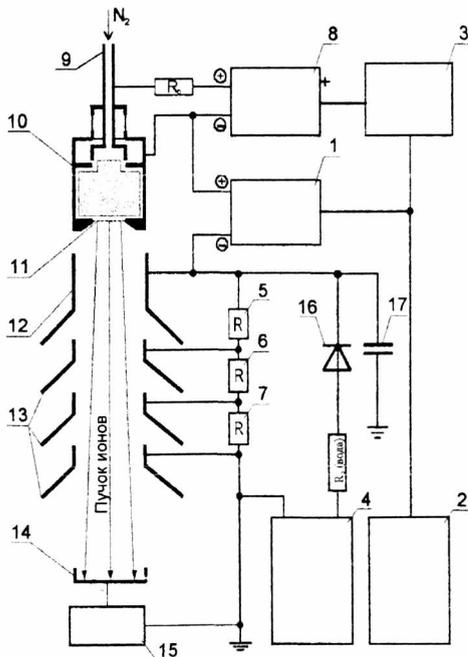


Рис. 1. Электрическая схема и основные узлы имплантатора МКРСz-99:

- 1 – высоковольтный источник питания 35кВ/5мА;
- 2 – сепарационный трансформатор 220В/220В с изоляцией между обмотками 150 кВ;
- 3 – сепарационный трансформатор 220В/220В с изоляцией между обмотками 50 кВ;
- 4 – высоковольтный источник питания 150 кВ/15 мА;
- 5, 6, 7 – элементы делителя напряжения;
- 8 – источник питания 600 В/1 А;
- 9 – источник ионов;
- 10 – экстракционное отверстие;
- 11 – экстракционный электрод;
- 12 – ускорительная система;
- 13 – ионный пучок;
- 14 – держатель образцов;
- 15 – измеритель заряда;
- 16 – высоковольтный выпрямитель;
- 17 – высоковольтный конденсатор

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

30

Существенным преимуществом данного технического решения является возможность нанесения покрытий из любых материалов, в том числе с высокими температурами испарения, таких как вольфрам, молибден, никель и др., а также многокомпонентных покрытий, что является принципиальным при создании надежных контактов электрических аппаратов [18, 30, 41, 46, 64].

9. Методом динамического ионного (ионы  $N_2^+$ ) перемешивания с использованием способа и устройства формирования покрытий на образцы меди нанесены золото, серебро, молибден, титан, хром и вольфрам. Из измерений распределения атомов по глубине методом Резерфордского обратного рассеяния и результатов расчетов ионного перемешивания для конуса из золота установлено, что рассчитанное и экспериментально определенное количество нанесенных атомов составляют  $2,01 \cdot 10^{16}$  ат.Аu/см<sup>2</sup> и  $2,48 \cdot 10^{16}$  ат.Аu/см<sup>2</sup>, соответственно.

Установлено, что нанесение на контакты, с помощью разработанных способа и устройства динамического ионного перемешивания, покрытий из никеля, вольфрама и серебра радикально увеличивает число циклов переключений с низкими значениями (меньше 25 мОм) переходного сопротивления – соответственно в 5,5; 4,8 и 2,7 раза и температуры (ниже 110°C) – соответственно в 14, 12 и 7 раз. При этом существенно уменьшилось число циклов с высокими (выше 45 мОм) значениями сопротивления – соответственно в 1,5; 2,4 и 2 раза и рабочие температуры (выше 150°C) соответственно в 2,5; 3 и 7 раз. В результате достигнуто существенное снижение переходного сопротивления, рабочей температуры контактов и, как следствие, – уменьшение вероятности их катастрофической деградации [1, 17, 42, 48].

10. Разработан и апробирован новый эффективный комплекс способов и устройств формирования и диагностики контактных материалов и контактов электрических аппаратов, включающих в свой состав:

- источник ионов нового типа, предназначенный для имплантации металлов;
- имплантатор для модификации металлов ионными технологиями;
- устройства непрерывной диагностики величины переходного сопротивления и рабочей температуры контакта после каждого многократно повторяющегося переключения;
- устройства для формирования покрытий методом динамического ионного перемешивания;
- программное обеспечение для управления сбором данных и анализ результатов диагностики контактов электрических аппаратов;
- прогностические результаты расчетов профилей глубинного и латерального распределения элементов в слоях, сформированных ионно-лучевыми технологиями.

Совокупность разработанных способов и устройств позволяет сократить сроки и повысить достоверность функциональной диагностики главных элементов электрических аппаратов как на стадии их разработки, производства, так и во

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

31

время хранения и эксплуатации. Кроме того, это позволило установить физические механизмы процессов, протекающих при ионной имплантации и эксплуатационных воздействиях на исходные материалы и элементы контактов электрических аппаратов в условиях, близких к реальным условиям производства и эксплуатации [1, 6, 9, 10, 20, 47, 60 –66].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии:

1. Karwat Cz. Zastosowanie technik jonowych do modyfikacji materiałów elektrotechnicznych (Применение ионных технологий для модификации электротехнических материалов). — Lublin: Wydawnictwa Uczelniane, 2003. — 145 s. (на польском языке).
2. Żukowski P., Komarov F., Karwat Cz., Komarov A. Wybrane zagadnienia teorii i zastosowań implantacji jonowej (Избранные вопросы теории и применения ионной имплантации). — Lublin: Wydawnictwa Uczelniane, 2003. — 190 s. (на польском языке).

### Статьи в научных журналах:

3. Żukowski P., Karwat Cz., Komarov F.F., Komarov A.F., Latuszyński A. Formation of copper nitrides in the course of implanting cooper with large doses of nitrogen ions // Phys. Stat. Sol. — 1996. — Vol. 157. — P. 373-378.
4. Karwat Cz., Żukowski P., Worku Megersa M. Mechanical and electrical properties of thin brass layers produced by means of ion implantation // Electron Technology. — 1997. — Vol. 30, № 2. — P. 149-156.
5. Жуковский П., Партыка Я. Карват Ч. Применение ионной имплантации в электротехнике // Энергетика. — 1997. — № 9-10. — С. 32-35.
6. Жуковский П., Карват Ч., Лозак М., Кищак К., Лиськевич Е. Свойства поверхностных слоев меди и латуни, облученных ионами азота, в зависимости от режима имплантации // Вакуумная техника и технология. — 1998. — Т. 8, № 1. — С. 13-15.
7. Komarov A.F., Komarov F.F., Żukowski P., Karwat Cz., Shukan A.L. Simulation of the process of high dose ion implantation in solid targets // Nukleonika. — 1999. — Vol. 44, № 2. — P. 363-367.
8. Żukowski P., Karwat Cz., Łozak M., Liškiewicz J. A new method for determining changes in hardness of implanted materials // Nukleonika. — 1999. — Vol. 44, № 2. — P. 289-292.
9. Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Шукан А.Л., Жуковский П., Карват Ч. Моделирование процесса высокодозной ионной имплантации в твердотельную мишень методом Монте-Карло // Вести Нац. Акад. наук Беларуси. Сер. физико-технических наук. — 1999. — № 3. — С. 19-23.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

32

10. Комаров Ф.Ф., Жуковский П., Карват Ч., Комаров А.Ф. Моделирование процесса имплантации меди большими дозами ионов азота с одновременным осаждением углеродной пленки // Докл. Национ. Акад. Наук Беларуси. Сер. физика. — 1999. — Т. 43, № 6. — С. 42-44.
11. Карват Ч., Жуковский П., Козак М., Кишак К., Лиськевич Е. Высокодозный имплантатор ионов в металлы // Физика и химия обработки материалов. — 2001. — № 1. — С. 39-43.
12. Карват Ч., Жуковский П., Меконен В. Мегерса. Измерения переходного сопротивления выключателей к приборам в процессе эксплуатации // Энергетика. — 2001. — № 2. — С. 43-50.
13. Komarov A.F., Komarov F.F., Żukowski P., Karwat Cz., Kamarou A.A. Simulation of the process of two-beam ion implantation in multilayered and multicomponent targets // Vacuum. — 2001. — Vol. 63, No 4. — P. 495-499.
14. Karwat Cz. The effect of nitrogen ion irradiation of the operational temperature regime of working surfaces of electrical contacts // Vacuum. — 2001. — Vol. 63, No 4. — P. 665-669.
15. Карват Ч. Установка для нанесения слоев методом динамического ионного перемешивания // Вестн. Белорус. Гос. Университета. Сер. 1, Физика, Математика, Информатика. — 2001. — № 1. — С. 31-34.
16. Karwat Cz., Kiszczak K., Kozak Cz., Żukowski P. Własności warstw miedzi domieszkowanych atomami złota i niklu metodą dynamicznego mieszania jonowego // Elektronika. — 2001. — № 7. — С. 11-13.
17. Карват Ч. Изменение эксплуатационных свойств контактных пар выключателей для приборов с поверхностными слоями модифицированными методом динамического ионного перемешивания // Энергетика. — 2001. — № 6. — С. 33-37.
18. Komarov F.F., Komarov A.A., Żukowski P., Karwat Cz., Sielanko J., Kozak Cz., Kiszczak K. Ion beam assisted deposition of metal layers using a novel one beam system // Vacuum. — 2003. — Vol. 70, No 2-3. — P. 215-220.
19. Жуковский П., Карват Ч., Козак Ч. Определение энергии электрической дуги в выключателях переменного тока // Энергетика. — 2003. — № 1. — С. 3-8.
20. Комаров Ф.Ф., Комаров А.А., Жуковский П., Карват Ч., Селянко К., Кишак К., Комаров А.Ф. Экспериментальная установка с одним ионным пучком и новый метод одновременного осаждения слоев металлов и имплантации // ЖТФ. — 2003. — Т. 73, № 5. — С. 109-114.

## Статьи в сборниках материалов конференции:

21. Żukowski P., Karwat Cz., Partyka J., Komarov A.F., Komarov F.F. Własności warstwy wierzchniej materiałów stykowych implantowanych jonami azotu // Nowe materiały i technologie w elektrotechnice: Mater. Konf. — Łódź, 1995. — S. 238-241.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

33

22. Karwat Cz., Żukowski P., Łozak M., Liśkiewicz J. Stan powierzchni materiałów stykowych poddanych implantacji jonowej // Nowe technologie elektryczne i elektroniczne oraz ich wdrażanie w przemyśle: Mater. Konf. — Lublin, 1995. — S. 150-155.
23. Komarow A.F., Komarow F.F., Karwat Cz., Żukowski P. Powstawanie faz azotków miedzi podczas implantacji miedzi i mosiądzu jonami azotu // Nowoczesne technologie elektrostatyczne: Proc. IV Symp. — Białystok, 1995. — C. 116-123.
24. Karwat Cz., Żukowski P., Liśkiewicz J. Elektryczne i mechaniczne własności implantowanych warstw miedzi // Techniki jonowe: Mater. V Ogólnopolskie Seminar. — Szklarska Poręba, 1996. — S. 63-66.
25. Karwat Cz., Żukowski P., Komarow F.F., Pilko V.V., Liśkiewicz J. Własności elektryczne i mechaniczne miedzi implantowanej jonami azotu // Postępy w elektrotechnologii: Mater. II Konf. — Szklarska Poręba, 1996. — S. 215-218.
26. Karwat Cz., Żukowski P., Komarow F.F., Liśkiewicz J. Zastosowanie implantowanych materiałów jako sposób podwyższania jakości wyrobów // Jakość wyrobów elektrotechnicznych i elektronicznych: Mater. II Konf. — Nałęczów, 1996. — S. 214-218.
27. Żukowski P., Karwat Cz., Komarow F., Worku Megersa M. Własności miedzi i mosiądzu implantowanych dużymi dawkami jonów azotu // Jakość wyrobów elektrotechnicznych i elektronicznych: Mater. II Konf. — Nałęczów, 1996. — S. 219-223.
28. Komarow F.F., Komarow A.F., Pilko V.V., Żukowski P., Karwat Cz. Chemical composition and mechanical properties of copper surface layers implanted with big doses of nitrogen // Ion implantation of science and technology: Mater. Internat. Symp. — Nałęczów, 1997. — P. 38-41.
29. Żukowski P., Karwat Cz., Komarow F.F., Liśkiewicz J., Mączka D. Surface layers of brass implanted with nitrogen ions tested by means of the RBS method // Ion implantation of science and technology: Mater. Internat. Symp. — Nałęczów, 1997. — P. 42-47.
30. Karwat Cz., Żukowski P., Kiszczak K. A stand for layer deposition by means of dynamic ion mixing // Ion implantation of science and technology: Mater. Internat. Symp. — Nałęczów, 1997. — P. 171-175.
31. Karwat Cz., Żukowski P., Partyka J. Pomiar parametrów elektrycznych materiałów przewodzących poddanych implantacji jonowej // Metrologia wspomagana komputerowo: Mater. III Szkoła-Konf. — Zegrze k/Warszawy, 1997. — S. 283-288.
32. Karwat Cz., Żukowski P., Partyka J. Wpływ zmian mikrotwardości spowodowanych implantacją jonową na własności stykowe miedzi i mosiądzu // Technologie elektrostatyczne i elektronowo-jonowe: Mater. V Symp. — Białystok, 1997. — S. 82-87.
33. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Пилько В.В., Миронов А.М., Жуковский П., Карват Ч. Исследование износостойких покрытий, созданных в процессе

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

34

- ионно-ассистируемого осаждения углерода // Физика плазмы и плазменных технологий: Матер. II конф.: В 3 т. — Минск, 1997. — Т. 3. — С. 570-577.
34. Żukowski P., Karwat Cz., Komarow A.F., Komarow A.A. Symulacja komputerowa procesów implantacji dużych dawek jonów azotu do miedzi // Jakość energii elektrycznej i wyrobów elektrotechnicznych: Mater. IV Konf. — Świnoujście, 1998. — S. 254-261.
35. Żukowski P., Karwat Cz., Łozak M., Liśkiewicz J. A new method for comparing microhardness of implanted materials // Ion implantation and other application of ions and electrons: Proc. II Internat. Symp. — Kazimierz Dolny, 1998. — P. 137-139.
36. Żukowski P., Karwat Cz., Kozak M., Liśkiewicz J., Kiszczak K., Łozak M. Badanie zmian własności stykowych miedzi bezpośrednio w trakcie implantacji // Technologie, procesy i urządzenia elektrostatyczne oraz jonowe: Mater. VI Symp., Rajgród, 23-24 wrzesień 1999. — Rajgród, 1999. — S. 153-159.
37. Карват Ч., Жуковский П., Лиськевич Е. Ионная имплантация электротехнических материалов // Взаимодействие излучений с твердым телом: Матер. III междунар. конф. — Минск, 1999. — С. 46-48.
38. Карват Ч., Жуковский П., Козак М., Кишак К., Лиськевич Е. Установка для ионной имплантации металлов // Взаимодействие излучений с твердым телом: Матер. III междунар. конф. — Минск, 1999. — С. 141-143.
39. Karwat Cz. Testing of working temperature of switches with nitrogen-ion implanted contacts // Ion Implantation and other Application of Ions and Electrons: Mater. III Internat. Symp. — Kazimierz Dolny, 2000. — P. 43-44.
40. Komarow A.F., Komarow F.F., Mironov A.M., Pilko V.V., Żukowski P., Karwat Cz. Simulation of the process of high dose ion implantation in multilayered structures // Plasma Physics and Plasma Technology. III Internat. Conf.: In 2 v. — Minsk, 2000.—Vol. II — P. 421-424.
41. Жуковский П., Карват Ч., Кишак К., Комаров Ф., Козак Ч., Лиськевич Е., Лозак М. Модификация приповерхностных слоев меди ионно-ассистируемым осаждением никеля // New electrical and electronic technologies and their industrial implementation: Mater. II Internat. Symp. — Kazimierz Dolny, 2001. — P. 68-71.
42. Karwat Cz., Żukowski P., Kozak Cz., Kiszczak K. Wytwarzanie powłok ochronnych styków aparatów rozłącznych metodą dynamicznego mieszania jonowego // Elektrotechnologie w nowoczesnym przemyśle: Mater. Symp., Bondary, 6-7.09, 2001. — Bondary, 2001. — S. 311-317.
43. Żukowski P., Karwat Cz. Properties and Application of Electro-technical Materials Modified by Ion Beam // Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams: Mater. IV Inter. Conf. — Feodosiya, Ukraine, 2001. — P. 94-95.
44. Карват Ч. Применение ионной технологии для модификации материалов и элементов электротехнических устройств // Взаимодействие излучений с твердым телом: Матер. конф. — Минск, 2001. — С. 347-350.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

35

45. Комаров А.Ф., Пилько В.В., Никифорова Н.Н., Емельянов В.А., Карват Ч. Формирование слоев  $S_{x \rightarrow 3}N_{y \rightarrow 4}$  методом высокодозной имплантации азота в систему  $Si_3N_4/C/Si_3N_4/Si$  // Взаимодействие излучений с твердым телом: Матер. конф. — Минск, 2001. — С. 28-30.
46. Komarou A.A., Komarov A.F., Pil'ko V.V., Emel'yanov V.A., Żukowski P., Karwat Cz., Kozak M., Kiszczak K. Ion beam assisted of layers on metals // Interaction of Radiations with Solids. — Minsk, 2001. — P. 344-346.
47. Komarov F.F., Kamysan A.S., Zukowski P., Mironov A.M., Karwat Cz., Kozak Cz., Kiszczak K. Ion beam assisted deposition of metal layers using a novel one beam system // Ion Implantation and other Application of Ions and Electrons: Mater. IV Internat. Symp. — Kazimierz Dolny, 2002. — P. 94 – 95.
48. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Пилько В.В., Жуковский П., Карват Ч., Козак Ч., Селянко К., Комаров А.Ф., Кищак К. Пространственное распределение атомов в покрытиях, нанесенных на медь с использованием нового метода ионно-асистируемого осаждения // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation. III Internat. Symp. — Zakopane, 2003. — P. 107-109.

## Тезисы докладов на конференциях:

49. Жуковский П., Карват Ч., Лозак М., Комаров Ф.Ф., Лиськевич Е. Модификация слоев меди и латуни ионной имплантацией // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. I междунар. конф., Минск, 16-19 окт. 1995. — Минск, 1995. — С. 125.
50. Жуковский П., Карват Ч., Латушинский А., Лиськевич Е., Мончка Д. Измерения контактных свойств металлов непосредственно в процессе ионной имплантации // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. I междунар. конф., Минск, 16-19 окт. 1995. — Минск, 1995. — С. 157.
51. Karwat Cz., Żukowski P., Worku Megersa M. Własności mechaniczne i elektryczne cienkich warstw mosiądzu wytwarzanych implantacją jonową // Powierzchnia i struktury cienkowarstwowe: IV Seminar. — Kazimierz Dolny, 1996. — S. 33.
52. Карват Ч., Кищак К. Контактные свойства меди и ее сплавов, имплантированных ионами азота // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. II междунар. конф. — Минск, 1997. — С. 141.
53. Жуковский П., Карват Ч., Лозак М., Кищак К., Лишкевич Е. Микротвердость имплантированных слоев меди и сплавов на ее основе // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. II междунар. конф. — Минск, 1997. — С. 116.
54. Komarov A.F., Komarov F.F., Żukowski P., Karwat Cz. Simulation of the process of high dose ion implantation in solid targets // Ion implantation and other application of ions and electrons: II Internat. Symp. — Kazimierz Dolny, 1998. — P. 161.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

36

55. Karwat Cz., Megersa Mekonnen W., Żukowski P. Badane styków rozłącznych implantowanych jonami azotu // Powierzchnie i Struktury Cienkwarstwowe: VII Seminar, Kazimierz Dolny, 15-18 wrzesień 1999. — Kazimierz Dolny, 1999. — S. 45.
56. Karwat Cz., Megersa Mekonnen W., Żukowski P. Badane styków rozłącznych implantowanych jonami azotu // Powierzchnie i Struktury Cienkwarstwowe: VII Seminar, Kazimierz Dolny, 15-18 wrzesień 1999. — Kazimierz Dolny, 1999. — S. 45.
57. Karwat Cz., W. Megersa Mekonnen, Żukowski P. Badane styków rozłącznych implantowanych jonami azotu // Powierzchnie i Struktury Cienkwarstwowe: VII Seminar, Kazimierz Dolny, 15-18 wrzesień 1999. — Kazimierz Dolny, 1999. — S. 45.
58. Komarov F.F., Komarou A.A. Żukowski P., Komarov A.F., Karwat Cz., Pil'ko V.V. Ion Beam assisted deposition of metal layers and nitrogen doping efficiency // Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams: IV Inter. Conf. — Feodosiya, Ukraine, 2001. — P. 48.
59. Komarov F.F., Kamyshan A.S., Żukowski P., Mironov A.M., Karwat Cz., Kozak M., Kiszczak K. Ion beam assisted of metal layers using a novel beam system // Nuclear Science and its Application: II Eurasian Conf. — Almaty, Institute of Nuclear Physics NNC PK, 2002. — P. 21- 23.

## Патенты и заявки на патенты:

60. Пат. 176165 В1 Польша. 176165 В1. МКИ G01N 27/00. Sposób pomiaru spadku napięcia na zestyku materiał implantowany-elektroda probiercza / Żukowski P., Karwat Cz., Komarow F.F., Latuszyński A., Liśkiewicz J., Mączka D., Partyka J., Węgierek P. — № P 309058; Заяв. 1995.06.08. Оpub. 1996.12.09. // Biul. Urzędu. Pat. (Польша) — 1996. — № 25. — S. 65; 1999.06.30. Wiad. Urz. Pat. — 1999. — № 4. — S. 514.
61. Пат. 180118 В1 Польша. МКИ G01N 27/00. Urządzenie do pomiaru spadku napięcia na implantowanym zestyku / Karwat Cz., Żukowski P., Liśkiewicz J., Komarow F.F. — № P 314919; Заяв. 1996.06.20. Оpub. 1997.12.22. // Biul. Urzędu. Pat. (Польша) — 1997. — № 26. — S. 75; Wiad. Urzędu Pat. — 2000. — № 12. — S. 1674.
62. Положительное решение по заявке на патент P 330439, Польша. МКИ G01N 3/40. Sposób pomiaru twardości metali / Żukowski P., Karwat Cz., Liśkiewicz J. (Польша) — Заявл. 1998.12.18; Оpubл. 2000.06.19 // Biul. Urzędu. Pat. — 2000. — № 13. — S. 71.
63. Положительное решение по заявке на патент P 337818, Польша. МКИ H01N 1/00. Sposób wytwarzania styków z miedzi do łączników w przyrządach / Karwat Cz., Żukowski P., Mekonnen Worku Megersa, Kozak Cz. M.

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

37

(Польша) – Заявл. 2000.01.11; Оpubл. 2001.07.16 // Biul. Urzędu. Pat. — 2001. — № 15. — S. 46.

64. Положительное решение по заявке на патент P 346511, Польша. МКИ G01N 33/00. Sposób nanoszenia warstw ochronnych na styki z miedzi / Karwat Cz., Żukowski P., Kozak Cz. M., Komarow F. F., Liśkiewicz J., Kiszczak K. (Польша) — Заявл. 2001.03.16; Оpubл. 2002.09.23 // Biul. Urzędu. Pat. — 2002. — № 20 — S. 41.
65. Положительное решение по заявке на патент P 357968, Польша. МКИ H05H 1/02. Źródło jonów pierwiastków gazowych do implantacji metali / Zukowski P., Kiszczak K., Kozak Cz. M., Karwat Cz. (Польша) — Заявл. 2001.12.23; Оpubл. 2003.08.18 // Biul. Urzędu. Pat. — 2003. — № 18 — S. 14.
66. Положительное решение по заявке на патент P 357969 Польша. МКИ G01N 27/00. Stanowisko do oceny trwałości łączników do przyrządów / Zukowski P., Kozak Cz. M., Karwat Cz. (Польша) — Заявл. 2001.12.23; Оpubл. 2003.08.18 // Biul. Urzędu. Pat. — 2003. — № 18 — S.12.



# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

38

## РЕЗЮМЕ

Карват Чеслав

### ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КОНТАКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Ключевые слова:** электротехнические материалы, контактные пары, ионная имплантация, динамическое ионное перемешивание, переходное сопротивление, микротвердость, профиль распределения примесей, ионный пучок, резерфордовское обратное рассеивание.

**Объекты исследований:** приповерхностные слои электротехнических материалов (медь, латунь) и контактных пар электрических выключателей неимплантированные, имплантированные ионами азота и модифицированные динамическим ионным перемешиванием атомами никеля, золота, вольфрама, серебра и молибдена при помощи ионов азота.

**Цель работы:** установить влияние предложенных ионно-лучевых технологий на свойства модифицируемых поверхностей электротехнических материалов и эксплуатационные параметры контактов выключателей, а также причины их изменения при использовании изготовленной аппаратуры и разработанных методов исследования.

Разработан и запущен в эксплуатацию имплантатор МКРСz-99, предназначенный для модификации металлов ионными технологиями. Эта установка позволяет также проводить диагностику процессов модификации непосредственно при выполнении операции ионно-лучевой технологии с помощью многократного чередования зондовых измерений переходного сопротивления внутри мишенной камеры. Сконструирован и изготовлен источник ионов нового типа предназначенный для имплантации металлов ионами газов. Установлено, что имплантация электротехнической меди, предназначенной для изготовления контактов электрических аппаратов, при оптимальных дозах и энергиях ионов азота, стабилизирует величину переходного сопротивления контактной пары при длительном хранении. Разработанный метод диагностики позволил установить принципиальное отличие характера периодических изменений сопротивления от катастрофической деградации выключателя. Разработана модель периодического изменения сопротивления контактных пар выключателей, учитывающая условия эксплуатации. Установлено, что химическая полировка медных контактов, имплантация ионов азота и комбинированная обработка, включающая химическую полировку и последующую имплантацию, приводят к снижению температуры контакта, с величиной которой непосредственно связана вероятность деградации выключателей. Проведены численные расчеты процессов изменения элементного состава в приповерхностной

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

39

области слоев металлов при одно и двухпучковой высокодозной имплантации, а также ионно-ассистируемом осаждении слоев. Разработаны новый способ и устройство для формирования покрытий методом динамического ионного перемешивания, дающие возможность нанесения покрытия из любых материалов, в том числе с высокими температурами испарения. Установлено, что нанесение на контакты покрытий из никеля, вольфрама и серебра радикально увеличивает число циклов переключений с низкими значениями переходного сопротивления. Установлены физические механизмы процессов, протекающих при ионной имплантации и эксплуатационных воздействиях на исходные материалы и элементы контактов электрических аппаратов в условиях, близких к реальным условиям производства и эксплуатации.

**Область применения:** физика конденсированного состояния, электрическое материаловедение.

## РЭЗЮМЕ

Карват Чэслаў

### ІЁННА-ПРАМЯНЁВАЕ ФАРМІРАВАННЕ ПАВЕРХНЕВЫХ СЛАЁЎ КАНТАКТАЎ ЭЛЕКТРЫЧНЫХ АПАРАТАЎ

**Ключавыя словы:** электратэхнічныя матэрыялы, кантактныя пары, іённая імплантацыя, дынамічнае іённае перамешванне, пераходнае супраціўленне, мікрацвёрдасць, профіль распарадкавання дамешкаў, іённы пучок, рэзерфордаўскае зваротнае рассеянне.

**Аб'екты даследаванняў:** прыпаверхневыя слаі электратэхнічных матэрыялаў (медзь, латунь) і кантактных пар электрычных выключальнікаў неімплантаваныя, імплантаваныя і мадэфікаваныя пры дапамозе іёнаў азоту дынамічным іённым перамешваннем атамамі нікеля, золата, вольфрама, срэбра і малібдэна.

**Мэта працы:** вызначыць уплыў прапанаваных іённа-прамянёвых тэхналогій на уласцівасці мадэфікаваных паверхняў электратэхнічных матэрыялаў і эксплуатацыйныя параметры кантактаў выключальнікаў, а таксама прычыны іх змянення пры выкарыстанні вырабленай апаратуры і распрацаваных метадаў даследавання.

Распрацаваны і запушчаны ў эксплуатацыю імплантатар МКРСz-99, прызначаны для мадэфікавання металаў іённымі тэхналогіямі. Такая прылада дазваляе таксама праводзіць дыягностыку працэсаў мадэфікавання непасрэдна пры выкананні аперацыі іённа-прамянёвай тэхналогіі з дапамогай шматразовага чаргавання зондавых вымярэнняў пераходнага супраціўлення унутры мішэннай камеры. Сканструявана і выраблена крыніца іёнаў новага

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

40

тыпу, прызначаная для імплантацыі металаў іёнамі газаў. Вызначана, што імплантацыя электратэхнічнай медзі, прызначанай для вырабу кантактаў электрычных апаратаў, пры аптымальных дозах і энергіях іёнаў азота стабілізуе велічыню пераходнага супраціўлення кантактнай пары пры працяглым захоўванні. Распрацаваны метады дыягностыкі дазволіў выявіць прыцыповае адрозненне характару перыядычных змяненняў супраціўлення, маючых месце пры катастрофічнай дэградацыі выключальнікаў. Распрацавана мадэль перыядычнага змянення супраціўлення кантактных пар, улічваючы эксплуатацыйныя ўмовы функцыянавання кантактаў. Вызначана, што хімічная паліроўка медных кантактаў, імплантацыя іёнаў азота і камбінаваная апрацоўка, уключаючы хімічную паліроўку пачарговую імплантацыю, прыводзяць да паніжэння тэмпературы кантакта, з велічынёй якой непасрэдна звязана верагоднасць дэградацыі выключальнікаў. Выкананы лічбавыя разлікі працэсаў змянення элементнага складу ў прыпаверхневай вобласці слаёў металаў пры адной і двухпучковай высокадознай імплантацыі, а таксама іённа-асіставаным асаджэнні слаёў. Распрацаваны новы спосаб і прылада для фарміравання пакрыццяў метадам дынамічнага іённага перамешвання, дазваляючы наносіць пакрыцці з любых матэрыялаў, у тым ліку з высокімі тэмпературамі выпарэння. Вызначана, што нанясенне на кантакты пакрыццяў з нікелю, вальфраму і срэбра радыкальна павялічвае колькасць цыклаў пераключэнняў з нізкімі значэннямі пераходнага супраціўлення. Вызначаны фізічныя механізмы працэсаў, маючых месца пры іённай імплантацыі і эксплуатацыйных уздзеяннях на зыходныя матэрыялы і элементы кантактаў электрычных апаратаў ў умовах, блізкіх да рэальных умоў вытворчасці і эксплуатацыі.

**Вобласць выкарыстання:** фізіка кандэнсаванага стану, электрычнае матэрыялазнаўства.

## SUMMARY

Czeslaw Karwat

### ION BEAM FORMING OF TOP LAYERS OF ELECTRIC APPARATUS CONTACTS

**Key words:** electrotechnical materials, contacts, ion implantation, ion beam assisted deposition (IBAD), contact resistance, microhardness, profiles of impurity distributions, ion beam, reverse Rutherford scattering.

**Investigated objects:** top layers of electrotechnical materials (copper, brass) both non-implanted and implanted with nitrogen ions and modified by ion beam assisted deposition of the following atoms: Ni (nickel), gold (Au), tungsten (W),

# ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

41

silver (Ag), and molybdenum (Mo) with the application of nitrogen (N) ions; the surface of circuit-breakers was subject to the same ion treatment.

**Purpose of the work:** to determine the influence of the suggested ion technologies on the properties of electrotechnical materials' modified surface and to state the exploitation parameters of contact circuit-breakers as well as to specify the reason for their modifications using designed apparatus and elaborated research methods.

MKPCz-99 implanter for the purpose of metals' modification with ion technologies has been designed and activated. Such device enables to diagnose modification processes directly during the application of ion technologies due to repeated measurements of contact resistance supported with the sampling probe inside the disk chamber. The source of new ion generation assigned for metal implantation with gas ions has been designed. The investigations revealed, that the implantation of electrotechnical copper used in the manufacture of the contacts for electric apparatus at optimal dose and energy of nitrogen (N) ions can stabilize the value of the contact transition resistance at long seasoning. Elaborated diagnostic method allowed to define principal differences of the periodic changes of the resistance from disastrous degradation of the connector. The model of periodic changes of the connector's transition resistance was elaborated that takes into account their exploitation conditions. It was defined, that chemical polishing of copper contacts, nitrogen ions implantation as well as the combined treatment comprising chemical polishing followed by the implantation leads to the decrease of contact temperature to the value that is directly related to the probability of circuit-breakers' degradation. Numerical calculations of the processes related to the change in chemical constitution at near-surface layer of the metals during single or twice-beam implantation of big dose as well as ion beam assisted deposition were used. New method and the device for forming the covers by the application of ion beam assisted deposition method that allows to spread the covers made of various materials including those of high evaporation temperature have been elaborated. It was revealed, that spreading the contact with the covers made of Ni (nickel), tungsten (W) and silver (Ag) radically increase the joining cycles of low contact resistance values. Physical mechanisms of the processes that occur during ion implantation as well as exploitation impact on both initial material and contact elements of electric apparatus in the conditions close to real manufacture and exploitation surrounding were determined.

**The scope of application:** solid-state physics, electric materials science.