

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

**ДУВАНОВ**  
Сергей Михайлович

**РЕЗОНАНСНОЕ УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ПРОТОНОВ  
И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ  
В АНАЛИЗЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков — 1997



00729231 (O)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Институте прикладной физики Национальной академии наук Украины, г. Сумы и в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, академик НАН Украины  
Сторижко Владимир Ефимович (ИПФ НАН Украины, г.Сумы)  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Кобзев Александр Павлович (ОИЯИ, г.Дубна).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Немашкало Борис Андреевич (ННЦ ХФТИ, г.Харьков)  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Федорец Иван Дмитриевич (ХГУ, г.Харьков)

Ведущая организация: Национальный университет имени Тараса Шевченко (г.Киев).

Защита диссертации состоится "4" июля 1997 года в "15<sup>00</sup>" час. на заседании Специализированного ученого совета Д 02.02.12 при Харьковском государственном университете по адресу: 310108, г.Харьков-108, пр-т Курчатова, 31, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Харьковского государственного университета по адресу: 310077, г.Харьков, пл.Свободы, 4.

Автореферат разослан "6" мая 1997 года.

Ученый секретарь Специализированного совета,  
доктор физико-математических наук

Азаренков Н.А.

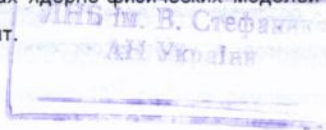
## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Ядерно-физические методы находят широкое применение при изучении распределений концентрации примесей по глубине приповерхностных слоев твердых тел и решении многих других задач. Среди этих методов особое место занимает метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) легких ионов (чаще всего протонов и ионов гелия) из-за его простоты и информативности. Одним из основных достоинств метода РОР является возможность определять профили распределения элементов по глубине без разрушения образца. Информация о массе рассеивающих атомов и глубине их залегания содержится в энергетических спектрах. Одновременно можно определять содержание нескольких химических элементов в образце. При оптимальных энергиях (около 2-х МэВ) сечение упругого рассеяния ионов гелия мало отличается от сечения кулоновского рассеяния, эффективность регистрации ионов с помощью полупроводниковых детекторов близка к 100 %, тормозные способности ионов в этом диапазоне энергий известны с достаточной точностью, поэтому концентрация исследуемого элемента может быть измерена этим методом даже без применения стандартов с точностью 1-5 %. Оптимальные условия применения метода соответствуют случаю, когда масса определяемого элемента больше массы ядер матрицы.

Квадратичная зависимость сечения резерфордовского рассеяния от порядкового номера ядра мишени приводит к существенному понижению чувствительности анализа концентрации легкой примеси в тяжелой матрице. Преодолеть эти трудности в некоторых случаях удается путем применения дополняющей методики, основанной на регистрации под обратными углами резонансных протонов, упруго рассеянных на легких ядрах.

С точки зрения применения в прикладных аналитических целях резонансное упругое рассеяние протонов на легких ядрах интересно тем, что в комбинации с методом РОР ионов  ${}^4\text{He}$  позволяет существенно расширить диапазон анализируемых примесных элементов и глубин залегания. Регистрация резонансных протонов может быть реализована на том же экспериментальном оборудовании, что и спектроскопия РОР ионов  ${}^4\text{He}$ .

Потенциально ценные аналитические возможности резонансного упругого рассеяния протонов используются не в полной мере из-за недостаточной полноты и точности базы данных по сечениям. Расчеты же сечений в рамках ядерно-физических моделей пока приводят к менее точной их оценке, чем эксперимент.



Применение отдельно одной из методик, зачастую не позволяет провести полный анализ распределения элементов по глубине образца. Поэтому возникает необходимость комбинирования взаимно дополняющих друг друга методов анализа.

Имплантация ионов получила широкое распространение при создании материалов, обладающих заданными свойствами. Новые возможности в этом направлении открывает метод совместного использования осаждения и имплантации ионов (образуемых в плазменных источниках), получившего название метода динамического ионного перемешивания (ДИП). В англоязычной литературе за этим методом укрепилось название IBAD (Ion Beam Assisted Deposition). Получаемые данным методом твердые покрытия (оксиды, карбиды, нитриды металлов и другие соединения) характеризуются большой плотностью, малыми размерами кристаллитов, плавко и хорошо контролируемым составом, большой толщиной (обычно несколько микрон). Покрытия обладают улучшенными адгезионными, антикоррозионными, антифрикционными, декоративными и другими свойствами.

Важность практических результатов, полученных в ДИП-технологии, требует научно обоснованной теории, которая до сих пор не создана. Существующие же теоретические подходы носят дискуссионный характер.

Облучение керамики на основе нитрида бора и поликора высокодозными и интенсивными потоками многозарядных ионов и последующая термообработка формируют в модифицированном слое квазиравновесную систему из аморфизованного состояния, новых соединений, измельченных структурных фрагментов основной фазы и дефектов высокой концентрации. Меняя режимы имплантации и термообработки, можно в широких пределах изменять свойства модифицированного слоя. Причины значительного изменения этих свойств после ионно-термической обработки пока не установлены.

#### Целью работы являлось:

- измерение дифференциальных сечений рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1,73 МэВ под углом  $170^\circ$  и использование полученных сечений, а также сечений рассеяния на других легких ядрах в элементном анализе с целью повышения чувствительности анализа концентрации легких примесных ядер в более тяжелой матрице;

- создание методики на основе совместного использования POP, изолированных резонансов в упругом рассеянии протонов (РезОР) и протонов отдачи (ПО) для

получения профилей распределения элементов по глубине стекол и керамики, модифицированных ионно-лучевой обработкой;

- исследование профилей распределения элементов по глубине слоев стекол, модифицированных с использованием новых режимов осаждения атомов Ti, Al, Cu;

- исследование зависимости распределения элементов по глубине приповерхностных слоев и поверхностной электропроводности керамики на основе нитрида бора и поликора, имплантированной ионами  $Ti^{+n}$  от температуры последующего отжига.

#### Научная новизна.

1. Уточнены экспериментальные данные по дифференциальным сечениям рассеяния  $^{12}C(p,p)^{12}C$  в области изолированного резонанса при энергии 1,73 МэВ под углом  $170^\circ$ .

2. Существенно повышена чувствительность анализа концентрации примесных ядер углерода (в 20 раз), азота (в 10 раз), кислорода (в 3 раза) в матрицах, содержащих более тяжелые элементы, в том числе и кремний, по сравнению со спектрометрией POF ионов  $^4He$ . Повышение чувствительности анализа достигнуто как за счет использования двух резонансов в рассеянии  $^{12}C(p,p)^{12}C$  и  $^{14}N(p,p)^{14}N$  при энергиях 1,73 МэВ и 1,74 МэВ, соответственно, и рассеяния  $^{16}O(p,p)^{16}O$ , так и за счет наличия минимума в сечении рассеяния  $^{28}Si(p,p)^{28}Si$  при энергии 1,66 МэВ под углом  $170^\circ$ .

3. Впервые произведен полный неразрушающий количественный анализ профилей распределения элементов по глубине приповерхностных слоев стекол и керамики, модифицированных ионно-термической обработкой.

4. Впервые исследована эффективность синтеза оксидной фазы и глубина взаимного перемешивания элементов на границе раздела покрытие-стекло в зависимости от способа осаждения ионов металлов. Показано, что оксиды более эффективно синтезируются во время формирования покрытия при ДИП-обработке. Обнаружено выщелачивание напыленного алюминиевого покрытия и селективная диффузия в покрытие кремния и кислорода в результате ДИП-обработки и последующего магнетронного осаждения. Обнаружено, что в образцах стекол, модифицированных ДИП-обработкой ионами титана, величина глубины взаимного перемешивания покрытие-подложка превышает проективный пробег в 2 раза, а общая глубина модифицированного слоя - в 4 раза.

5. Впервые исследована зависимость распределения H, O, Ti по глубине и поверхностной электропроводности поликристаллической керамики на основе нитрида бора и поликора, имплантированной ионами  $Ti^{+n}$  (флюенс  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) от температуры

последующего отжига. Обнаружено, что при отжиге поликора в вакууме при температуре в интервале 830—1050°C происходит перераспределение профилей титана вблизи поверхности. Этот температурный интервал коррелирует с температурной, при которой наблюдается значительное изменение электропроводности полученного покрытия и литературными данными по термическому отжигу наведенных облучением дефектов в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -керамике. В нитриде бора обнаружено перераспределение профилей O и H по глубине в результате послеимплантационного отжига при температуре 830° C по сравнению с концентрацией в исходном имплантированном образце.

**Научная и практическая ценность** работы состоит в том, что:

- доказана и реализована возможность применения метода РезОР протонов, дающего более высокую чувствительность анализа концентрации легкой примеси в тяжелой матрице, чем метод POP ионов гелия;
- показано, что точность определения концентрации распределения элементов по глубине может быть доведена до точности измерения параметров резонанса в рассеянии  $^{12}\text{C}(\text{p},\text{p})^{12}\text{C}$ , составляющей 1-3 %;
- расширена возможность изучения распределения концентрации легких примесей по глубине при совместном применении POP, РезОР и ПО;
- изучены возможности новой технологии нанесения твердых металлизированных покрытий на стекла;
- оптимизированы режимы обработки стекол и керамики, что представляет большую практическую ценность и может быть немедленно использовано при решении многих технических задач.

**На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Уточнение экспериментальных данных по дифференциальным сечениям рассеяния  $^{12}\text{C}(\text{p},\text{p})^{12}\text{C}$  в области изолированного резонанса при энергии 1,726 МэВ под углом 170°.
2. Разработка методики обратного рассеяния протонов, позволившей повысить чувствительность анализа концентрации примесных атомов C, N и O в стеклах и керамике, модифицированных ионно-лучевой обработкой.
3. Разработка методики комплексного использования POP, РезОР и ПО, позволившей осуществить полный анализ концентрационных профилей элементов по глубине образцов стекол и керамики, обработанными импульсными интенсивными и высокодозными пучками многозарядных ионов металлов.

4. Результаты исследования глубины взаимного перемешивания переходного слоя покрытие-подложка и эффективности синтеза оксидной фазы в покрытиях на стеклах, образованных при различных способах осаждения ионов  $Ti^{+n}$ ,  $Al^{+n}$ ,  $Cu^{+n}$ .

5. Результаты исследования зависимости распределения элементов по глубине и поверхностной электропроводности нитрида бора и поликора, имплантированных ионами  $Ti^{+n}$  от температуры последующего отжига в вакууме .

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, список которых приводится в конце реферата.

**Личный вклад автора.** В работах [1,2,10,12] личное участие автора оценивается 70%, в работах [4-7] — 50%, в работах [3,8,11,14] — 30%, в работах [9,13] — 20%. В работах [1,2,10,12] автор поставил задачу, произвел измерения и обработку результатов измерений, принимал участие в интерпретации результатов и в написании работ, представлял работы на конференциях. В остальных работах автор производил измерения профилей распределения элементов по глубине, принимал участие в постановке задачи, интерпретации результатов и написании работ, представлял работы (кроме [4,5,9,13]) на конференциях и симпозиумах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на: 22-м Межнациональном совещании по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, Россия, 31 мая - 2 июня 1993 г.; 11-й Международной конференции по анализу на ионных пучках (IBA11), Балатонфюрд, Венгрия, 5-9 июля 1993 г.; Симпозиуме А Общества по исследованию материалов, Бостон, США, 28 ноября - 2 декабря 1993 г.; 8-й Международной конференции по модификации металлов ионными пучками (SMMIB'93), Каназава, Япония, 13-17 сентября 1993 г.; 10-й Международной конференции по технологии ионной имплантации (ИИТ'94), Катанья, Италия, 13-17 июня 1994 г.; 1-м Международном симпозиуме по ионным технологиям (BT'95), Дубна, Россия, 28 февраля - 4 марта 1995 г.; 4-м Русско-Немецко-Украинском аналитическом симпозиуме (ARGUS'96), Софрино, Россия, 25 февраля-3 марта 1996 г.; 1-м Международном симпозиуме по материаловедческим применениям ионно-пучковых технологий (MSAIBT'95), Зеехайм, Германия, 9-12 сентября 1996 г.

**Объем и структура.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 123 страницы, 26 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 46 наименований.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации дан обзор экспериментальных работ, посвященных измерению дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов на ядрах C, N, O и Si в диапазоне энергий 0,7 - 2,5 МэВ под обратными углами. Также проведен обзор литературы по сечениям конкурирующих ядерных реакций. Из обзора следует, что на сегодняшний день опубликовано ограниченное число работ по прецизионному измерению дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов, а в измеренных данных наблюдается значительный разброс (до десятков процентов). В частности, эксперимент по измерению сечений рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в настоящей работе был стимулирован ограниченным числом литературных данных, большим их разбросом и отсутствием критерия их выбора. В указанном энергетическом диапазоне другие ядерные реакции либо энергетически невозможны, либо величина их сечений на 1-3 порядка меньше величины сечений упругого рассеяния. Расчеты сечений в рамках ядерно-физических моделей пока приводят к менее точной их оценке, чем эксперимент.

**Во второй главе** описан эксперимент и представлены результаты по прецизионному измерению дифференциальных сечений рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1,73 МэВ под углом  $170^\circ$ . Эксперимент был выполнен в два этапа. На первом этапе была измерена относительная зависимость дифференциальных сечений в энергетическом диапазоне 1,65 - 1,8 МэВ на тонких мишенях без прецизионной абсолютной калибровки по энергии. Изменение энергии в этом сравнительно узком диапазоне контролировалось путем измерения поля 90-градусного магнита по ядерному магнитному резонансу. Мишень представляла собой тонкую самоподдерживающуюся пленку из естественного углерода, на которую напылен слой никеля и вольфрама (образец Ni-W/C). На втором этапе произведена прецизионная привязка резонанса по энергии и по абсолютной величине сечений. В этом эксперименте использованы следующие мишени: толстая пироуглеродная мишень (образец пироуглерода), слой углерода толщиной 1 мкм, напыленный на пластину кремния (образец C/Si) и железо-иттриевый гранат  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ .

Эксперимент по измерению функции возбуждения рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1,73 МэВ был выполнен с помощью камеры обратного рассеяния

на одном из каналов ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Две тонкие углеродные мишени и образец железо-иттриевого граната ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) были установлены в держателе образцов. Обратные рассеянные протоны регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным детектором под углом  $170^\circ$ . Экспериментальные спектры записывались и предварительно обрабатывались при помощи стандартной электроники и персонального компьютера. Спектры, полученные от  $Y_3Fe_5O_{12}$  использовались для калибровки шкалы канал-энергия спектрометрического тракта.

Тонкая мишень состояла из двух слоев: С и Ni-W. Толщины слоев, а также их состав, измерялись методом резерфордовского обратного рассеяния 2-х МэВ-ных ионов  $^4He$ . Эксперимент показал, что толщина металлизированного слоя составляет около 800 ангстрем на поверхности углеродной мишени толщиной около 5000 ангстрем. По всей толщине образца наблюдается также от 10% до 20% кислорода. Линейные размеры толщин слоев мишени, приводимые здесь, являются ориентировочными по двум причинам: неизвестна плотность мишени и имеются шероховатости на ее поверхностях. Наличие шероховатостей потребовало для описания спектра введения профиля водорода. Потери энергии протонов в слое Ni-W составляли около 3,6 кэВ, а в слое углерода - около 8,6 кэВ, что и позволяло считать эти мишени достаточно тонкими. Тем не менее, энергия взаимодействия корректировалась на потери энергии протонов и  $\alpha$ -частиц в тонких слоях Ni-W и углерода. Слой Ni-W был введен в мишень для нормировки сигнала от углерода на резерфордовский сигнал от Ni и W.

В естественном углероде присутствует около 1% более тяжелого изотопа  $^{13}C$  и на спектрах упруго рассеянных протонов сигнал от этого изотопа виден в виде небольшого пика, разрешенного от  $^{12}C$ -пика. Установлено, что изотоп  $^{13}C$  не вносит заметного вклада в ошибку измерения сечений рассеяния  $^{12}C(p,p)^{12}C$ . Поскольку выход от С нормируется на выход от W, то при измерении сечений исключаются систематические ошибки, обусловленные погрешностью при определении заряда падающих на мишень частиц и телесного угла.

Статистическая ошибка при измерении выходов для С и W составляла менее 1 % для всех экспериментальных точек. Сечения были измерены в энергетическом интервале 1,65 - 1,8 МэВ с шагом 5 кэВ.

Эксперимент на толстых углеродных мишенях был выполнен на двух симметричных каналах ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Вначале пучок протонов был выведен в канал, где размещалась система сканирования, позволяющая проводить прецизионные измерения начальной энергии пучка. После определения начальной энергии, пучок протонов

переводился на симметричный канал в камеру обратного рассеяния, где измерялась функция возбуждения рассеяния  $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$  на толстой углеродной мишени. После измерения спектра на канале камеры рассеяния пучок вновь переводился в канал системы сканирования, где еще раз измерялась начальная энергия пучка.

Система сканирования позволяла задавать потенциал мишени на два порядка точнее, чем энергию пучка методом ядерного магнитного резонанса. Прецизионное определение средней энергии и энергетического разброса в пучке осуществлялось путем измерения функции возбуждения реакции  $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$  в области узких резонансов, положение и ширина которых известны с достаточной точностью. Поскольку исследуемый резонанс в рассеянии  $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$  располагается при энергии 1,73 МэВ, то для прецизионной энергетической калибровки были выбраны два ближайших узких резонанса в реакции  $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$  при энергиях протонов 1799,9 кэВ и 1749,0 кэВ, соответственно. Калибровка энергетической шкалы проводилась путем непосредственного измерения потенциала сканирования с точностью 1 %. Цена канала в спектрах составляла 14 эВ. Были проведены измерения энергетических зависимостей резонансного выхода гамма-квантов из реакции  $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$  в области резонанса при энергии 1749,9 кэВ до и после эксперимента по измерению сечения рассеяния  $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$  на толстой мишени из пироуглерода. В результате измерений обнаружено незначительное относительное смещение максимумов энергетических зависимостей выхода  $\gamma$ -квантов, составившее 280 эВ, т.е. величину, соизмеримую с энергетическим разбросом пучка протонов. Таким образом, начальная энергия протонов во время эксперимента по измерению сечения рассеяния  $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$  оставалась практически неизменной и определенной с точностью не хуже 1 кэВ. Аналогичный результат был получен и в эксперименте на мишени C/Si.

Пучок протонов был переведен в канал камеры рассеяния после того, как была точно измерена его начальная энергия в эксперименте, описанном выше. Начальная энергия пучка протонов выбиралась несколько выше резонансной для того, чтобы на спектрах ОР протонов от толстых углеродных мишеней наблюдать весь резонанс рассеяния  $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$ .

На рис. 1. представлен спектр обратно рассеянных протонов от толстой мишени из пироуглерода. Начальная энергия пучка составляет 1,758 МэВ, угол рассеяния -  $170^\circ$ . Вместе с экспериментальным спектром приведены и расчетные спектры. Видно существенное рассогласование экспериментального спектра и спектра, вычисленного с использованием сечений работы [1]. Использование данных по сечениям из работы [1],

величина энергетического сдвига которых относительно данных настоящей работы составляет 6 кэВ, может привести к ошибке при анализе концентрационных профилей углерода до 250 нм по глубине. Наблюдается хорошее согласие экспериментального спектра и спектра, вычисленного с использованием данных по сечениям настоящей работы. Это согласие достигнуто в результате процедуры подгонки параметров резонанса. Подгонка производилась с использованием программы DVBS, в которую можно поочередно вводить те или иные данные по энергетическим зависимостям сечений рассеяния.

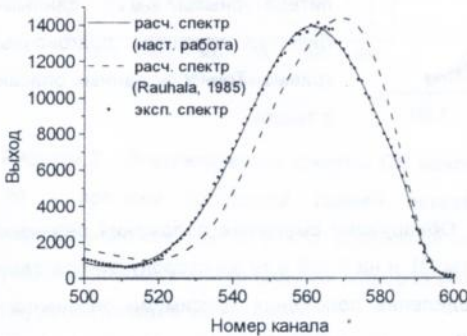


Рисунок 1 - Спектр протонов от толстого слоя пироуглерода (точки). Сплошной и пунктирной линиями показаны расчетные спектры. Статистическая ошибка экспериментальных данных составляет не более 1 %.

Абсолютная погрешность в определении энергетического положения резонанса определяется, в основном, погрешностью определения потерь энергии протонов в тонком слое углерода и составила 2 %. Энергетическое положение максимума в сечениях рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса найдено равным  $1,726 \pm 0,002$  МэВ. Ширина резонанса на полувысоте - 44 кэВ. Резонансный пик в спектре, измеренном от образца C/Si, полностью совпал с пиком на спектре от пироуглерода.

На рис. 2 представлены дифференциальные сечения, полученные в данной работе. Они приведены в сравнении с данными работ [1-3]. На рисунке вместе с экспериментальными точками приведены и подгоночные кривые. Точность относительного хода функции возбуждения в настоящей работе составляет не хуже 1 %. Воспроизводимость данных - не хуже 3 %. Точность абсолютных величин сечений в работе [1] оценена в 3-4 %, в [2] - 1-3 %, в [3] - 10-20 %. Сравнивая эти результаты, следует отметить, что величина сечения в максимуме резонанса согласуется с данными работ [1] и [2], по форме они тоже довольно близки, причем сечения, полученные в

настоящей работе полностью совпадают с результатами работы [1] в районе высокоэнергетического склона резонанса и именно здесь наблюдается максимальное

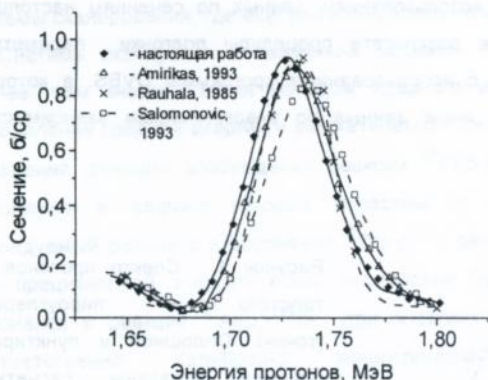


Рисунок 2 - Функция возбуждения рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1730 кэВ. Данные настоящей работы приведены в сравнении литературными данными. Линиями показаны подгоночные кривые. Точность данных описана в тексте.

расхождение с результатами работы [2]. Обнаружено смещение положения резонанса на 4 кэВ по сравнению с данными работы [2] и на 6 кэВ в ту же сторону относительно данных работы [1]. Само по себе определение положения максимума резонанса с точностью  $\pm 2$  кэВ при его ширине 44 кэВ и асимметричной форме содержит элемент условности. Однако уточнение энергетической шкалы в районе резонанса, как было показано выше, имеет существенное значение для аналитических приложений. Таким образом, можно надеяться, что уточненная функция возбуждения рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1,726 МэВ позволит повысить точность аналитических экспериментов при исследовании профилей распределения углерода по глубине.

**В третьей главе** описан разработанный метод РезОР протонов, позволивший существенно повысить чувствительность анализа концентрации легких элементов в тяжелой матрице по сравнению с методом РОР ионов  $^4\text{He}^+$ . В главе также описан разработанный метод совместного использования РезОР, РОР и ПО.

Квадратичная зависимость сечения резерфордского рассеяния от порядкового номера ядра мишени приводит к понижению чувствительности анализа концентрации легкой примеси в тяжелой матрице. Иллюстрацией этого ограничения метода РОР может служить рис. 3,а, где представлен спектр РОР ионов гелия, измеренных от образца стекла под углами  $\theta=170^\circ$  и  $\varphi=30^\circ$  (угол между пучком и мишенью). Образец представляет собой стекло (состав - Na, Ca, O и Si), обработанное ионами  $\text{Ti}^{n+}$  (образец

Ti/стекло) (см. рис. 4). На стекле сформировано покрытие, в состав которого входит Ti (35 %), O (35 %), N (5 %), C (3 %) и H (20 %). Из рис. 3,а видно, что сигналы от углерода и азота невозможно выделить на фоне выхода от более тяжелых элементов матрицы.

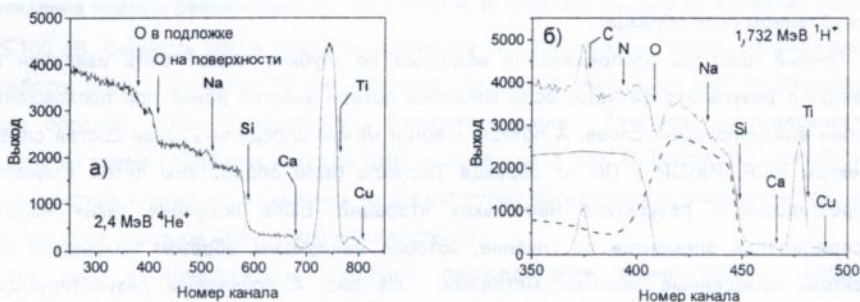


Рисунок 3 - Энергетические спектры ОР ионов от образца Ti/стекло: (а) - ионы гелия; (б) - протоны (сплошной линией показаны экспериментальный и расчетные парциальные спектры N, C и O; штриховой линией - расчетный спектр Si). Стрелками указаны кинематические границы спектров различных элементов. Начальная энергия и тип ионов указаны на вставках.

На рис. 3,б представлен энергетический спектр ОР протонов, измеренный под углами  $\theta=170^\circ$  и  $\varphi=30^\circ$  от того же самого образца Ti/стекло. На рисунке также представлены и расчетные парциальные спектры от C, N, O и Si. В отличие от предыдущего случая, на спектре четко видны сигналы от C и N. Повышение чувствительности анализа C, N и O достигнуто вследствие увеличения сечения рассеяния протонов на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  в диапазоне энергий ниже 1,732 МэВ и уменьшения фона матрицы из-за наличия минимума в сечении рассеяния протонов на ядрах  $^{28}\text{Si}$  при энергии 1,66 МэВ.

При изучении распределений элементов по глубине в тонкопленочных многослойных структурах на стеклах часто возникает необходимость анализа концентрации водорода. Из кинематики процесса рассеяния следует, что в спектрах POP и РезОР полностью отсутствует сигнал от атомов водорода. Это ограничение можно преодолеть с помощью метода протонов отдачи, выбиваемых из мишени при облучении ее пучком ускоренных ионов гелия.

Для получения концентрационного профиля водорода по глубине в образце Ti/стекло использован пучок ионов гелия с начальной энергией 2,4 МэВ. Угол рассеяния  $\theta=30^\circ$ , а угол между пучком и мишенью  $\varphi=15^\circ$ . Поглотителем ионов гелия служила алюминиевая

фольга толщиной 9 мкм. Одновременно с регистрацией протонов отдачи измерялся спектр РОР ионов  ${}^4\text{He}^+$  под углом  $\theta=135^\circ$ . В спектрах протонов отдачи, выбитых ионами гелия из приповерхностных слоев образца Ti/стекло, наблюдались разрешенные друг от друга пики от поверхностной углеводородной пленки и от водорода, находящегося в заглубленном слое образца.

Точный профиль распределения водорода по глубине может быть извлечен из спектра в результате расчета, если известны потери энергии ионов при прохождении глубин анализируемых слоев. А потери энергии можно определить, зная состав слоев. Спектры РОР, РезОР и ПО от образца Ti/стекло были обработаны путем взаимной корректировки в результате нескольких итераций. Была получена такая модель распределения элементов по глубине, которая наилучшим образом описывала все спектры, измеренные разными методами. На рис. 4 приведены результирующие профили распределения элементов по глубине приповерхностных слоев образца Ti/стекло.

В результате совместной обработки спектров впервые был выполнен полный неразрушающий количественный анализ распределения элементов по глубине приповерхностных слоев стекол и керамики, модифицированных ионно-термической обработкой.

В четвертой главе описываются новые режимы динамического ионного перемешивания, примененные для создания тонкопленочных многослойных структур на стеклах и результаты исследования профилей распределения элементов по глубине полученных структур. Анализ профилей проведен на основе комбинирования методов РезОР, РОР и ПО, описанных в главе 3.

В качестве подложек использовались образцы стекол, в состав которых входит Na, Ca, Si, O. Для повышения эффективности синтеза нитридов в модифицируемом слое в камеру напускался азот при давлении около  $4 \times 10^{-3}$  Па. Для обработки образцов использовался импульсный вакуумно-разрядный источник, позволяющий генерировать потоки ионов  $\text{Al}^{+n}$ ,  $\text{Ti}^{+n}$ ,  $\text{Cu}^{+n}$  и других металлов большого (около  $300 \text{ см}^2$ ) сечения.

При обработке стекол реализован новый режим динамического перемешивания осаждаемых атомов металлов. Рост покрытия на образцах происходил при чередовании высокодозной ионной имплантации (ВДИ) и осаждения низкоэнергетичной плазмы в импульсном режиме с частотой  $f=50$  Гц. Режим ВДИ реализован при следующих параметрах: ток вакуумно-дугового разряда  $I_{\text{arc}} \leq 50$  А, ускоряющее напряжение  $U_{\text{accel}} \leq 60$  кВ, энергия имплантации  $E_i \leq 120$  кэВ, ток ионов  $I_i \leq 1$  А, длительность импульса  $t=300$

мкс, скорость набора дозы на заземленной мишени около  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>/мин. Средний заряд ионов Ti, Al и Cu составлял 2,05, 1,48 и 1,70, соответственно. При этом средняя энергия имплантации ионов Ti, Al и Cu равна 123 кэВ, 89 кэВ и 102 кэВ, соответственно. Осаждение плазмы реализовано при  $I_{\text{arc}} \leq 2000$  А,  $t = 1000$  мкс,  $U_{\text{accel}} = 0$  кВ и энергии ионов  $E_d \leq 100$  эВ. Скорость роста покрытия составила 50...200 нм/мин. Время непрерывной обработки образцов - около 15 мин. Частота следования импульсов ВДИ подбиралась таким образом, чтобы предотвратить разогрев мишени. Температура поверхности мишени во время обработки методом ДИП не превышала 100° С. После ДИП-обработки поверхностная пленка наращивалась на стекле путем магнетронного осаждения того же металла (для образцов Al/Al/стекло и Cu/Al/стекло).

На рис. 4 представлены профили распределения элементов по глубине приповерхностных слоев стекла, обработанного ионами титана методом ДИП (образец Ti/стекло).

Наблюдается корреляция профилей Ti и O в покрытии, что указывает на синтез оксида титана (TiO). В переходной области покрытие-подложка обнаружен насыщенный водородом слой. Предлагается механизм образования этого слоя. Толщина покрытия и области взаимного перемешивания покрытие-подложка найдена равной около 200 нм. Величина глубины взаимного перемешивания покрытие-подложка превышает расчетный проективный пробег ионов титана в 2 раза, а общая глубина модифицированного слоя - примерно в 4 раза. Это различие может быть объяснено тем, что в процессе ДИП-обработки формируется оксидная пленка, которая защищает стекло от эффекта распыления. В работе были также измерены профили распределения элементов по глубине в слоях стекла, обработанного ионами меди и алюминия в режиме ДИП (образцы Cu/Al/стекло и Al/Al/стекло, соответственно). При анализе профилей установлено, что образец Cu/Al/стекло представляет собой двухслойное покрытие на подложке стекла. Наблюдаются взаимно перемешанные области Cu-покрытие-Al-покрытие и Al-покрытие-подложка. Особенностью поведения профиля кислорода является увеличение его концентрации вблизи перехода Al-покрытие-подложка и резкий спад при переходе к Al-покрытию. Это указывает на то, что в процессе ДИП-обработки эффективно "работает" механизм осаждения кислорода с образованием содержащих кислород фаз. Другой особенностью поведения профилей элементов является наличие в Al-покрытии элементов Si и O и отсутствие Na и Ca. Этот результат может быть объяснен эффектом преимущественного распыления щелочных элементов в процессе имплантации.

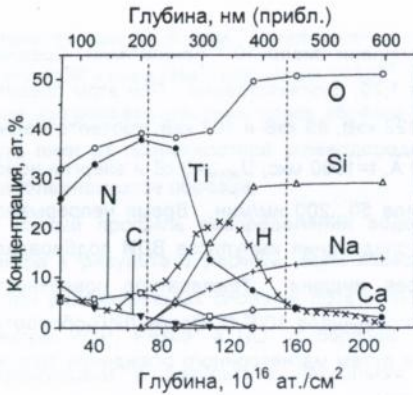


Рисунок 4 - Профили распределения элементов по глубине приповерхностных слоев образца Ti/стекло. Штриховыми линиями условно выделены три области: покрытие, взаимно перемешанный слой покрытие-подложка и подложка.

Проведенные исследования показывают, что процессы формирования покрытий и переходных слоев покрытие-подложка сильно зависят от режимов осаждения. Оксиды более эффективно синтезируются во время формирования покрытия Ti/стекло (см. рис. 4) из-за дополнительного энергозклада в покрытие при ВДИ. ВДИ была использована только вначале формирования покрытий Al/Al/стекло и Cu/Al/стекло для улучшения адгезионных свойств формируемых покрытий. При этом доза при имплантации образца Cu/Al/стекло (около  $5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) превышала дозу при имплантации образца Al/Al/стекло (около  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>). Сравнивая профили, полученные в образцах Cu/Al/стекло и Al/Al/стекло, можно сделать вывод о том, что оксиды более эффективно синтезируются при чередовании осаждения ионов и ВДИ. Концентрация кислорода резко уменьшается в покрытии во время последующего магнетронного осаждения ионов без ВДИ. Если кислород может осаждаться в покрытие из остаточной атмосферы вакуумной камеры, то наличие кремния в покрытии может быть обусловлено только диффузией из объема подложки.

**В пятой главе** описываются результаты исследования зависимости распределения элементов по глубине и поверхностной электропроводности поликристаллической керамики на основе нитрида бора (BN) и поликора ( $Al_2O_3$ ), имплантированной ионами  $Ti^{++}$  от температуры последующего отжига в вакууме.

Подбор режимов имплантации позволял не применять специальных мер против зарядки образцов. Облучение проводилось при комнатной температуре ионами титана с энергией 50-150 кэВ при плотности тока  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> на частотно-импульсном источнике ДИАНА. Флюенс составлял около  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Импульсный вакуумно-дуговой

разряд с катода имплантера служил источником ионов. Длительность импульсов - 250 мкс. Частота следования импульсов составляла 10-50 Гц. Давление остаточных газов в рабочей камере в процессе имплантации не превышало  $5 \times 10^{-3}$  Па. В результате ионно-термической модификации на поверхности керамики формируется термостойкое электропроводящее покрытие, сопротивление которого можно менять в пределах  $10^4$ - $10^{16}$  Ом, а температурный коэффициент сопротивления не превышает  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  град. $^{-1}$  в температурном интервале до 1600 К.

Причины столь значительного (до 8-ми порядков) увеличения удельной поверхностной электропроводности после ионно-термической обработки не установлены.

На рис. 5 представлены профили распределения элементов по глубине приповерхностных слоев поликора, имплантированного ионами  $Ti^{+n}$  (флюенс  $10^{17}$  см $^{-2}$ ) и подвергнутого последующему отжигу в вакууме. Экспериментальные ошибки лежат в пределах размеров точки. В результате отжига при различных временах и температуре 830°C наблюдается перераспределение имплантированных атомов Ti к поверхности образца. Температурный интервал, при котором происходит перераспределение имплантированных атомов, коррелирует с температурной, при которой наблюдается значительное изменение электропроводности полученного покрытия и литературными данными по термическому отжигу наведенных облучением дефектов в  $Al_2O_3$ -керамике. Предложен механизм, объясняющий наблюдаемые эффекты.

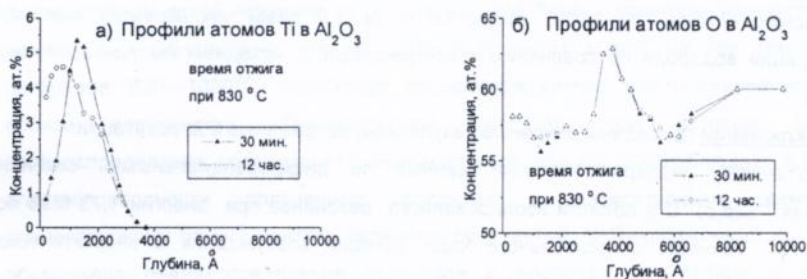


Рисунок 5 - Профили распределения титана (а) и кислорода (б) по глубине поликора, имплантированного ионами  $Ti^{+n}$  для различных режимов последующей термической обработки в вакууме.

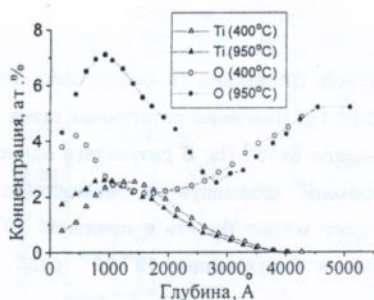


Рисунок 6 - Профили распределения Ti и O по глубине BN, имплантированного ионами  $Ti^{+n}$  и отожженного при различных температурах. На вставке указаны тип кривой для обозначения распределения элемента и температура отжига.

Обнаруженная послеимплантационная зависимость распределения атомов кислорода и имплантированного титана по глубине нитрида бора кардинально отличается от зависимости в случае поликора. На рис. 6 приведены профили распределения элементов по глубине приповерхностных слоев BN, имплантированного ионами  $Ti^{+n}$  (флюенс  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) и отожженного при различных температурах в вакууме.

В отличие от поликора, в нитриде бора наблюдается обогащение модифицированного слоя атомами кислорода. Более того, наблюдается совпадение формы профилей распределения Ti и O по глубине при температуре отжига  $950^\circ\text{C}$ , что указывает на образование оксида титана. Обогащенный кислородом приповерхностный слой толщиной около 500 ангстрем в образце, отожженном при  $400^\circ\text{C}$ , по-видимому, образован вследствие адсорбции молекул воды. Этот результат находится в согласии с данными по анализу профилей водорода методом протонов отдачи. В результате термического отжига при  $830^\circ\text{C}$  существенно (в 1,6 раза) уменьшается максимум концентрации водорода по сравнению с концентрацией в исходном имплантированном образце.

**В заключении** приведены основные результаты, изложенные в диссертации:

1. Уточнены экспериментальные данные по дифференциальным сечениям рассеяния  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области изолированного резонанса при энергии 1,73 МэВ под углом  $170^\circ$ . Точность относительного хода функции возбуждения в энергетическом диапазоне 1,65 - 1,8 МэВ с шагом 5 кэВ составила не хуже 1 %. Энергетическое положение максимума сечений найдено равным  $1,726 \pm 0,002$  МэВ.

2. Существенно повышена чувствительность анализа концентрации примесных ядер углерода (в 20 раз), азота (в 10 раз), кислорода (в 3 раза) в матрицах, содержащих более

тяжелые элементы, в том числе и кремний, по сравнению со спектрометрией РОР ионов  $^4\text{He}$  за счет использования резонансных эффектов в рассеянии протонов на легких ядрах под обратными углами.

3. Разработана методика, основанная на комбинировании методов РОР, РезОР и ПО, позволившая впервые провести полный неразрушающий количественный анализ профилей распределения элементов по глубине приповерхностных слоев стекол и керамики, модифицированных ионно-лучевой обработкой.

4. Исследована новая технология нанесения твердых покрытий на стекла. Наносимые покрытия характеризуются улучшенными адгезионными свойствами вследствие увеличения толщины взаимно перемешанного слоя покрытие-подложка. Обнаружено, что в образцах стекол, модифицированных ДИП-обработкой ионами титана, величина глубины взаимного перемешивания покрытие-подложка превышает проективный пробег в 2 раза, а общая глубина модифицированного слоя - в 4 раза.

5. Впервые исследована эффективность синтеза оксидной фазы и глубина взаимного перемешивания элементов на границе раздела покрытие-стекло в зависимости от способа осаждения ионов металлов. Показано, что оксиды более эффективно синтезируются во время роста покрытия, получаемого при чередовании имплантации и осаждения ионов в импульсном режиме. Обнаружено выщелачивание напыленного алюминиевого покрытия и селективная диффузия в покрытие кремния и кислорода в результате ДИП-обработки и последующего магнетронного осаждения.

6. Впервые исследована зависимость распределения Н, О, Ti по глубине поликристаллической керамики на основе нитрида бора и поликора, имплантированной ионами  $\text{Ti}^{n+}$ . Обнаружено, что при отжиге поликора в вакууме при температуре в интервале 830—1050°C происходит перераспределение имплантированного титана вблизи поверхности. Температурный интервал, при котором происходит перераспределение, коррелирует с температурной, при которой наблюдается изменение электропроводности полученного покрытия и литературными данными по температурному отжигу центров окраски в облученной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -керамике. В нитриде бора обнаружено перераспределение кислорода и водорода по глубине в результате послеимплантационного отжига при температуре 830°C по сравнению с концентрацией в исходном имплантированном образце.

**Список литературы**  
**(цитируемая литература)**

1. Rauhala E. Proton elastic scattering cross sections of carbon, nitrogen and silicon for backscattering analysis in the energy range 0.7—2.5 MeV // Nucl. Instr. and Meth. - 1985. - V. B12. - P. 447 - 452.
2. Amirikas R., Jamieson D.N. and Dooley S.P. Measurement of (p,p) elastic cross sections for C, O and Si in the energy range 1.0—3.5 MeV // Nucl. Instr. and Meth. - 1993. - V. B77. - P. 110 - 116.
3. Salomonovic R. Angular distribution of proton non-Rutherford elastic scattering cross section of carbon and silicon // Nucl. Instr. and Meth. — 1993. — V. B82. — P. 1 — 6.

**(основные публикации автора)**

1. Duvanov S.M., Kobzev A.P., Tolopa A.M., Shirokov D.M. Investigation of the elements depth profiles in surface layers of glass modified by ion beam assisted deposition // Nucl. Instr. and Meth. -1994.- V. B85.- P. 264-267.
2. Дуванов С.М., Кобзев А.П., Толопа А.М., Широков Д.М. Исследование металлизированных взаимно перемешанных приповерхностных слоев стекла, модифицированных ионно-лучевой обработкой // Материалы 23-го Межнационального совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под. ред. проф. А.Ф. Тулинова. -М.: Изд-во МГУ. 1994. С. 139-141.
3. Дедик А.Н., Дуванов С.М., Ехичев О.И., Прецизионный гониометр и камера рассеяния для исследования материалов ионно-пучковыми методами в режиме каналирования // Материалы 3-й Всесоюзной конференции "Микроанализ на ионных пучках" - Сумы: Ред.-изд. отдел облуправления по печати. 1991. С. 135-143.
4. Duvanov S.M. and Tolopa A.M. Element profiles of surface layers created by metal ion beam assisted deposition // Mater. Res. Soc. Sym. Proc. 1993. V.316 P. 845-850.
5. Duvanov S.M. and Tolopa A.M. Investigation of mutual mixed structures created by ion beam assisted deposition // Proc. of the 8th Inter. Conf. on Surface Modification of Metal by Ion Beams (SMMIB'93). 13-17 September 1993. -Japan: Kanazawa, 1993. PB-37.
6. Duvanov S.M., Kobzev A.P. and Tolopa A.M. BS and ERD analysis of the metal-glass interfaces produced by high energy metal Ion Beam Assisted Deposition // Ion Implantation Technology - 94 / Edited by S.Coffa, G.Ferla, F.Priolo, E.Rimini. -Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1995. P. 741-744.

7. Duvanov S.M., Kabyshev A.V. and Kobzev A.P. Evolution of elements depth profiles in polycrystalline BN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics modified by C and Ti ion beams // Report and Abstr. of the 1st Int. Simp. on Beam Technologies (BT'95). 28 February - 4 March 1995. - Russia: Dubna, 1995. P. 33.
8. Duvanov S.M., Pogrebniak A.D., Lavrent'ev V.I., Staiko V.V., Rotstein V.P., and Proskurovskii D.I. Investigation of profiles of implanted Ti ions in Cu single crystals exposed to high irradiation doses and pulsed annealing // Tech. Phys. Lett. -1996.- V. 22(1).- P. 80-82.
9. Pogrebniak A.D., Stayko V.V., Lavrentiev V.I., Mikhalev A.D., Duvanov S.M., Rotstein V.P. High Dose Implantation in Cu Single Crystals and Pulsed Annealing Using Pulsed Electron Beam // Report and Abstr. of the 1st Int. Simp. on Beam Technologies (BT'95). 28 February - 4 March 1995. - Russia: Dubna, 1995. P. 27.
10. Дуванов С.М., Кобзев А.П. Дифференциальные сечения реакции  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в области резонанса при энергии 1,726 МэВ // Препринт ОИЯИ Р15-96-69/ - Дубна: ОИЯИ, 1996, 10 с.
11. Duvanov S.M., Kabyshev A.V. and Kobzev A.P. Temperature annealing evolution of elements depth profiles in BN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics implanted with C<sup>n</sup> and Ti<sup>n</sup> ions // Report and Abstr. of the 4th Russian-German-Ukrainian Analytical Simp. (ARGUS'96). 25 February - 3 March 1995. - Russia: Sofrino, 1996. P. 5.
12. Duvanov S.M. and Kobzev A.P. Differential cross sections of  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  reaction near 1.73 MeV resonance at  $\theta_{\text{lab}} = 170^\circ$  // Report and Abstr. of the 4th Russian-German-Ukrainian Analytical Simp. (ARGUS'96). 25 February - 3 March 1995. - Russia: Sofrino, 1996. P. 5.
13. Pogrebniak A.D., Duvanov S.M., Mikhaliiov A.D., Lavrentiev V.I., Stayko V.V., Markov A.V., Ivanov Yu.F., Rotstain V.P., Proskurovsky D.I., Surface and Near Surface Structure and Composition of High Dose Implanted and Electron Annealed Single Crystal Copper // Surf. and Coat. Tech. — 1996. — (accepted for publication).
14. Duvanov S.M., Kabyshev A.V. and Kobzev A.P., Ion Beam and Electrophysical Analysis of  $\alpha$ -BN and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics Modified by High Dose and Intense Ti<sup>n</sup> ions Implantation an by Post-Implantation Thermal Annealing // Report and Abstr. of the 1st Inter. Simp. on Materials Science Applications of Ion Beam Techniques (IBT'96). September 9 - 12 1996. — Germany: Seeheim, 1996. IBM-P42 (accepted for publication in J. of Materials Science Forum).

### Анотація

**Дуванов С. М.** "Резонансне пружне розсіювання протонів і особливості його використання в аналізі тонкоплівочних структур".

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика атомного ядра і елементарних частинок, Харківський державний університет, Харків, 1997.

Захищаються 14 наукових робіт. В роботах представлені результати експериментальних досліджень диференційних перерізів пружного розсіювання  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  в області ізольованого резонансу при енергії 1,73 MeV під кутом  $170^\circ$ . Отримані перерізи, а також перерізи (p,p)-розсіювання на інших легких ядрах використані для підвищення чутливості і точності аналізу концентрації легких елементів у важкій матриці методом зворотного розсіювання іонів.

Досліджена нова технологія нанесення твердих покриттів на скло, що характеризуються підвищеною адгезією.

Досліджена залежність профілей розподілу елементів і поверхневої електропровідності кераміки на основі нітрида бору (BN) и полікору ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) від температури відпалу. Кераміка модифікована високодозною та інтенсивною імпульсною імплантацією багатозарядними іонами титану. Виявлені перерозподілення елементів та змінення електропровідності в результаті післяімплантаційного відпалу знаходяться в узгодженні з літературними даними з температурної еволюції мікроструктури опроміненої кераміки.

**Ключові слова:** протон, розсіювання, резонанс, переріз, імплантація, скло, нітрид бору, полікор.

### Abstract

**Duvanov S.M.** "Resonance Elastic Scattering of Protons and Peculiarities of Its Application to Analysis of Thin Film Structures"

Thesis for the degree of Candidate of physical and mathematical sciences on speciality 01.04.16 — Nucleus and Elementary Particles Physics, Kharkiv State University, Kharkiv, 1997.

14 scientific publications are presented. The results from the experimental investigations of differential cross-sections of the  $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$  elastic scattering in the vicinity of the 1.73 MeV resonance at the angle of  $170^\circ$  are presented in the work. The cross-sections obtained, as well as cross-sections of the other (p,p)-scatterings on light nuclei, have been used for an

improvement of sensitivity and accuracy of analysis of the light element concentration in a heavy matrix using ion backscattering technique.

A new technology of deposition of hard coatings on glasses with improved adhesion has been investigated.

The element concentration depth profiles and surface electrical conductivity of ceramics based on polycrystalline boron nitride (BN) and corundum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) have been investigated as function of temperature. The ceramics was modified by high-dose and high-flux pulsed implantation of multiply charged titanium ions. The observed redistribution of elements and variation of conductivity resulting from post-implantation thermal annealing are in agreement with the literature data on temperature evolution of microstructure of the irradiated ceramics.

**Key words:** proton, scattering, resonance, cross-section, implantation, glass, boron nitride, corundum.

Підп. до друку 14.04.97. Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Тираж 80 прим. Вид. № 19.

Віддруковано на ризографі у ВВП "Мрія-1"ЛТД.  
244030, Суми, Кузнечна, 2.

U35148

AB 37.740