

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ
XXV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 6 июля - 11 июля 2015 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва - 2015



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ

XXV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 6-11 июля 2015 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 978-5-89671-020-2

Труды XXV Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 6 – 11 июля 2015 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2015 г., 644с.

В рамках конференции проводилась XIX Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,
д.т.н. Прасицкий В.В.,
Горелова Е.Г.
Мелкумян А.Б.
Митрофанова Т.Е.

УДК 669.
ББК 22.38

© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2015

ISBN 978-5-89671-020-2

© Труды XXV Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела»

ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

Понедельник, 6 июля**10.00-13.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Овчинников В.В. «О радиационно-динамическом воздействии ионизирующих излучений на конденсированные среды»	11
2. Дидык А.Ю., Вишневский Р., Вилчиньска-Китовска Т., Исхакова Л.Д. «Синтез микрочастиц в водороде при давлении 3,5 кбар с оловянным стержнем под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ»	21
3. Андриевский Р.А. «Поверхности раздела в наноматериалах как эффективные стоки для радиационных дефектов»	38
4. Ивченко В.А. «Атомное строение каскадов атомных смещений в металлических материалах после радиационных воздействий»	40
5. Якушин В.Л., Джумаев П.С., Емельянова О.В., Калинин Б.А., Польский В.И. «Модифицирование микроструктуры и поверхностное упрочнение 12 %-ных хромистых сталей при обработке потоками импульсной газовой плазмы»	49
6. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Дубинина М.И., Крестя В.И., Фишер М.Р. «Моделирование ионизации рабочего газа в слаботочном газовом разряде в смеси аргон-ртуть»	60

13.00-14.00 Перерыв.**14.00-17.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Богачев И.А., Калинин Б.А., Лебедева Л.Ю., Олевский Е.А., Стальцов М.С., Чернов И.И. «Свойства реакторной ферритно-мартенситной стали, полученной при оптимизированных режимах спарк-плазменного спекания»	65
2. Печенкин К. В., Ганченкова М. Г. «О растворимости водорода в никеле: расчет из первых принципов»	74

3. Якушин В.Л., Джумаев П.С., Малиева Е.М. «Влияние импульсной плазменной обработки на трибологические характеристики 12%-ных хромистых сталей ЭП823 и ЭК181»	80
4. Дидык А.Ю., Ерискин А.А., Бондаренко Г.Г., Кобзев А.П., Никулин В.Я., Силин П.В., Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. «Распределение дейтерия и водорода в Zr, Ni и Ti сборках фольг при воздействии импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы»	90
5. Боровицкая И.В., Люблинский И.Е., Бондаренко Г.Г., Парамонова В.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Ляховицкий М.М., Жарков М.Ю. «Особенности коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в жидком литии высокой чистоты»	105
6. Ризаханов Р.Н., Бармин А.А., Иванов А.В., Ивлиева В.В., Рудштейн Р.И. «Слоистый композиционный материал на основе оксида алюминия и хрома для применения в термонапряженных узлах ракетно-космической техники»	115
7. Морозов Е.В., Масляев С.А., Демин А.С., Ромахин П.А., Пименов В.Н., Грибков В.А. «Осаждение металлов и повреждаемость вольфрамовой мишени потоками ионов и плазмы в установках «Плазменный фокус»	126

Вторник, 7 июля

9.00-13.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Косогоров А.В. «Структурные изменения поверхности стекла при электронном облучении»	137
2. Попов В.П., Гутаковский А.К., Сафронов Л.Н., Антонов В.А., Подлесный С.Н., Куприянов И.Н., Пальянов Ю.Н., Калинин А.А., Рубанов С. «Формирование NV-центров и наноструктур в облученном ионами алмазе»	147
3. Тыщенко И.Е., Попов В.П. «Радиационно-стойкие структуры кремний-на-изоляторе с ионно-модифицированным встроенным диэлектриком»	160
4. Сергеев А.П., Сергеев П.Б. «Кинетика и механизмы наработки дефектов в чистых кварцевых стеклах при электронном облучении»	171
5. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Коротков В.В., Бедин С.А.,	182

Кругликов С.С., Перунов И.В. «Исследование многокомпонентных металлических нанопроволок, полученных методом матричного синтеза на основе трековых мембран»	
6. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Ионов А.М., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Влияние модифицирования в разряде постоянного тока на адгезионные свойства и структуру поверхности пленок полиэфирсульфона»	189
7. Урбанович А.И., Жвавый С.П. «Моделирование фазовых переходов, инициируемых в CdTe импульсным излучением лазера»	197
8. Корнеев А.В., Ревазов В.О., Селезнев В.П. «Исследование оптических свойств лейкосапфира при воздействии ионизирующих излучений»	206
9. Крючков С.В., Кухарь Е.И. «Абсолютная отрицательная проводимость сверхрешетки в поле электромагнитного излучения»	213
10. Королев А.А., Иванов А.В., Козлов С.А., Штумпф С.А. «Влияние плазмы на генерацию кратных гармоник при взаимодействии нескольких интенсивных предельно коротких световых импульсов в прозрачной диэлектрической среде»	219

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)

1. Ластовский С.Б., Маркевич В.П., Коршунов Ф.П., Якушевич А.С., Мурин Л.И., Макаренко Л.Ф. «Радиационно-индуцированные бистабильные центры с глубокими уровнями в кремнии <i>p</i> -типа»	226
2. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Christen J., Степович М.А., Тургин Д.В. «Оценка электрофизических параметров полупроводников по результатам измерений катодолюминесценции экситонов»	235
3. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. «Модификация МДП-структур сильнополевой инжекцией электронов и электронным облучением»	242
4. Матюхин П.В., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Черкашина Н.И. «Взаимодействие высокоэнергетических полей гамма-излучения с металлокомпозиционным материалом на	253

основе алюмосодержащей матрицы»	
5. Новоселова Е.Г., Смирнов И.С., Терентьев А.В., Шупегин М.Л. «Влияние условий формирования на кластерную структуру нанокompозитных пленок на основе ПФМС»	258
6. Yusupov Lochin. «Growth of TiO ₂ nanorods on transparent substrates for solar energy harvesting devices»	264

Среда, 8 июля

9.00-13.00 Секция “Радиационная физика металлов”

1. Дрожжина М.В., Калинин Б.А., Николаева И.Д., Стальцов М.С., Чернов И.И., Бажал С.В., Глотов А.И., Романов В.А., Лагов П.Б. «Использование ускорителя ЭПП-15 для имитационных исследований радиационной повреждаемости реакторных материалов»	269
2. Рогожкин С.В., Корчуганова О.А., Алеев А.А. «Кинетика распада твердого раствора сплава Fe-22%Cr при термическом старении»	276
3. Портных И.А., Панченко В.Л. «Микроструктура стали ЭК-164 после нейтронного облучения при температурах от 440 до 600°С до повреждающих доз 36...94 сна»	285
4. Панченко В.Л., Пастухов В.И. «Аномальное локальное порообразование, наблюдаемое в 12% хромистых сталях после нейтронного облучения при температуре 1200...1300°С»	299
5. Ельникова Л.В., Фунтиков Ю.В. «Анализ дефектной структуры галфенолов методом позитронной аннигиляционной спектроскопии»	305
6. Валько Н.Г. «Влияние режимов электролиза и облучения на элементный состав и морфологию поверхности покрытий Co-Ni-Fe»	314
7. Черенда Н.Н., Ласковнев А.П., Басалай А.В., Шиманский В.И., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. «Формирование биосовместимых поверхностных слоев в сплаве Ti-6Al-4V с помощью компрессионных плазменных потоков»	318
8. Голубев О.Л., Блашенков Н.М. «Изменения изотопного состава ионного тока полевого испарения вольфрама при высоких температурах эмиттера»	327
9. Молодцов В. Л., Печенкин В. А., Аверин Л. В. «Метод расчета характеристик повреждающей дозы в металлах при	332

ускорительном облучении»

13.00-14.00 Перерыв.**14.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)**

1. Жарков М.Ю., Люблинский И.Е., Вертков А.В. «Реализация концепции замкнутой циркуляции лития внутрикамерными элементами токамака Т-11М на основе литиевых капиллярно-пористых систем»	338
2. Ризаханов Р.Н., Бармин А.А., Иванов А.В., Ивлиева В.В., Лаптев И.Н., Рудштейн Р.И. «Получение и испытание керамического композита на основе нитрида бора с повышенной стойкостью к ионной бомбардировке для применения в составе холлового двигателя»	345
3. Колодяжный А.Ю., Шешин Е.П. «Катодолуминесцентный источник света на основе катодно-модуляторного узла с отклоняющими электродами»	358
4. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И. «Исследование изменения структуры полимерных композитов после воздействия вакуумного ультрафиолета методом ИК-спектроскопии»	367
5. Романов А.В., Степович М.А. «Модели спектров вторичной флуоресценции конденсированного вещества в спектрометрах с дисперсией по длинам волн»	371
6. Бондаренко Г.Г., Ли И.П., Гайдар А.И., Леденцова Н.Е. «Исследование изменения структурных характеристик конгломератов порошков карбонильного Ni при различных режимах их термообработки»	379

Четверг, 9 июля**9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Суржиков А.П., Власов В.А., Лысенко Е.Н., Малышев А.В., Николаев Е.В. «Твердофазное образование литий-титановых ферритов в условиях нагрева электронными пучками импульсного и непрерывного действия»	387
2. Павлов Ю.С., Лагов П.Б. «Физико-технические основы и примеры применения радиационных методов обработки твердотельных электронных приборов»	398

3. Ревина А.А., Павлов Ю.С. «Роль радиационной химии в современной нанотехнологии»	406
4. Петросянц К.О., Кожухов М.В. «Приборно-технологическое моделирование характеристик SiGe ГБТ при воздействии протонов»	415
5. Петросянц К.О., Попов Д.А. «Приборно-технологическое моделирование 45nm high-k МОПТ с учетом воздействия гамма-излучения»	424
6. Ивашутенко А.С., Франгульян Т.С., Гынгазов С.А. «Спекание циркониевой керамики с использованием микроволнового и искрового методов нагревов»	432
7. Валько Н.Г., Война В.В., Лукашик О.А., Петрученя Е. Ю. «Электролитическое осаждение Zn-Co покрытий в поле рентгеновского излучения»	438
8. Кузнецов П.М., Федоров В.А. «Анализ колебаний эрозионного факела, возникающего в результате лазерного воздействия на металлическую поверхность»	442

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов»

1. Загорский Д.Л., Коротков В.В., Бедин С.А., Парфёнов Д.А., Артёмов В.В. «Стабильность нанопроволок, синтезированных на основе трековых мембран»	446
2. Курбанов А.М., Нуритдинов И. «Автолокализация электронных возбуждений и образование центров окраски в кристаллах $Gd_3Sc_2Al_3O_{12}$ »	454
3. Охрименко О.Б. «Особенности атермического взаимодействия СВЧ излучения со структурами оксид/полупроводник»	462
4. Yavidov B.Ya. «Polaronic system with disordered density-displacement type electron-phonon interaction»	470
5. Федоров И.А., Лобанов С.В, Шешин Е.П. «Исследование термо- и автоэмиссионных свойств наноструктурированного материала на основе интеркалированного пирографита»	478
6. Буртелов В.А., Шешин Е.П. «Формирование эмиссионных центров на поверхности ТРГ фольги искровым разрядом через диэлектрическую маску»	487

Пятница, 10 июля

9.00-13.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»

1. Дидык А.Ю., Боровицкая И.В., Куликаускас В.С., Бондаренко Г.Г., Ерискин А.А., Никулин В.Я., Силин П.В., Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. «Исследование распределения дейтерия и водорода в сборках Ta CD ₂ Ta, Ta Ta CD ₂ Ta Ta и Nb CD ₂ Nb, после воздействия высокотемпературной плазмы аргона на установке ПФ-4»	497
2. Онанко А.П., Онанко Ю.А. «Влияние изменения дефектной наноструктуры на указательную поверхность упругих свойств и автоматизированная система визуализации анизотропии после облучения»	509
3. Кабышев А.В., Конусов Ф.В. «Ионно-термическая модификация оксида алюминия»	520
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О. «Расчет коэффициента распыления катода в слаботочном газовом разряде в смеси «аргон-ртуть»	530
5. Тимошенко С.П., Графутин В.И., Евстафьев С.С., Прокопьев Е.П., Бритков О.М., Хмелевский Р.О. «Аннигиляционный контроль производства и качества материалов на основе металлов и кремния методами ДУАЛ (DWAL), ВРАФ (TDAP) и УРАФ (ADAP)»	536
6. Дьячкова И.Г., Новоселова Е.Г., Смирнов И.С. «Влияние температуры на формирование нарушенных слоев в кремнии при протонном облучении»	539
7. Галанина Л.И., Новиков Л.С. «Оценка вероятности одиночных радиационных сбоев в результате ядерного взаимодействия первичных частиц с материалами микросхем»	550
8. Амрастанов А.Н., Степович М.А., Гинзгеймер С.А. «Оценка теплового воздействия электронного пучка на однородный полупроводниковый материал. Результаты математического моделирования»	557

13.00-14.00 Перерыв.

14.00-17.00 Секция «Радиационная физика металлов»

1. Чернова А. Д., Печенкин В. А., Конобеев Ю. В. «Расчет температур и напряжений в образце при облучении в ВЭМ»	564
2. Демина Е.В, Воронин А.В., Гусев В.К., Новохацкий А.Н.,	569

Прусакова М.Д., Морозов Е.В., Бер Б.Я., Борматов А.А., Сотников Г.Ю. «Структурные изменения в поверхностном слое вольфрама, подвергнутого воздействию большого числа импульсов гелиевой плазмы»	
3. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Никуличева Т.Б., Мишунин М.В. «Структура зоны аккомодации механического двойника в технически чистом титане»	576
4. Selyshchev P. A., Akintunde S. O. «Influence of irradiation on formation of compound layer as result of chemical reaction and diffusion»	579
5. Чирская Н.П., Воронина Е.Н., Новиков Л.С. «Математическое моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с микроструктурами космических аппаратов»	590
6. Аленина М.В., Колотов В.П. «Активационные свойства рекомендуемых материалов для защитного блока blankets строящегося термоядерного реактора и их соответствие критериям малоактивируемых конструкционных материалов»	600

Суббота, 11 июля**9.00**

1. Куценников Э.Л., Красильников В.В. «О перспективе создания центра ядерной медицины»	605
2. Оксенгендлер Б.Л., Ашуров Х.Б., Максимов С.Е., Тураев Н.Ю. «Фрактальная концепция в радиационной физике твердого тела»	617
3. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Ястребинская А.В. «Моделирование процессов взаимодействия высокоэнергетических излучений с радиационно-защитными композиционными материалами»	627
4. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Масловский В.М., Столяров А.А., Тихонов А.Н., Ахмелкин Д.М. «Сильнополевая и плазменная модификация структур метал-диэлектрик-полупроводник»	632
Обсуждение докладов	
Общая дискуссия	
Заккрытие конференции	

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА В Zr, Ni И Ti СБОРКАХ ФОЛЬГ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.Ю.Дидык¹, А.А.Ерискин^{2,3}, Г.Г.Бондаренко², А.П.Кобзев¹,
В.Я.Никулин^{3,5}, П.В.Силин³,
В.Белоус⁴, Я.Васяк⁴, Е.Хаевска⁴

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва, Россия

⁴Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Методом регистрации ядер отдачи дейтерия и водорода (ERDA) изучен процесс накопления и перераспределения дейтерия и водорода при импульсном воздействии высокотемпературной дейтериевой плазмы (ИВТДП) на установке «Плазменный Фокус» (ПФ-4) в сборке из двух Ni, Ti и Zr фольг высокой чистоты. Установлено, что при ИВТДП происходит перераспределение имплантированного дейтерия и газовой примеси водорода на большие глубины в сборках из изученных Zr, Ni и Ti фольг, значительно превышающих пробеги ионов дейтерия (при их максимальной скорости до $\sim 10^8$ см/с).

Как и в ранее выполненных исследованиях обнаруженное явление, может быть объяснено: а) выносом имплантированного дейтерия и водорода под воздействием мощных ударных волн, образуемых в металлических фольгах от ИВТДП, и (или) ускорением диффузии атомов дейтерия и водорода под действием волны сжатия-разрежения на фронте ударной волны с перераспределением дейтерия и водорода на большие глубины. Аналогичное поведение обнаружено в сборках из двух или трех и более фольг из никеля, ванадия, ниобия, тантала различных толщин, включая и сборки фольг из разнородных материалов, которые были также изучены.

Введение

За последние годы в связи с успехами в лазерной технике и созданием мощных импульсных лазеров в пико- и фемто-секундных диапазонах значительное развитие получило относительно новая область науки - физика высокой плотности энергии [1, 2]. Это направление развивалось как для изучения воздействия коротких импульсов на конденсированные среды, т.е. с целью детального исследования таких процессов как лазерное распыление, абляция, перераспределение примесей, возникновение новых и растворение старых фаз, по изучению влияния и возникновения мощных ударных волн и их проявлений [3, 4]. Помимо этого сформировалось и другое важное направление ис-

следований по воздействию мощных импульсов лазерного излучения с целью создания лазерного управляемого ядерного синтеза. В таких процессах осуществляется экстремально высокое энергосодержание в веществе, когда как теплопроводность (электронная, лучистая и фонная) не успевает охладить мишень за время импульсного нагрева. Однако, в связи с тем, что длина волны лазера мала, а высокочастотный скин-эффект значительно уменьшает глубину проникновения света в твердое тело, а также и в образующуюся при этом плотную приповерхностную плазму, то здесь имеют место лишь поверхностные эффекты.

Как известно, при работе термоядерных реакторов в материале первой стенки должно происходить накопление компонентов плазмы (дейтерия и трития) и продуктов термоядерных реакций, в виде гелия. Поэтому изучение процессов накопления и адсорбции-десорбции легких газов и особенно трития имеет важнейшее значение [3, 4].

Целью настоящей работы является изучение распространения ударных волн в металлических фольгах по эффектам, обусловленным процессами перераспределения и накопления ионов от импульсной дейтериевой плазмы и присутствующей газовой примеси - водорода, которые изучались методом детектирования ядер отдачи дейтерия и водорода (elastic recoil detection - ERDA) и Резерфордского обратного рассеяния (Rutherford backscattering spectrometry - RBS).

Методика исследований

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов, ВТСП керамик, металлических сплавов, многослойных структур и полимерных пленок на установке ПФ-4 в Физическом институте РАН [3-5]. Применение установок типа «плазменного фокуса» (ПФ) для получения мощных потоков плазмы и изучение ее воздействия на материалы представляется также весьма актуальным с точки зрения возможности моделирования таких процессов. Одной из активно работающих установок типа ПФ можно выделить установку ПФ-4 в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Параметры ПФ-4 следующие: энергия конденсаторной батареи 3.6÷4 кДж, максимальный ток ≈ 400 кА, скорость плазменного потока до 10^8 см/с, плотность плазмы до $\approx 10^{18}$ см⁻³, длительность плазменного импульса 50÷100 нс, плотность вносимой в поверхность мишени до $\sim 10^8 \div 10^9$ Вт/см², выход нейтронов до $\sim 10^8$ за импульс дейтериевой плазмы, время между импульсами для частичного охлаждения мишени не менее 5-

6 мин. Разрядная вакуумная камера установки ПФ-4 после работы на дейтериевой плазме, была откачена до 10^{-3} тор, а затем вновь наполнена чистым дейтерием до рабочего давления от 2 до 4 тор.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия дейтериевой высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки до мишени составляло 25 мм (рис.1). При воздействии дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов из термоядерной реакции ${}^2_1D + {}^2_1D \rightarrow n + {}^3_2He$ из дейтериевой плазмы и мишеней [6,7] нейтронными детекторами, описанными в [6, 7].

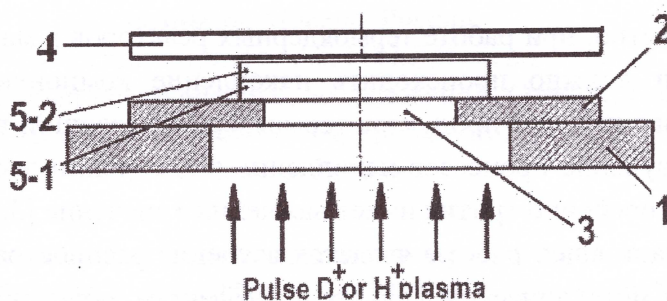


Рис.1. Сборка металлических фольг для облучения импульсной высокотемпературной плазмой на плазменном фокусе ПФ-4 [4, 5] (поток плазмы снизу). "1" – нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС), "2" – передняя диафрагма с диаметром отверстия – "3", равным 10 или 15 мм, "4" – прижимная пластина из НС, а 5-1 и 5-2 две фольги из одного или различных материалов.

Фольги из никеля (99,98%) с толщиной 0,25 мм, титана (99,6 %) с толщиной 0,25 мм и циркония (99,8 %) с толщиной 0,3 мм (фирма «Goodfellow Cambridge Limited») были облучены на установке ПФ-4 [3-5] в сборке, из двух плотно прижатых фольг, пятнадцатью импульсами дейтериевой плазмы (рис. 1). Все фольги имели размер $10 \times 15 \text{ мм}^2$, с точностью по толщине $\pm 10\%$ и по габаритным размерам $\pm 0,5 \text{ мм}$. Для удобства введем символическое обозначение сборки фольг в виде: ${}^1\text{Met-1} | \text{Met-2}^2$.

Все ERDA спектры были получены с использованием анализирующего пучка ионов гелия с энергией 2,3 МэВ при скользящем угле падения на образец в 15° на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ [8, 9]. Обработка спектров была проведена с применением стандартной программы SIMNRA 6.06 [10].

RBS и ERDA исследования никелевых фольг

На рис. 2 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности первой ${}^1\text{Ni-1}$ фольги в сборке.

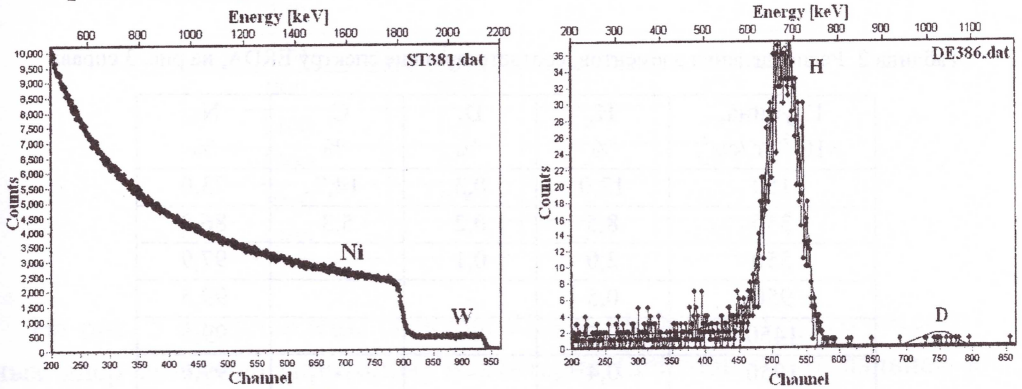


Рис. 2. RBS и ERDA поверхности ${}^1\text{Ni-1}$ фольги.

В табл. 1 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 2 справа.

Таблица 1. Распределения элементов, соответствующее спектру ERDA, на рис. 2 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см 2	H, %	D, %	C, %	Ni, %	W, %
150	4,0	0,2	11,3	81,0	3,5
350	3,5	0,1	-	92,9	3,5
550	0,5	-	-	96,0	3,5
950	0,3	-	-	96,2	3,5
1450	0,2	-	-	96,3	3,5
1950	0,2	-	-	96,3	3,5
4950	-	-	-	96,5	3,5

На рис. 3 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности первой Ni-1^2 в сборке.

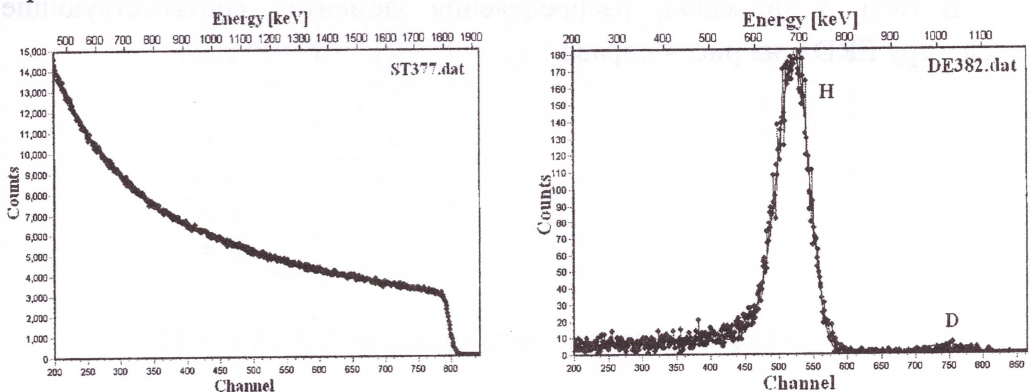


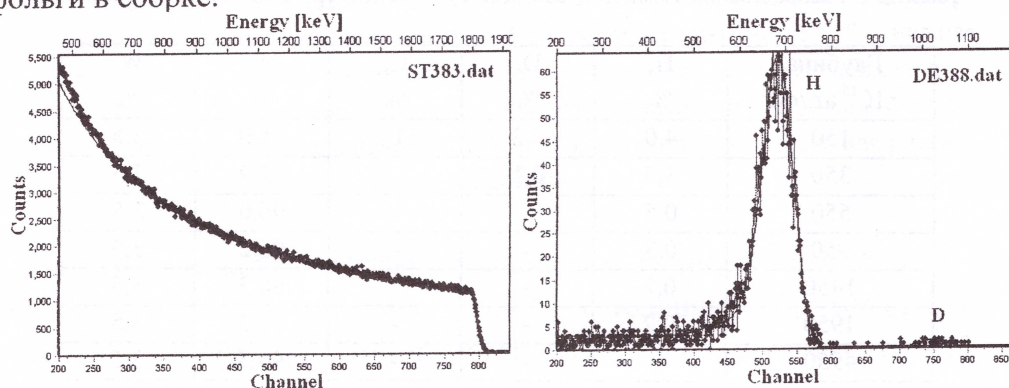
Рис. 3. RBS и ERDA поверхности Ni-1² фольги

В табл. 2 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 3 справа.

Таблица 2. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 3 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	C, %	Ni, %
150	12,0	0,3	14,7	73,0
350	8,5	0,2	5,3	86,0
550	2,0	0,1	-	97,9
950	0,5	-	-	99,5
1450	0,5	-	-	99,5
1950	0,4	-	-	99,6
2950	0,4	-	-	99,6
4950	-	-	-	100,0

На рис. 4 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности второй ¹Ni-2 фольги в сборке.

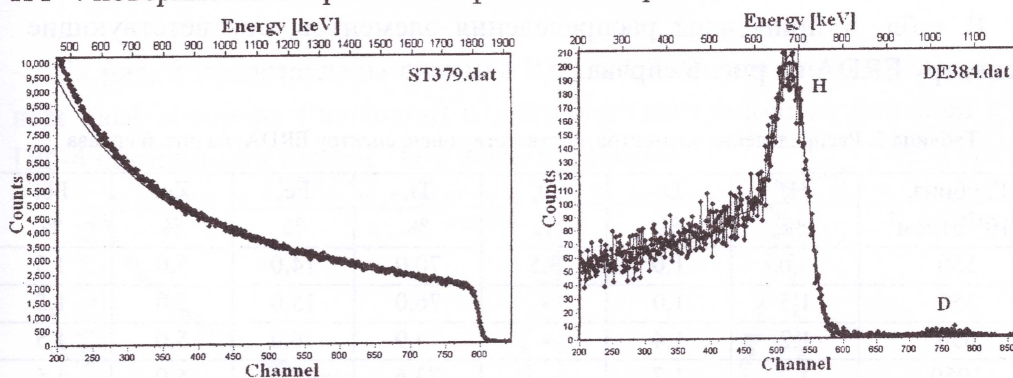
Рис. 4. RBS и ERDA поверхности ¹Ni-2 фольги

В табл. 3 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 4 справа.

Таблица 3. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 3 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	Ni, %
150	7,0	0,2	92,8
300	6,0	0,1	93,9
500	1,0	-	99,0
900	0,5	-	99,5
1400	0,3	-	99,7
1900	0,3	-	99,7
2900	0,3	-	99,7
4900	-	-	100,0

На рис. 5 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от дальней к ПФ-4 поверхности второй Ni-2² фольги в сборке.

Рис. 5. RBS и ERDA поверхности Ni-2² фольги

В табл. 4 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 4 справа.

Таблица 4. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 5 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	C, %	Ni, %
150	17,0	0,3	14,7	68,0
350	15,0	0,2	5,3	79,5
550	7,0	0,1	-	92,9
950	7,0	-	-	93,0
1450	6,0	-	-	94,0
1950	6,0	-	-	94,0
2950	5,0	-	-	95,0
4950	-	-	-	100,0

RBS и ERDA исследования титановых фольг

На рис. 6 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от ближней к ПФ-4 поверхности первой ${}^1\text{Ti}$ -1 фольги в сборке.

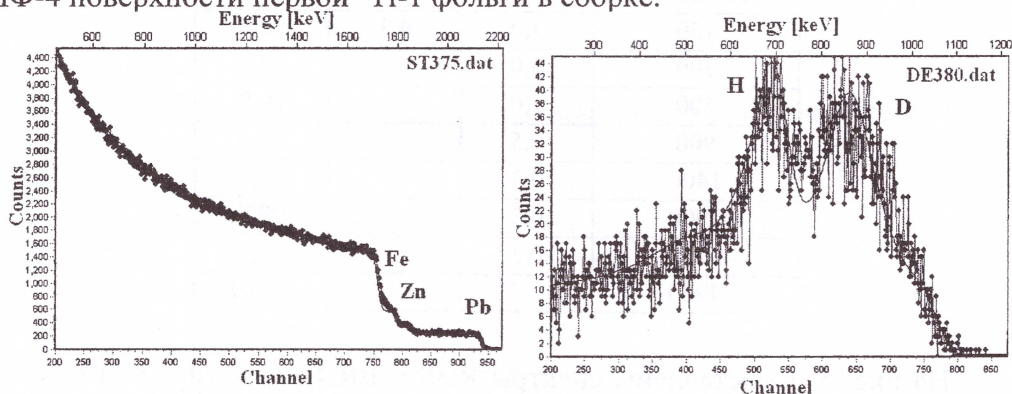


Рис. 6. RBS и ERDA поверхности ${}^1\text{Ti}$ -2 фольги

В табл. 5 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 6 справа.

Таблица 5. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 6 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./ см^2	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %	Zn, %	Pb, %
150	5,0	1,0	3,5	70,0	14,0	5,0	1,5
350	1,5	1,0	-	76,0	15,0	5,0	1,5
650	1,2	1,4	-	74,9	16,0	5,0	1,5
1050	1,2	1,7	-	73,6	17,0	5,0	1,5
1550	1,1	1,7	-	73,7	17,0	5,0	1,5
2050	1,0	0,8	-	74,7	17,0	5,0	1,5
3050	1,0	0,5	-	75,0	17,0	5,0	1,5
4950	-	-	-	76,5	17,0	5,0	1,5

На рис. 7 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от дальней к ПФ-4 поверхности первой Ti -1² фольги в сборке.

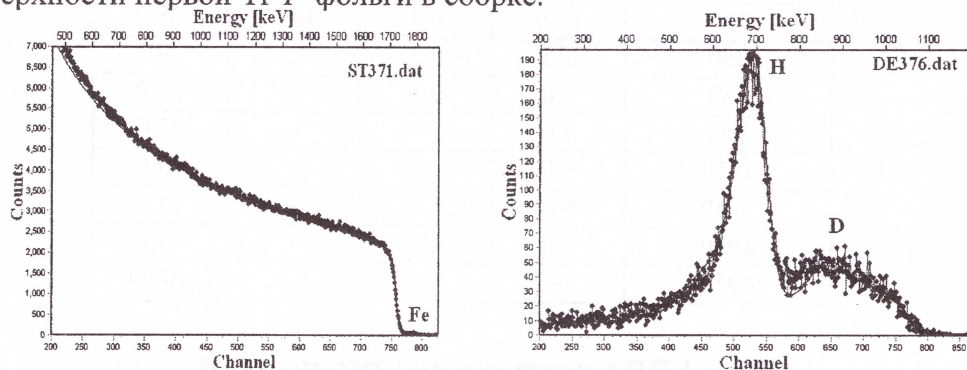


Рис. 7. RBS и ERDA поверхности Ti -1² фольги

В табл. 6 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 7 справа.

Таблица 6. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 7 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	12,0	0,8	17,2	68,0	2,0
350	5,0	1,0	19,0	75,0	-
550	2,5	1,1	10,4	86,0	-
950	1,5	0,9	5,6	92,0	-
1350	0,5	0,9	-	98,6	-
1750	0,4	0,6	-	99,0	-
2250	0,4	0,3	-	99,3	-
3250	0,2	0,1	-	99,7	-
6350	-	-	-	100,0	-

На рис. 8 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от ближней к ПФ-4 поверхности второй ¹Ti-2 фольги в сборке.

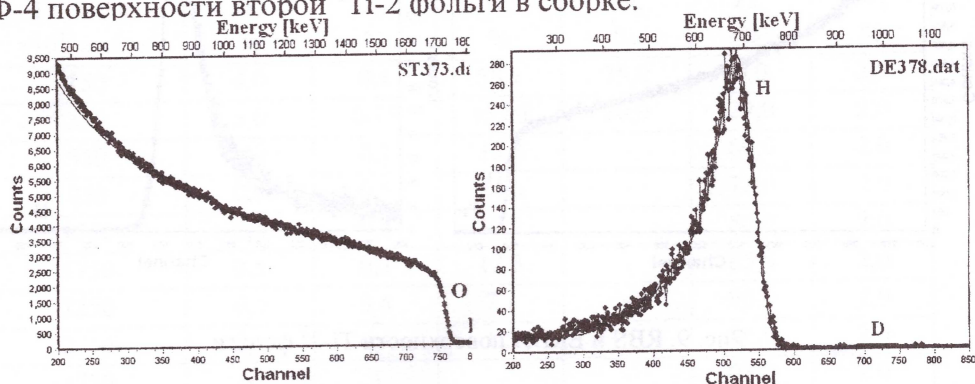


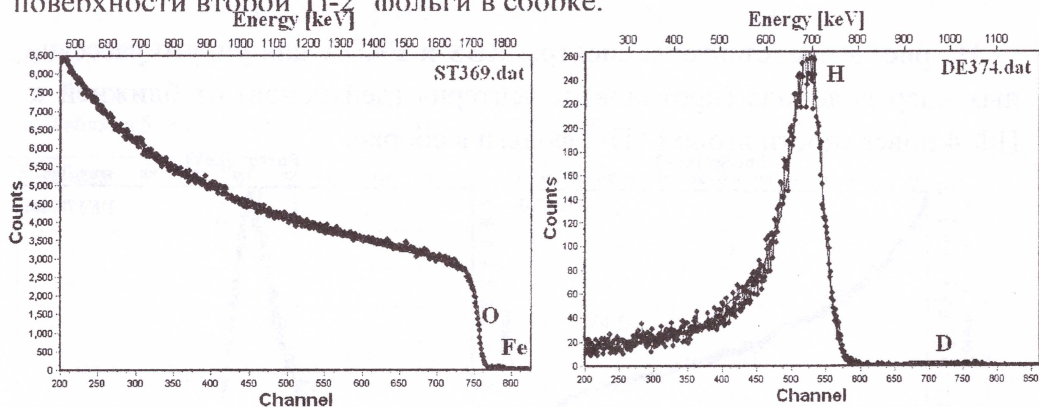
Рис. 8. RBS и ERDA поверхности ¹Ti-2 фольги

В табл. 7 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 8 справа.

Таблица 7. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 8 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	12,0	0,1	35,9	50,0	2,0
350	9,0	0,1	25,9	65,0	-
650	5,0	0,1	19,9	75,0	-
1050	3,0	-	14,0	83,0	-
1550	1,5	-	9,5	89,0	-
2050	0,7	-	-	96,0	-
2050	0,6	-	-	98,0	-
4050	-	-	-	100,0	-

На рис. 9 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от дальней к ПФ-4 поверхности второй Ti-2² фольги в сборке.

Рис. 9. RBS и ERDA поверхности Ti-2² фольги

В табл. 8 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 9 справа.

Таблица 8. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 9 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	14,0	0,1	15,9	68,0	2,0
350	7,0	0,1	7,9	85,0	-
650	3,5	0,1	4,4	92,0	-
1050	2,3	-	-	97,7	-
1850	1,1	-	-	98,9	-
2850	0,7	-	-	99,3	-
5850	-	-	-	100,0	-

RBS и ERDA исследования циркониевых фольг

На рис. 10 представлены спектры RBS и ERDA для упруго рассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от ближней к ПФ-4 поверхности первой ${}^1\text{Zr}$ -1 фольги в сборке.

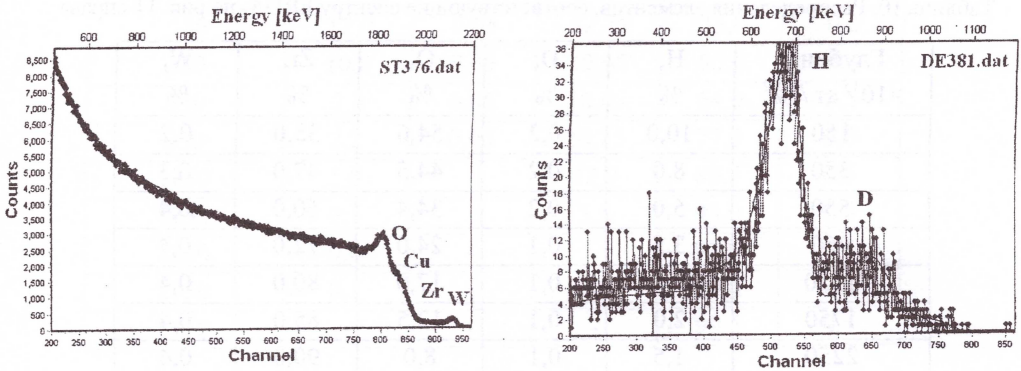


Рис. 10. RBS и ERDA поверхности ${}^1\text{Zr}$ -1 фольги

В табл. 9 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 10 справа.

Таблица 9. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 10 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Cu, %	Zr, %	W, %
150	4,0	0,1	58,4	35,0	0,0	2,5
350	3,0	0,15	45,85	20,0	29,0	2,0
550	2,0	0,2	35,8	-	60,0	2,0
950	0,9	0,5	24,6	-	72,0	2,0
1350	0,5	0,4	17,1	-	80,0	2,0
1750	0,5	0,3	12,3	-	85,0	2,0
2250	0,5	0,4	7,1	-	90,0	2,0
2750	0,4	0,1	1,5	-	96,0	2,0
3750	-	-	-	-	98,0	2,0

На рис. 11 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности первой Zr-1^2 фольги в сборке.

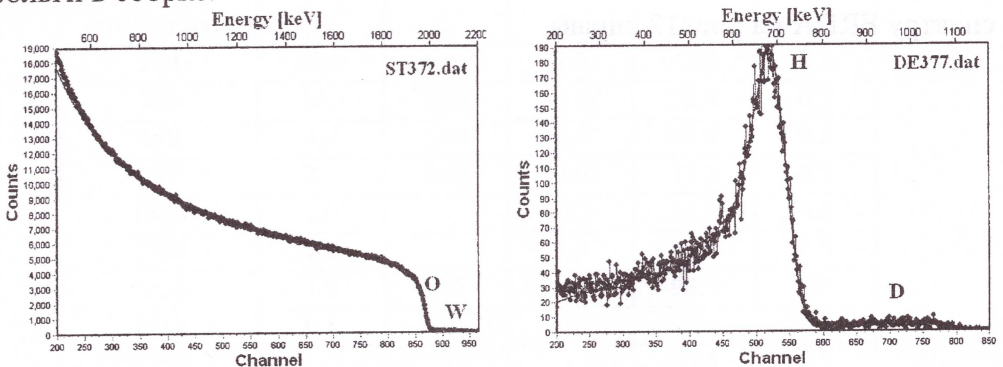


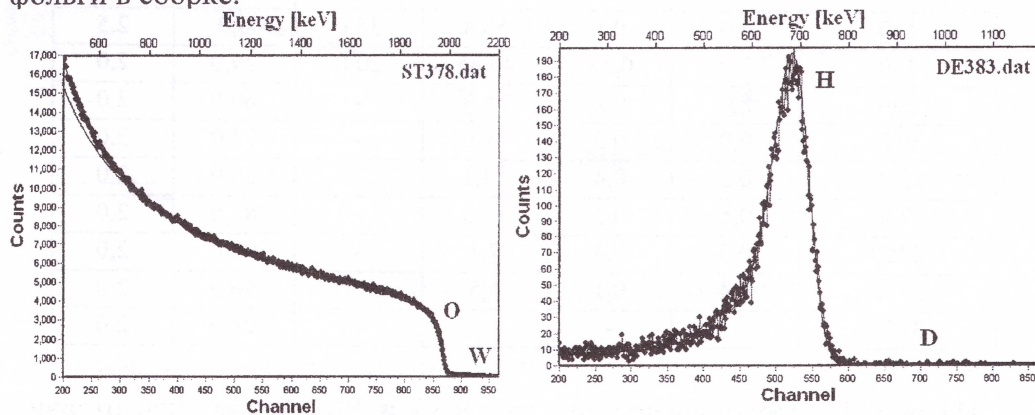
Рис. 11. RBS и ERDA поверхности Zr-1² фольги

В табл. 10 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 11 справа.

Таблица 10. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 11 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	10,0	0,2	54,6	35,0	0,2
350	8,0	0,2	44,5	47,0	0,3
550	5,0	0,2	34,4	60,0	0,4
950	3,5	0,1	24,0	72,0	0,4
1350	2,5	0,1	17,0	80,0	0,4
1750	2,0	0,1	12,5	85,0	0,4
2250	1,5	0,1	8,0	90,0	0,4
2750	0,2	0,1	3,3	96,0	0,4
3750	-	-	-	99,6	0,4

На рис. 12 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности второй ¹Zr-2 фольги в сборке.

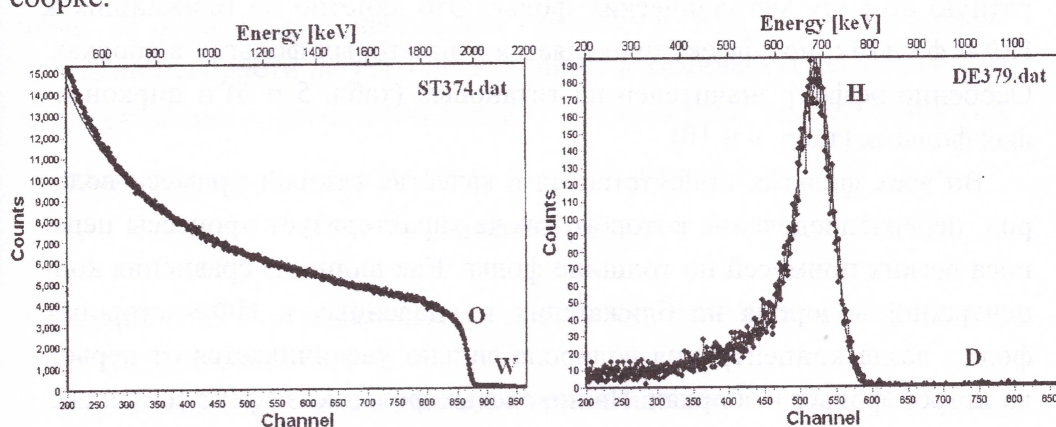
Рис. 12. RBS и ERDA поверхности ¹Zr-2 фольги

В табл. 11 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 12 справа.

Таблица 11. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 12 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	12,0	0,05	52,75	35,0	0,2
350	10,0	0,05	39,65	50,0	0,3
550	5,0	0,05	30,45	64,0	0,5
950	2,2	0,05	20,25	77,0	0,5
1350	1,0	-	12,0	86,5	0,5
1750	0,7	-	5,8	93,0	0,5
2250	0,6	-	-	98,9	0,5
2750	0,1	-	-	99,4	0,5
3750	-	-	-	99,5	0,5

На рис. 13 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности второй Zr-2² фольги в сборке.

Рис. 13. RBS и ERDA поверхности Zr-2² фольги

В табл. 12 приведены распределения элементов, соответствующие спектру ERDA на рис. 13 справа.

Таблица 12. Распределения элементов, соответствующие спектру ERDA, на рис. 13 справа

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	13,0	0,03	51,77	35,0	0,2
350	10,0	0,03	39,67	50,0	0,3
550	4,0	0,03	30,47	65,0	0,5
950	2,0	0,03	19,97	77,5	0,5
1350	1,0	-	12,0	86,5	0,5
1750	1,0	-	5,5	93,0	0,5
2250	1,0	-	-	98,5	0,5
2750	0,1	-	-	99,4	0,5
3750	-	-	-	99,5	0,5

Заключение

Следует отметить, что качество фольг после воздействия высокотемпературной плазмы на ближних к ПФ-4 сторонах первых фольг в сборках, весьма далеко от необходимого для надежных количественных RBS и ERDA исследований.

При обработке спектров RBS (см. рис. 2-13, левые) для более точной аппроксимации экспериментальных спектров вводились дополнительные элементы, такие как углерод, кислород, железо, медь и вольфрам.

Тем не менее, представляется важным проверка наличия в облученных образцах вышеперечисленных металлов на растровом микроскопе с зондовым рентгеновским анализом. Это касается в первую очередь меди и вольфрама, которые составляют материалы анодной вставки ПФ-4.

Как видно из табл. 1-12, происходит проникновение дейтерия на обратную сторону металлических фольг. Это заметно на ближайших к ПФ-4 фольгах, но эффект проявляется и на вторых фольгах в сборках. Особенно эффект значителен на титановых (табл. 5 и 6) и циркониевых фольгах (табл. 9 и 10).

Во всех фольгах присутствовал в качестве газовой примеси водород, перераспределение которого также характеризует процессы переноса легких примесей по толщине фольг. Как видно из сравнения концентраций водорода на ближайших и удаленных к ПФ-4 сторонах фольг, везде концентрация водорода сильно увеличивается от первой ко второй фольге в сборках. На никелевых фольгах: эффект составляет от 4 до 12 % (табл. 1 и 2) и от 7 до 17 % (табл. 3 и 4); на титановых фольгах - от 5 до 12 % (табл. 5 и 6) и от 12 до 14 % (табл. 7 и 8); на циркониевых фольгах - от 4 до 10 % (табл. 9 и 10) и от 12 до 13 % (табл. 11 и 12).

Обнаруженное явление здесь сверхглубокого проникновения водорода, а также и дейтерия (и ранее, смотри [12, 13, 17-19]), может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1-5, 13-19] на перераспределение водорода и дейтерия с переносом их как легких и слабосвязанных примесей на большие глубины.

Другим более разработанным подходом (см. также [12, 13, 17-19]) является рассмотрение ускоренной диффузии примесей при наличии внешних движущих сил F (см. монографию [11]). Тогда законы Фика для потока частиц следует представить в виде ([11] и [20]):

$$\bar{J} = -D \cdot \bar{\nabla} C(\bar{R}) + K \cdot \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(\bar{R})}{\partial t} = \bar{\nabla} [D \bar{\nabla} C(\bar{R})] - K \cdot \bar{\nabla} \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (2)$$

где внешняя движущая сила F придает каждому атому среднюю дополнительную скорость $\langle \bar{V} \rangle_F$, здесь K —коэффициент пропорциональности. Средняя дополнительная скорость каждого атома $\langle \bar{V} \rangle_F$, предположительно, может быть сопоставлена со скоростью распространения ударной волны, которая, как известно, превышает скорость распространения звука в материале в несколько раз [1-6, 12, 13, 17-19]. Как известно, при мощном импульсном воздействии вначале в материале распространяется упругая волна, которая на определенной глубине R_{E-S} , зависящей от материала и плотности мощности импульса на поверхности трансформируется в ударную волну с крутым передним фронтом - волны сжатия и волной разряжения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах $R < R_{E-S}$ в качестве дополнительной скорости легкого несвязанного в химическую связь и (или) слабо связанного примесного атома $\langle \bar{V} \rangle_F$, возможно, следует выбирать скорость объемной продольной V_{\parallel} или поперечной упругих V_{\perp} волн.

Литература

1. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 264 с.
2. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 304 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б, справочные приложения, банки данных, Т. IX-3, Под редакцией Грибкова В.А., М.: 591 с.
4. Иванов Л.И., Пименов В.Н., Грибков В.А. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами. Физика и химия обработки материалов, 2009, № 1, с. 23-37.
5. Антонова Л.Х., Боровицкая И.В., Горшков П.В. и др. Воздействие ударных волн на токонесущие свойства ВТСП ленты YBCO(123). Доклады Академии наук, Т. 428, № 4, с. 471-473, 2009.
6. Волобуев И.В., Горбунов Д.Н., Гранаткин Б.Н., Исаков А.И. Детекторы для нейтронов из короткоживущей плазмы. Труды ФИАН, Москва: Наука, 94 (1977), с.21-28.

7. Волобуев И.В., Грибков В.А., Денус С. и др. Исследование пространственной анизотропии нейтронного излучения на установках плазменный фокус. Краткие сообщения по физике, Москва, 1987, № 11, с.32-34.
8. Hrubčín L., Huran J., Štadník R. et al. Application of the ERD method for hydrogen determination in silicon (oxy)nitride thin films prepared by ECR plasma deposition. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 1994, V. 85, p. 60-62.
9. Кобзев А.П. Элементный анализ наноструктур на пучках заряженных частиц. В сборнике: Ядерная физика и нанотехнологии. Ядерно-физические аспекты формирования, изучения и применения наноструктур. Под редакцией А.Н.Сисакяна, 2008, с. 142-154.
10. Mayer M. // SIMNRA Users Guide. <http://rzg.mpg.de/~mam/>
11. Бокштейн Б.С.. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978, 248 стр.
12. Didyk A. Yu. Anomalously deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethylene (CD₂)_n under action of pulse high temperature hydrogen plasma. J. Part. Nucl. Lett. 2012, V.9, No.2, pp. 186-191.
13. Didyk A. Yu. Anomalously deep penetration of hydrogen in niobium at high temperature exposure pulses of hydrogen plasma. J. Part. Nucl. Lett. 2012, V. 9, No.3, pp.253-258.
14. Зельдович Я.Б. и Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 1963, 632 с.
15. Великович А.Л., Либерман М.А. Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987, 295 с.
16. Блейзер Г.А., Кривоногов В.П., Пащенко О.В. Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск, Наука, Сибирское издательство РАН, 1999, 176 с.
17. Didyk A. Yu., Borovitskaja I. V., Wiśniewski R. et al. Storage of deuterium and hydrogen in Ni-foils under influence of high temperature deuterium plasma. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013, No 3, pp. 22-26.
18. Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Ivanov L. I. et al. Transport of hydrogen in Nb-foil set under action of high temperature hydrogen plasma at "Plasma Focus" set up. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013, V.9, No.8, pp.1-5.
19. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p. Monograph.
20. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975, 382 с.

**Труды XXV Международной конференции
«Радиационная физика твёрдого тела»
(Севастополь, 6 – 11 июля 2015 г.)**

Научный редактор:
д.ф.-м.н. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 29. 05. 2015г.
Бумага типографская. Печать - ризография.
Формат 70x108/16.
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12
Тел/факс (499) 959-37-03, 959-37-05 e-mail: info@niipmt.ru
Отпечатано в ООО «Телер»
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: piskarev@teler.ru

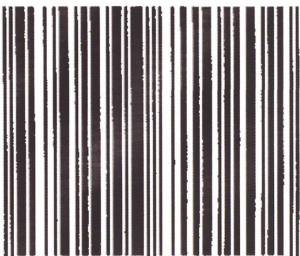
ISBN 978-5-89671-020-2



9 785896 710202



ISBN 978-5-89671-020-2



9 785896 710202