

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., Вишневецкий 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., Глов 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., Блашенко 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 холловского 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 В.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 твёрдого 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	

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА В СБОРКАХ Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb, ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АРГОНА НА УСТАНОВКЕ ПФ-4

А.Ю. Дидык¹, И.В. Боровицкая², В.С. Куликаускас³, Г.Г. Бондаренко⁴,
А.А. Ерискин^{4,5}, В.Я. Никулин^{5,7}, П.В. Силин⁵,
В. Белоус⁶, Я. Васяк⁶, Е. Хаевска⁶

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,
Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына,
МГУ, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия

⁵Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

⁶Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

⁷Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Сборки из Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb фольг были облучены 30-ю импульсами аргоновой высокотемпературной плазмы на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4). После облучения все образцы фольг были исследованы методом регистрации ядер отдачи водорода и дейтерия (ERDA) с обеих сторон каждой фольги. Обнаружено перераспределение водорода и дейтерия в стопках фольг. Экспериментальные результаты по сверхглубокому проникновению легких газовых примесей: водорода и дейтерия объясняются на основе воздействия на фольги ударных волн и ускоренной диффузии под действием внешней силы.

Введение

За последние годы в связи с успехами в лазерной технике и создании мощных импульсных лазеров в пико- (10^{-12} с) и фемтосекундных (10^{-15} с) диапазонах значительное развитие получила относительно новая область науки - физика высокой плотности энергии [1-4]. Помимо этого сформировалось и другое важное направление исследований по воздействию мощных импульсов лазерного излучения с целью создания лазерного управляемого ядерного синтеза.

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 легкой примеси водорода, всегда присутствующего в металлах и дейтерия, содержащегося в дейтерированном полиэтилене $(CD_2)_n$, от импульсной аргоновой плазмы, которые изучались путем детектирования упруго рассеянных атомов отдачи (elastic recoil detection - ERDA) водорода и дейтерия при Резерфордском обратном рассеянии (Rutherford backscattering spectrometry – RBS).

Методика исследований

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов, на установке ПФ-4 в Физическом институте РАН [3-5] на установке «Плазменный Фокус-ПФ» для получения мощных потоков плазмы и изучения ее воздействия на материалы. Облучение образцов сборок металлов Ta, Nb и дейтерированного полиэтилена проводилось на установке ПФ-4 в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН аргоновой высокотемпературной плазмой. 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.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия аргоновой высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки до мишени составляло 45 мм (Рис. 1). При воздействии дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов при термоядерной реакции ${}^2_1d + {}^2_1d \rightarrow n + {}^3_2He$ из дейтерированного полиэтилена нейтронными детекторами, описанными в [6, 7].

На рис. 1 представлена схематически схема облучения на ПФ-4.

Во всех трех случаях толщина дейтерированного полиэтилена составляла 240 мкм.

Для изучения воздействия использовалась аргоновая плазма, поскольку при максимальной энергии ионов от ПФ-4 аргона до 10 кэВ пробег таких ионов в фольгах мал, а их концентрация относительно низкая. Для удобства, как и в работах [8, 9, 14, 15] и в монографии [16], использованы обозначения для фольг в виде ${}^1\text{Мет}-1^2$, верхние индексы означают: 1 – передняя сторона, 2 – дальняя сторона, а 1 – номер фольги в сборке.

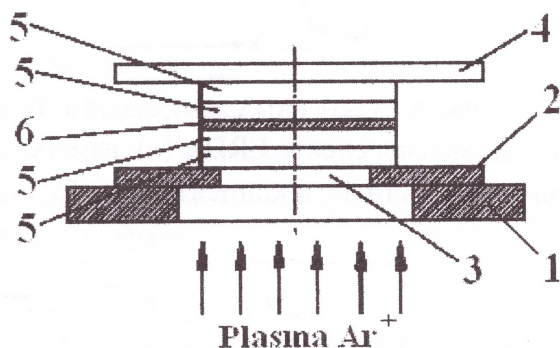


Рис.1. Сборка металлических фольг для облучения импульсной аргоновой высокотемпературной плазмой на плазменном фокусе ПФ-4 [4, 5] (поток плазмы снизу). 1 – нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 – передняя диафрагма с диаметром отверстия – 3; равным 10 или 15 мм; 4 – прижимная пластина из НС, а 5 – две или четыре фольги из одного материала; 6 – дейтерированный полиэтилен $(\text{CD}_2)_n$.

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия

В экспериментах использовались следующие сборки из фольг:

- 1) Ta-1|(CD₂)_n|Ta-2 с толщиной фольг по 100 мкм;
- 2) Ta-1|Ta-2|(CD₂)_n|Ta-3|Ta-4 с толщиной фольг по 50 мкм;
- 3) Nb-1|(CD₂)_n|Nb-2 с толщиной фольг по 105 мкм.

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 Научно-исследовательского ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ

(НИИЯФ МГУ). Обработка спектров была проведена с применением стандартной программы SIMNRA 6.06.

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Ta-1|(CD₂)_n|Ta-2

На рис. 2 представлены спектр ERDA, измеренный в первой фольге из 1-ой сборки (¹Ta-1). Видно, что дейтерий присутствует в виде затянутого хвоста на графике.

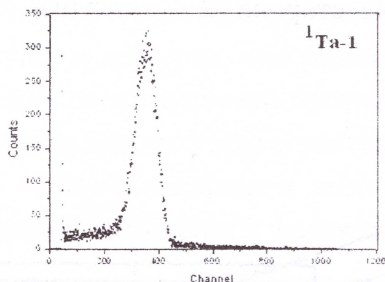


Рис. 2. Спектр ERDA, измеренный в ¹Ta-1

На рис. 3 представлены спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 1-ой сборки - Ta-1², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б).

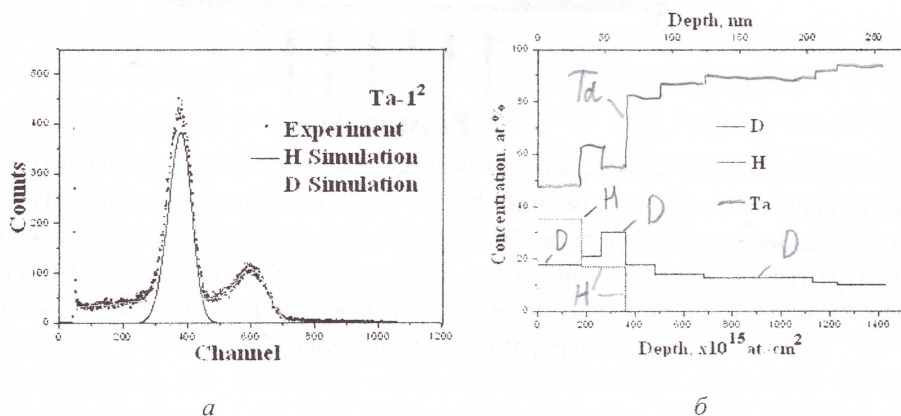
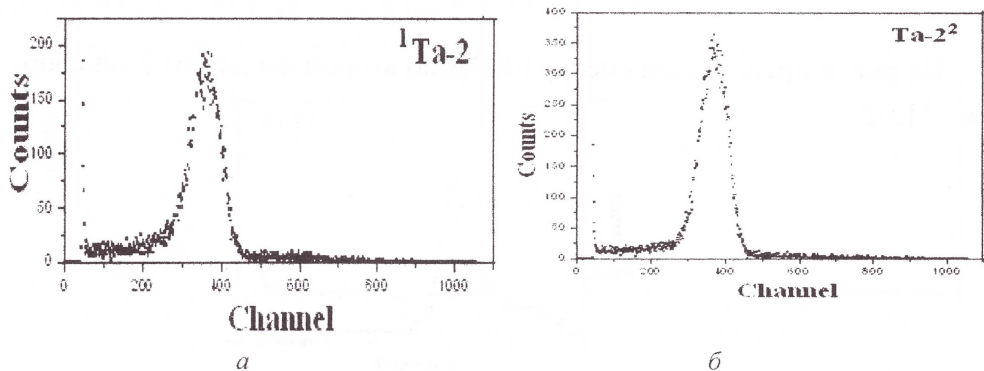


Рис. 3. Спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 1-ой сборки - Ta-1², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б)

Из спектра ERDA (рис. 3(а)) и распределения концентраций (рис. 3(б)) можно сделать вывод, что концентрация водорода составляет в максимуме до 35 ат. %, а концентрация дейтерия затянута на большую глубину и в максимуме достигает около 29 ат.%. Поэтому можно сделать вывод, что имеет место обратное проникновение дейтерия из дейтерированного полиэтилена в первую танталовую фольгу.

На рис. 4 представлены спектры ERDA из 1-ой сборки - ¹Ta-2 (а) и Ta-2² (б).

Рис. 4. Спектры ERDA из 1-ой сборки - ${}^1\text{Ta-2}$ (а) и Ta-2^2 (б)

Видно, что здесь также дейтерий присутствует в виде затянутых хвостов на графиках (рис. 4(а) и рис. 4(б), как и на рис. 2.

Представим также расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для обеих Та фольг в сборке 1. Имеем:

$\Sigma_D^{1\text{Ta-1}} \Rightarrow$ малая концентрация;

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-2}} = 2,37 \times 10^{17} \text{ ат./см}^2; n_{D,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 30 \text{ ат.}\%; \Sigma_H^{1\text{Ta-2}} = 9,36 \times 10^{16}$$

$$\text{ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 35 \text{ ат.}\%; \Sigma_D^{1\text{Ta-2}} = 4,42 \times 10^{15} \text{ ат./см}^2;$$

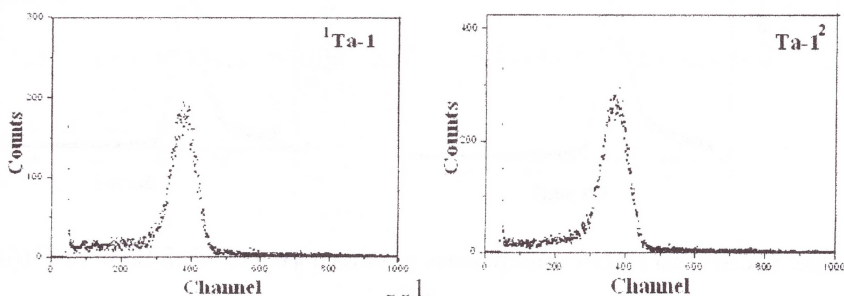
$$n_{D,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 0,9 \text{ ат.}\%; \Sigma_H^{1\text{Ta-2}} = 2,81 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 9,5 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-2}^2} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{1\text{Ta-2}^2} = 4,94 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-2}^2} = 17 \text{ ат.}\%.$$

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Та-1|Та-2|(CD₂)_n|Та-3|Та-4

На рис. 5 представлены спектры ERDA из первой фольги 2-ой сборки ${}^1\text{Ta-1}$ (а) и Ta-1^2 (б).



a

б

Рис. 5. Спектры ERDA из 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-1}$ (*a*) и Ta-1^2 (*б*)

На рис. 6 представлен спектр ERDA во второй фольге из 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-2}$.

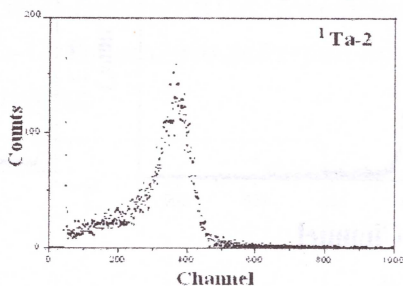


Рис. 6. Спектр ERDA из второй фольги 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-2}$

На рис. 7 представлен спектр ERDA (*a*), измеренный во второй фольге из 2-ой сборки - Ta-2^2 , и концентрации Ta, водорода и дейтерия (*б*).

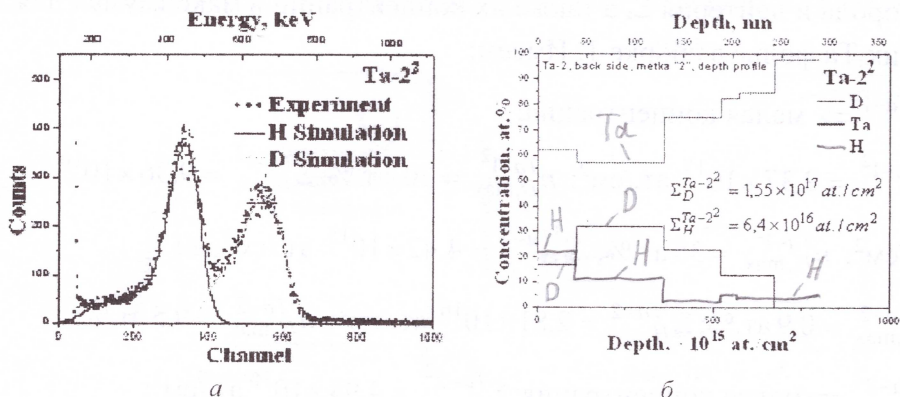


Рис. 7. Спектр ERDA (*a*), измеренный во второй фольге из 2-ой сборки - Ta-2^2 , и концентрации Ta, водорода и дейтерия (*б*)

На рис. 8 представлены спектры ERDA (*a*), измеренные в третьей фольге из 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-3}$ (*a*) и Ta-3^2 (*б*).

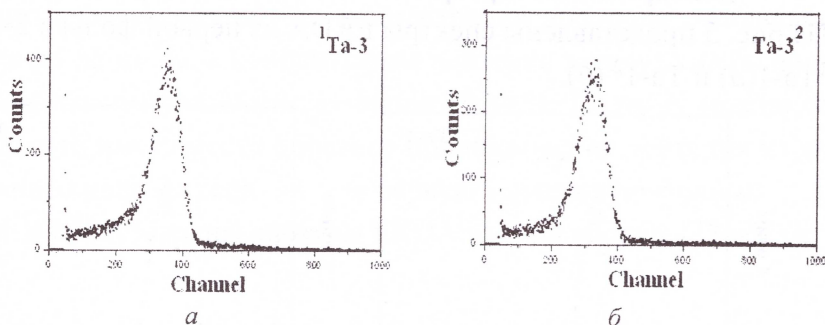


Рис. 8. Спектры ERDA, измеренные в третьей фольге ${}^1\text{Ta-3}$ (*a*) и Ta-3^2 (*б*)

На рис. 9 представлены спектры ERDA (а), измеренные в четвертой фольге из 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-4}$ (а) и Ta-4^2 (б).

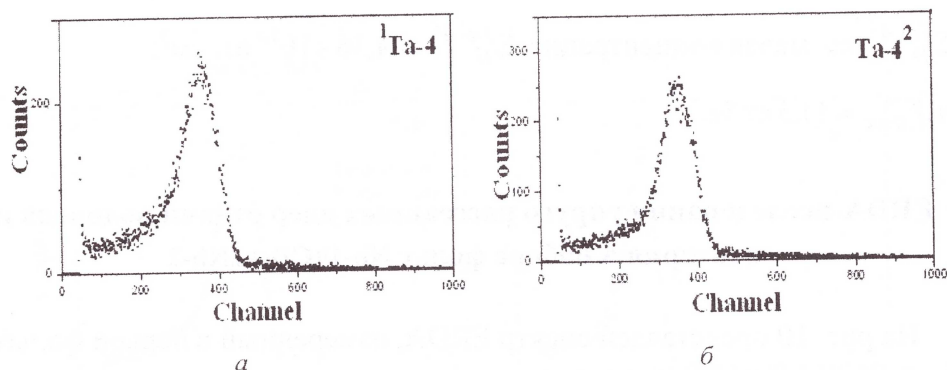


Рис. 9. Спектры ERDA (а), измеренные в четвертой фольге из 2-ой сборки - ${}^1\text{Ta-4}$ и Ta-4^2

Представим расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для четырех Та фольг в сборке 2. Имеем:

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-1}} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{1\text{Ta-1}} = 2,74 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-1}} = 11 \text{ ат.}\%$$

$$\Sigma_D^{\text{Ta-1}^2} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{\text{Ta-1}^2} = 4,2 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{\text{Ta-1}^2} = 14 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-2}} \Rightarrow \text{малая концентрация};$$

$$\Sigma_H^{1\text{Ta-2}} = 5,25 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 14 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{\text{Ta-2}^2} = 1,55 \times 10^{17} \text{ ат./см}^2; n_{D,\text{max}}^{\text{Ta-2}^2} = 32 \text{ ат.}\%; \Sigma_H^{\text{Ta-2}^2} = 6,4 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{\text{Ta-2}^2} = 21 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-3}} = 9,4 \times 10^{15} \text{ ат./см}^2; n_{D,\text{max}}^{1\text{Ta-3}} = 1,7 \text{ ат.}\%; \Sigma_H^{1\text{Ta-3}} = 6,6 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-3}} = 18 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{\text{Ta-3}^2} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{\text{Ta-3}^2} = 4,99 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{\text{Ta-3}^2} = 12,7 \text{ ат.}\%;$$

$\Sigma_D^{Ta-4} \Rightarrow$ малая концентрация; $\Sigma_H^{Ta-4} = 4,78 \times 10^{16}$ ат./см²;

$n_{H,max}^{Ta-4} = 12$ ат.%;

$\Sigma_D^{Ta-4^2} \Rightarrow$ малая концентрация; $\Sigma_H^{Ta-4^2} = 4,36 \times 10^{16}$ ат./см²;

$n_{H,max}^{Ta-4^2} = 11,5$ ат.%.
 ERDA

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Nb-1|(CD₂)_n|Nb-2

На рис. 10 представлен спектр ERDA, измеренный в первой фольге 3-ей сборки ¹Nb-1.

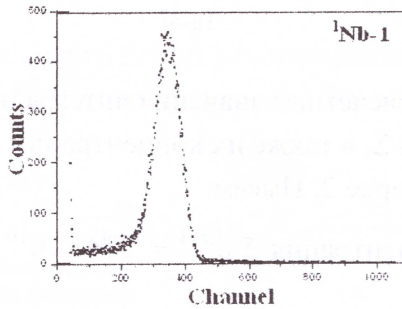


Рис. 10. Спектр ERDA из первой фольги 3-ей сборки - ¹Nb-1

На рис. 11 представлен спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 3-ей сборки - Nb-1²(а) и концентрации Nb, водорода и дейтерия (б).

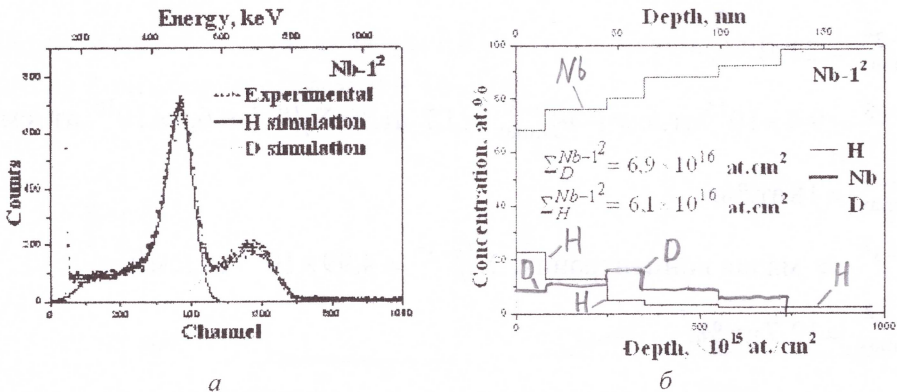


Рис. 11. Спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 3-ей сборки - Nb-1², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б)

На рис. 12 представлены спектры ERDA, измеренные во второй фольге 3-ой сборки ${}^1\text{Nb-2}$ и Nb-2^2 .

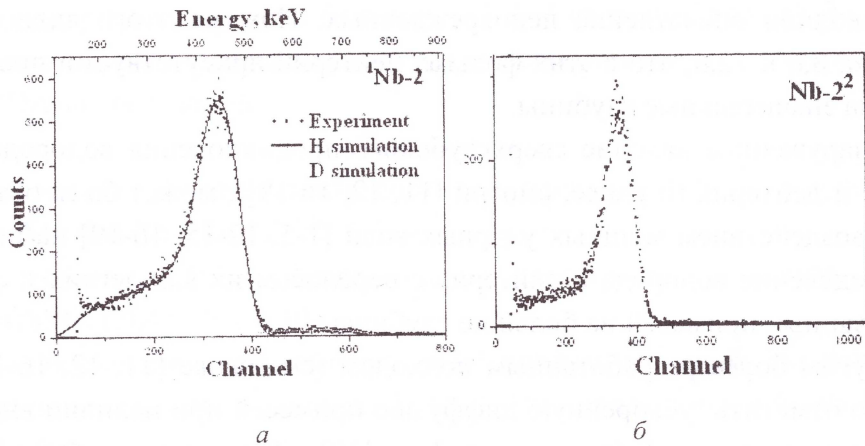


Рис. 12. Спектры ERDA (а), измеренные во второй фольге 3-ой сборки ${}^1\text{Nb-2}$ и Nb-2^2

Представим расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для обеих Nb фольг в сборке 3, имеем:

$$\Sigma_D^{1\text{Nb-1}} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{1\text{Nb-1}} = 6,8 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{1\text{Nb-1}} = 18 \text{ ат.}\%; \Sigma_D^{\text{Nb-1}^2} = 6,9 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{D,\text{max}}^{\text{Nb-1}^2} = 14 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_H^{\text{Nb-1}^2} = 6,1 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{\text{Nb-1}^2} = 23 \text{ ат.}\%; \Sigma_D^{1\text{Nb-2}} = 1,15 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2;$$

$$n_{H,\text{max}}^{1\text{Nb-2}} = 1,9 \text{ ат.}\%; \Sigma_H^{1\text{Nb-2}} = 1,05 \times 10^{17} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{1\text{Nb-2}} = 21 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{\text{Nb-2}^2} \Rightarrow \text{малая концентрация}; \Sigma_H^{\text{Nb-2}^2} = 4,6 \times 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\text{max}}^{\text{Nb-2}^2} = 11 \text{ ат.}\%.$$

Заключение

Сравнивая рис. 7,а и рис. 11,а с рис. 3,а можно сделать вывод, что аппроксимация экспериментального спектра на рис. 3,а проведена не вполне корректно. Из сравнения спектров Nb-1^2 (рис. 11,а) и Ta-1^2 (рис. 11,а) водород распространяется на всю толщину фольг, а дейтерий проникает только до определенных глубин. Тем не менее, можно сделать однозначный вывод по всем трем сборкам, что Ta-1^2 (сборка

1), Ta-2² (сборка 2) и Nb-1² фольги, примыкающие к дейтерированному полиэтилену (CD₂)_n, особенно ближняя к ПФ-4, приобретают дейтерий на значительную глубину, при этом прилипания к металлическим фольгам не наблюдалось, а дейтерированные фольги (CD₂)_n внешне производили впечатление неповрежденных. Помимо этого видно из рис.4,а, 8,а и 12,а, что в этих фольгах дейтерий присутствует и проникает на значительные глубины.

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, а также и дейтерия (и ранее, смотри [11, 12, 16-19]), может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1-5, 12-15, 16-19] на перераспределение водорода и дейтерия с переносом их как легких и слабосвязанных примесей на большие глубины.

Другим более разработанным подходом (см. также [11, 12, 16-18]) можно отметить: ускоренную диффузию примесей при наличии внешних движущих сил F (см. монографию [10]). Тогда законы Фика для потока частиц следует представить в виде ([10] и [19]):

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

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

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, 11, 12, 16-18]. 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.

Полученные в данной работе результаты согласуются с ранее выполненными исследованиями в сборках фольг Nb|CD₂|Nb, облученных водородной плазмой [8], в сборках фольг Ta|CD₂|Ta, облученных азот-

ной высокотемпературной плазмой [17, 18] (см. также [16]), а также распределение дейтерия и водорода в вольфрамовых фольгах с тяжелой водой [19].

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

Литература

1. Фортгов В.Е. Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 264 с.
2. Фортгов В.Е. Экстремальные состояния вещества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 304 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б, справочные приложения, банки данных, Т. IX-3, Под редакций 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. Didyk A.Yu. Anomalously deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethelene (CD₂)_n under action of pulse high temperature hydrogen plasma. J. Part. Nucl. Lett. 2012, V.9, No.2, pp. 186-191.
9. 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.
10. Бокштейн Б.С.. Диффузия в металлах. М.: Metallurgia, 1978, 248 стр.

11. Зельдович Я.Б. и Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 1963, 632 с.
12. Великович А.Л., Либерман М.А. Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987, 295 с.
13. Блейзер Г.А., Кривобоков В.П., Пашенко О.В. Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск, Наука, Сибирское издательство РАН, 1999, 176 с.
14. 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.
15. 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.
16. Didyk A.Yu., Wiśniewski R. Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p. Monograph.
17. Дидык А.Ю., Хаевска Е., Хофман А., Куликаускас В., Серушкин С.В. Распределения дейтерия и водорода в сборке Ta|CD₂|Ta фольг при воздействии высокотемпературной азотной плазмы. *Поверхность*, 2014, № 8, с.87-94.
18. Didyk A.Yu., Hajewska E, Hofman A., Kulikauskas V.S. and Serushkin S.V. Deuterium and Hydrogen Distribution in a Stack of Ta|(CD₂)_n|Ta Foils under the Action of High Temperature Pulsed Nitrogen Plasma. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, Vol. 8, No. 4, pp. 814–820.
19. Дидык А.Ю., Бехтерев В.А., Куликаускас В.С., Серушкин С.В., Никулин В.Я., Силин П.В., В. Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. Распределение водорода и дейтерия в фольгах из вольфрама, облученных дейтериевой высокотемпературной плазмой в заполненных H₂O и D₂O герметичных камерах. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 8. с. 1-9.

**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

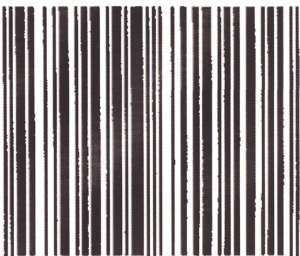
ISBN 978-5-89671-020-2



9 785896 710202



ISBN 978-5-89671-020-2



9 785896 710202