

# *Раздел пятый* **ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.384.65.038

## **УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ ГЕНЕРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ**

*Г.Д. Толстолицкая, В.В. Ружицкий, И.Е. Копанец, В.Н. Воеводин,  
А.В. Никитин, С.А. Карпов, А.А. Макиенко, Т.М. Слюсаренко*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,  
Харьков, Украина*

*E-mail: g.d.t@kipt.kharkov.ua*

Представлено описание комплекса из трех ускорителей заряженных частиц, пучки которых совмещены на мишени. Комплекс обеспечивает возможность одновременного облучения материалов пучками тяжелых ионов для создания повреждений на уровне 1...200 смещений на атом, а также ионами гелия и водорода для исследования влияния накопления этих газов на развитие повреждаемости и изменение физико-механических свойств конструкционных материалов. Помимо облучения комплекс обеспечивает измерение ядерно-физическими методами пространственно-концентрационных распределений внедренных газовых примесей и исследование их эволюции в процессе облучения и отжига.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Создание реакторных установок новых поколений в качестве первоочередной задачи требует разработки новых классов материалов, способных работать при значительном повышении уровня повреждающих доз, более высоких температурах эксплуатации, комплексном воздействии водорода и гелия и т. д. [1]. Одним из путей выбора радиационно-стойких материалов является привлечение современных методов моделирования радиационной повреждаемости с использованием соответствующей экспериментальной базы.

Важным критерием безопасной и эффективной работы конструкционных материалов является их стойкость по отношению к вакансионному набуханию [2]. Рассматривая этот аспект, необходимо отметить, что в процессе работы будущих энергетических установок будут накапливаться большие концентрации гелия и водорода. Влияние трансмутационных газов на характеристики радиационного набухания значительно и до настоящего времени еще не нашло полного понимания.

Для выяснения механизмов процессов, приводящих к газовому набуханию, необходимо: установить закономерности захвата гелия и водорода ловушками; определить тип и емкость этих ловушек; получить подробные данные о процессах образования и миграции газовых пузырьков, их взаимодействии с вакансиями и вакансионными комплексами; определить, какие микроструктурные неоднородности являются местами зародышеобразования и удержания кластеров вакансия-атом газа; исследовать влияние создания повреждений на протекание этих процессов.

Многие из вышеперечисленных задач могут быть решены при следующем подходе:

- создание повреждений и введение газовых примесей методом ионной имплантации;

- измерение профилей распределения внедренных газовых примесей и исследование их эволюции в процессе облучения и отжига;

- определение температурных интервалов удержания гелия и водорода в конструкционных материалах;

- определение термодинамических параметров взаимодействия дейтерия с материалами при математическом моделировании, с использованием полученных экспериментальных результатов, процессов имплантации, диффузии, захвата, освобождения из ловушек, рекомбинации и др.

В настоящей работе приведено описание установки, которая в рамках предложенного подхода позволяет в одной экспериментальной камере облучать мишени пучками тяжелых ионов с целью создания повреждений на уровне 1...200 смещений на атом (сна), одновременно ионной имплантацией вводить газовые примеси – гелий и водород, а после облучения исследовать образцы ядерно-физическими методами.

### **2. ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА С ЭНЕРГИЕЙ ЧАСТИЦ 3...50 кэВ**

Система облучения тремя пучками сконструирована, изготовлена и введена в эксплуатацию на базе измерительного комплекса ЭСУ-2. Измерительный комплекс представляет собой прибор, в состав которого входят: высоковольтный электростатический типа Ван-Граафа ускоритель газовых ионов от водорода до ксенона с энергией 200...2000 кэВ; камера магнита с отключаемыми устройствами; экспериментальная камера для облучения образцов и исследования их ядерно-физическими методами; пульт управления измерительным комплексом; измерительно-вычислительное оборудование, позволяющее

управлять работой комплекса и автоматизировать обработку результатов эксперимента.

Одновременное введение гелия и водорода осуществлено с помощью двух облучательных устройств, обеспечивающих возможность варьирования энергии частиц в диапазоне 3...50 кэВ. Основными функциональными узлами для обоих облучательных устройств являются:

- ◆ источник ионов с системой напуска газа;
- ◆ ускоряющая система;
- ◆ вакуумная камера;
- ◆ поворотный масс-анализатор;
- ◆ система вакуумной откачки;
- ◆ источник высокого напряжения – 0...50 кВ;
- ◆ комплекс источников электропитания

источника ионов.

Различие заключается только в газе, напускаемом в источник, в одном устройстве это гелий, в другом – дейтерий или водород. Схема облучательного устройства показана на рис. 1.

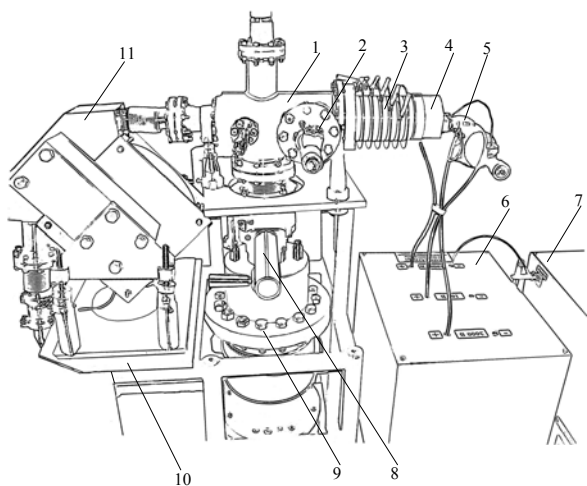


Рис. 1. Схема облучательного устройства:

- 1 - вакуумная камера; 2 - цилиндр Фарадея;
- 3 - ускоряющая трубка; 4 - источник ионов;
- 5 - система напуска рабочего газа; 6 - блок питания источника; 7 - блок высокого напряжения;
- 8 - азотная ловушка с высоковакуумным клапаном;
- 9 - насос ТМН; 10 - станина;
- 11 - магнитный масс-анализатор

**Источник ионов.** Источник ионов служит для получения ионов гелия или водорода, их предварительного ускорения, фокусировки и последующей инъекции в ускоряющую трубку, где происходит их ускорение до высоких энергий. Требования, предъявляемые к ионному источнику, определяются его конкретным назначением и специфическими условиями работы. Среди требований можно отметить следующие: эмиттирование пучка ионов с необходимой силой тока; определенный состав ионов; определенные энергетические характеристики и стабильность; минимальный расход газа; минимальная затрата мощности и, в первую очередь, мощности, рассеиваемой в ионном источнике; надежная и простая конструкция; достаточный срок службы.

Принцип действия ионных источников основывается на различных методах получения

положительных ионов: ионизации атомов на поверхности твердого тела, ионизации газа электронным пучком, на газовом разряде и т. п. Наибольшее распространение в настоящее время получили плазменные источники, в частности, источники с разрядом с холодным катодом. Сюда относятся источники, в которых инициируется стационарный или импульсный тлеющий разряд в магнитном поле (разряд Пеннинга), или дуговой разряд с холодным катодом (при малом падении потенциала), которому может предшествовать разряд Пеннинга [3].

В настоящей работе за основу взят источник с разрядом Пеннинга и продольным извлечением ионов. Разрядная система Пеннинга представляет собой два противостоящих холодных электрода, служащих катодами, и анод, выполненный в виде кольца (рис. 2).

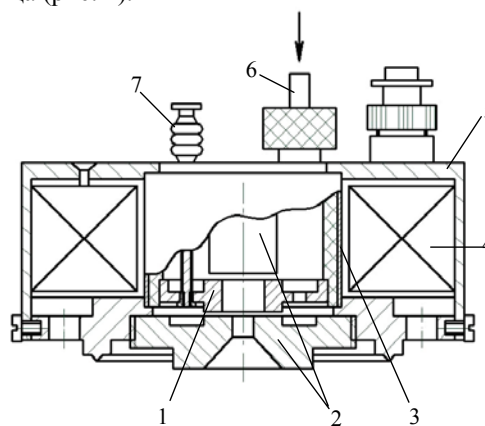


Рис. 2. Схема источника ионов:

- 1 – анод; 2 – катоды; 3 – цилиндр из нержавеющей стали; 4 – магнит; 5 – корпус магнитопровода;
- 6 – трубка подачи рабочего газа; 7 – керамический гермоввод подачи анодного напряжения

Извлечение ионов из плазмы газового разряда осуществляется электрическим полем, приложенным между фланцем-катодом ионного источника и первым электродом ускоряющей трубки. Такой источник позволяет получать в экспериментальной камере ионы различных газов с интенсивностью 1...20 мкА.

**Ускоряющая трубка** используется для непосредственного ускорения заряженных частиц в постоянном электрическом поле и состоит из серии тонких плоскопараллельных металлических электродов (нержавеющая сталь Х18Н10Т), разделенных плоскопараллельными изоляторами из электрофарфора марки ИКУ. Электроды с изоляторами соединены в единое целое с помощью клеевых (клей БФ-4) вакуумно-плотных соединений. При приложении напряжения между двумя электродами, разделенными изолятором, в пространстве между ними возникает практически однородное электрическое поле. Каждый из зазоров трубки, в котором создается такое поле, называется секцией, а ускоряющая трубка такой конструкции – секционной. В металлических электродах вдоль оси трубки проделаны отверстия диаметром 30 мм для прохождения ионного пучка и вакуумной

откачки. На входном и выходном концах ускорительной трубки имеются фланцы для подсоединения трубки к вакуумной камере ускорителя и присоединения к ней ионного источника.

Равномерное распределение напряжения между секциями ускорительной трубки осуществляется с помощью делителя напряжения, резисторы которого размещены между градиентными пластинами.

**Вакуумная камера** выполнена из трубы из нержавеющей стали X18H10T длиной 350 мм и наружным диаметром 100 мм. Помимо фланца для присоединения ускоряющей системы вакуумная камера имеет также 4 патрубка с фланцами.

Выходной патрубок камеры служит для ее подсоединения к электромагниту. Верхний патрубок камеры служит для подсоединения ионизационного манометрического датчика, используемого для измерения высокого вакуума. К короткому боковому патрубку подсоединяется манометрическая лампа для измерения разряжения, создаваемого форвакуумной системой. Еще один боковой патрубок предназначен для подсоединения фланца с цилиндром Фарадея для измерения тока пучка с плунжерной электромагнитной системой, управляющей расположением цилиндра Фарадея по отношению к ионному пучку. Нижний патрубок базовой камеры через сильфонный переход стыкуется с высоковакуумным проходным клапаном с ручным управлением типа фирмы GERTNER (Германия), соединяющим камеру с системой вакуумной откачки.

Вакуумная камера закрепляется на станине ускорительного комплекса с помощью трех шарнирных регулируемых опор. На две из них опирается входной патрубок вакуумной камеры, к которому присоединена ускорительная трубка. Третья опора подсоединена к выходной (по ходу пучка) части камеры. Эта система опор служит юстировочным устройством и используется при наладке облучательного устройства для совмещения осей ускорительной трубки и других элементов транспортировки ионного пучка. Юстировочное устройство позволяет перемещать камеру с ускоряющим устройством в горизонтальной плоскости на  $\pm 20$  мм от исходного положения, смещать ось камеры на  $\pm 10$  мм в вертикальной плоскости, а также поворачивать ось камеры на угол  $\sim 2^\circ$  в любом из направлений.

**85-градусный магнитный масс-анализатор.** Для выделения пучка ионов водорода и гелия из общего ионного пучка и разворота пучков использовали статический магнитный масс-анализатор. Принцип действия анализатора основан на том, что при движении заряженной частицы заданной энергии в поперечном магнитном поле заданной величины радиус кривизны ее траектории однозначно определяется массой частицы. Поэтому после прохождения магнитного поля ионы с разными массами разделяются в пространстве.

Используемый в настоящем ускорителе масс-анализатор состоит из электромагнита и размещенной между его полюсными наконечниками

вакуумной камеры-ионопровода, внутри которой и происходит движение ионного пучка. Радиус средней траектории пучка ионов в магнитном масс-анализаторе  $R = 0,2$  м; угол, на который поворачивается пучок при прохождении между полюсами магнита,  $\varphi = 85^\circ$ .

Камера-ионопровод выполнена из нержавеющей стали X18H10T. Она имеет форму изогнутого прямоугольного короба с сильфонным переходом и соединительными фланцами на концах. Поперечное сечение камеры составляет  $10 \times 40$  мм. Как известно [4], рабочая траектория ионов должна отстоять от края полюсного наконечника не менее чем на 1,5 величины межполюсного зазора, чтобы исключить влияние на нее неоднородностей магнитного поля, обусловленных краевыми эффектами. Исходя из таких соображений, нами были выбраны форма и размеры полюсных наконечников. При изготовлении электромагнита особое внимание уделялось чистоте обработки поверхностей полюсных наконечников, параллельности плоскостей, образующих магнитный зазор, а также соосности установки полюсных наконечников.

Магнитное поле в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита образуется в результате протекания постоянного электрического тока по катушке, закрепленной на его магнитопроводе. При изменениях тока, связанных с нестабильностью напряжения источника питания, будет изменяться радиус средней траектории ионов в анализаторе и, как следствие, возникнут отклонения пучка от оси на некоторый угол, величина которого зависит от угла поворота пучка магнитным анализатором и от степени нестабильности магнитного поля. Оценки показали, что требуемая стабилизация источника питания электромагнита масс-анализатора по току должна быть не хуже  $1 \cdot 10^{-3}$  или 0,1%.

Магнитное поле можно изменять, меняя величину тока, протекающего по обмотке электромагнита. Значение магнитного поля, необходимого для того, чтобы провести через магнитный анализатор (по радиусу  $R$ ) пучок ионов массой  $m$ , ускоренный разностью потенциалов  $U$ , можно определить из соотношения:  $H = (1/R)\sqrt{2mU/e}$ . Для прохождения через масс-анализатор ионов  $H_2^+$  и ионов  $He^+$  с энергией 50 кэВ необходимы значения магнитного поля 1600 и 3000 Э соответственно.

Электромагнит был рассчитан, сконструирован и изготовлен, исходя из требования получения максимально возможной однородности магнитного поля на круговой рабочей траектории диаметром  $\sim 400$  мм с диапазоном изменения индукции магнитного поля 0,05...0,45 Тл [4].

Юстировка магнита вместе с камерой осуществляется с помощью юстировочного стола, на котором закреплен электромагнит. Юстировочное устройство масс-анализатора позволяет производить поступательное перемещение, повороты и наклоны магнита с высокой точностью, а также фиксировать его в нужном положении.

На рис. 3 приведена спектрограмма ионов, попадающих в камеру мишени, в зависимости от величины магнитного поля масс-анализатора. Наблюдается хорошее разрешение (выделение) атомарного и молекулярного водорода и гелия.

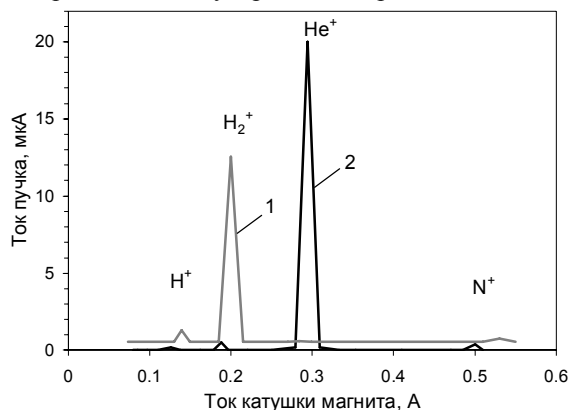


Рис. 3. Спектрограмма ускоренных до энергии 30 кэВ ионов пучка в устройствах для облучения ионами водорода (1) и гелия (2)

Ионопроводы облучательных устройств выполнены полностью из нержавеющей стали с использованием аргоно-дуговой сварки для сварных соединений. Фланцевые соединения уплотняются с помощью металлических прокладок, за исключением фланцевых соединений ускорительных трубок и вакуумных клапанов, где в качестве прокладок используется витон.

**Вакуумная система откачки** состоит из турбомолекулярного насоса и форвакуумной линии, ловушек с жидким азотом, высоковакуумных проходных клапанов с ручным управлением и датчиков вакуума. В комплект форлинии входят: форнасос типа 2НВР-5ДМ производительностью 5 л/с по воздуху; ловушка, охлаждаемая жидким азотом; вакуумный цельнометаллический с металлическим уплотнением тарелки затвор; переходники; вентиль-натекатель для впуска воздуха в форнасос, предотвращающего попадание масла в форлинию. Система вакуумной откачки обеспечивает давление остаточных газов в вакуумной камере облучательных устройств не выше  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.

**Станина** для крепления вакуумной камеры и магнита снабжена регулировочными устройствами.

Каждая из облучательных установок имеет комплект разделительных трансформаторов для питания инжекторов ионов гелия или водорода, а также источник высокого напряжения на 50 кВ.

**Источник питания инжекторов ионов (ИПИИ).** В состав ИПИИ входят следующие элементы и узлы:

1 - высоковольтный генератор выпрямленного напряжения величиной 50 кВ (ВГН);

2 - источник питания инжектора ионов (ИП), включающий разделительные трансформаторы для электросхемы питания инжектора ионов (РТВ).

ВГН представляет собой высоковольтный выпрямитель, состоящий из повышающего трансформатора, блока выпрямления и сглаживающего напряжения, омического делителя напряжения и

короткозамыкателя. Конструктивно ВГН состоит из изоляционного стеклопластикового корпуса и расположенных внутри элементов схемы выпрямления с удвоением.

ВГН имеет следующие характеристики:

выпрямленное напряжение, кВ...0...50 ( $\pm 10\%$ )  
ток нагрузки,  $10^{-6}$  А.....500 ( $\pm 10\%$ )  
пульсации напряжения, % .....  $\pm 0,016$   
напряжение питания, В/Гц.....220/50.

ИП и РТВ имеют следующие технические характеристики:

изоляция относительно земли, кВ ..... 50  
число независимо регулируемых напряжений (каналов)..... 3;  
параметры регулируемых напряжений и токов:

питание магнита, В/ $10^{-3}$  А .....0...100/0...100  
поджиг разряда, В/ $10^{-3}$  А.....0...3000/0...10  
вытягивание, В/ $10^{-6}$  А.....0...10000/0...50  
пульсации напряжения, %.....  $\pm <0,4$   
напряжение питания, В/Гц.....220/50.

Элементы управления генераторами высокого напряжения, блоков питания источников ионов, источников питания электромагнитов размещены в стойке управления облучательными установками.

Пучки ионов гелия, водорода (дейтерия) и аргона (криптона) выведены в камеру мишени и совмещены на образце. В камере мишени размещены: мишенный узел, цилиндры Фарадея для измерения токов пучков, диафрагмы, детекторы ядерных излучений, флажок для экранировки детекторов от теплового излучения при облучении мишеней при повышенных температурах или при постимплантационных отжигах. К камере мишени через цельнометаллический вакуумный клапан подсоединена байпасная форлиния, что позволяет вести откачку камеры на форвакуум после напуска атмосферы при смене образцов, не выключая при этом высоковакуумных насосов.

Облучение при повышенной температуре выполняли с помощью устройства косвенного нагрева образцов. Контроль температуры производился хромель-алюмелевой термопарой.

Облучение при  $T_{комн}$  проводили на многопозиционном мишенном узле с магнитным приводом, обеспечивающим прецизионную установку образца под пучок, что особенно важно при анализе облученных образцов ядерно-физическими методами (рис. 4). Подача образцов под пучок осуществляется при повороте жестко соединенного с постоянными магнитами 3 столика 1, который при помощи изолятора 2, являющегося продолжением закрепленной в шарикоподшипниках металлической оси 4, и системы крепления 5 установлен на вакуумной стороне фланца 6 мишенного узла. Со стороны фланца, обращенной в атмосферу, закреплена такая же подвижная система магнитов, жестко соединенная с осью шагового двигателя (ШД) 8 типа МШР. Силовое взаимодействие систем магнитов, расположенных в камере и вне камеры, обеспечивает бесконтактную передачу крутящего момента от шагового двигателя к столику с образцами.

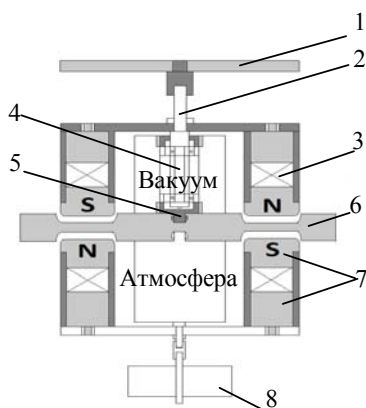


Рис. 4. Схема многопозиционного мишенного узла:

- 1 – поворотный столик; 2 – изолятор;  
 3 – магнит Sm-Co; 4 – металлическая ось;  
 5 – система крепления; 6 – фланец мишенного узла;  
 7 – вставки из армко-железа; 8 – двигатель МШР

Вращение столика на заданный угол обеспечивает специально разработанная система управления работой шагового двигателя. Регистрация угла поворота системы магнитов осуществляется путем последовательной записи в знаковый реверсивный счетчик положительных и отрицательных чисел срабатываний МШР при поворотах в положительном и отрицательном направлениях соответственно. В качестве датчика срабатывания МШР использовали электрический контакт, который замыкается или размыкается при однократном срабатывании ШД и возвращается в исходное состояние после второго срабатывания. Информация с регистратора угла поворота отображается на цифровых индикаторах. Цифровая индикация набора счетчика осуществляется на семисегментных светодиодных индикаторах с помощью дешифраторов.

На рис. 5 показан внешний вид установки для облучения образцов тремя пучками гелия, водорода (дейтерия) и аргона (криптона) одновременно, с последующим измерением профилей распределения имплантированных ионов с помощью ядерно-физических методов.



Рис. 5. Общий вид комплекса из трех ускорителей заряженных частиц

Внедренные на базе измерительного комплекса ЭСУ-2 ядерно-физические методы позволяют

получать пространственно-концентрационные распределения дейтерия с помощью ядерной реакции  $D(^3\text{He},p)^4\text{He}$  и гелия – реакция  $^3\text{He}(D,p)^4\text{He}$ . Результатом протекания вышеуказанных ядерных реакций является рождение двух частиц: протона и  $^4\text{He}$ . В случае регистрации протонов ( $E=13-14$  МэВ) информацию о распределении имплантированной примеси получаем с глубины от поверхности до нескольких микрометров с разрешением  $\sim 3000 \text{ \AA}$ , в случае регистрации  $^4\text{He}$  ( $E=4,5$  МэВ) – глубина анализа составляет  $\sim 5000 \text{ \AA}$  с разрешением  $100...300 \text{ \AA}$ . Чувствительность методики при определении концентрации гелия и водорода составляет около 50 атрп.

В установке облучение образцов и последующие измерения ядерно-физическими и другими методами происходят в одной экспериментальной камере без извлечения образцов на атмосферу, поскольку, как было показано в [5], процессы массопереноса водорода и его изотопов, особенно их выход из образца в вакуум, очень чувствительны к состоянию поверхности, в частности, к наличию окисных пленок.

Представленный комплекс был апробирован при изучении влияния аргона и гелия на поведение водорода, имплантированного в аустенитную нержавеющую сталь.

Для исследования закономерностей захвата и удержания водорода при создании повреждений и внедрении атомов инертного газа образцы стали X18H10T одновременно облучали высокоэнергетическими ионами аргона с энергией 1400 кэВ, ионами гелия с энергией 10 кэВ и ионами дейтерия с энергией 20 кэВ. Все пучки падали на поверхность образца под углом  $\sim 5^\circ$ . На рис. 6 приведены расчетные профили распределения в стали X18H10T гелия, дейтерия и аргона, а также профиль повреждений, создаваемый ионами аргона.

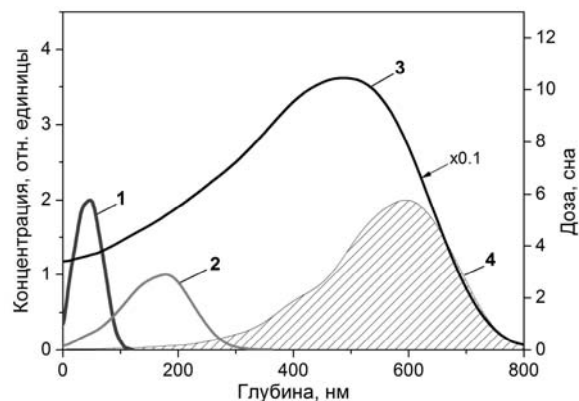


Рис. 6. Расчетные профили распределения ионов гелия, дейтерия и аргона, имплантированных с энергиями 10 (1), 20 (2) и 1400 кэВ (4), соответственно, в сталь X18H10T, а также профиль повреждений (3), создаваемый аргоном

На рис. 7 приведен энергетический спектр и извлеченный из него профиль распределения дейтерия, имплантированного при  $T_{\text{комн}}$  до дозы  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в образец с одновременно внедренными до дозы  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  аргоном и  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  гелием.

На этих же рисунках приведены спектр и профиль дейтерия в образце, отожженном после облучения до температуры 500 К (постимплантационный отжиг). Наблюдается уширение профиля распределения дейтерия по сравнению с расчетом.

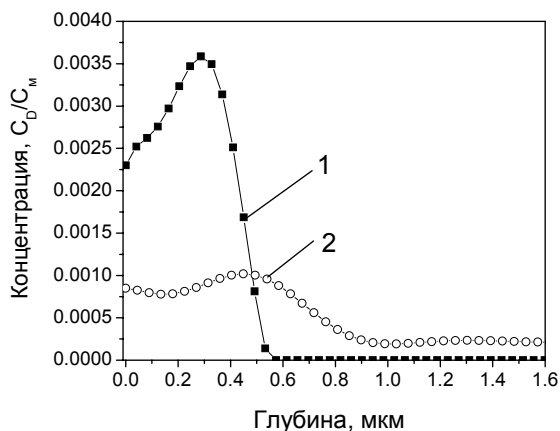


Рис. 7. Профили распределения дейтерия, имплантированного с энергией 20 кэВ до дозы  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в сталь X18H10T при одновременном создании повреждений и внедрении ионов гелия при  $T_{\text{комн}}$  (1) и после отжига при 500 К (2)

Таким образом, комплекс из трех ускорителей заряженных частиц, пучки которых совмещены на мишени, обеспечивает возможность создания повреждений на уровне 1...200 сна и одновременного введения газовых примесей

методом ионной имплантации. Преимуществом данного комплекса является возможность в одной экспериментальной камере без извлечения образцов на атмосферу проводить облучение мишеней, измерение профилей распределения внедренных гелия и водорода (дейтерия) и исследование их эволюции в условиях создания повреждений и отжига.

Работа выполнена при поддержке гранта УНТЦ, проект №3663.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Неклюдов. Проблемы работоспособности материалов основного оборудования АЭС Украины // *Прогрессивные материалы и технологии*. Киев, т. 1, 2003, 422 с.
2. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. *Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов*. К.: «Наукова думка», 2006, 374 с.
3. М.Д. Габович. *Физика и техника плазменных источников ионов*. М.: «Атомиздат», 1972, 304 с.
4. В.И. Котов, В.В. Миллер. *Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий*. М.: «Атомиздат», 1969, 280с.
5. С.А. Карпов, В.В. Ружицкий, Г.Д. Толстолуцкая. Влияние пассивирующей пленки на удержание ионно-имплантированного дейтерия в нержавеющей стали типа 18-8 // *Альтернативная энергетика и экология*. 2007, №6, с.44-49.

Статья поступила в редакцию 27.01.2010 г.

## ПРИСКОРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПОВЕДІНКИ ГЕЛІЮ ТА ВОДНЮ В УМОВАХ ГЕНЕРАЦІЇ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ

Г.Д. Толстолуцька, В.В. Ружицький, І.Є. Копанець, В.М. Воеводин, А.В. Нікітін, С.О. Карпов, А.А. Макієнко, Т.М. Слюсаренко

Подано опис комплексу з трьох прискорювачів заряджених часток, пучки яких суміщені на мішені. Комплекс забезпечує можливість одночасного опромінення матеріалів пучками важких іонів для створення пошкоджень на рівні 1...200 зміщень на атом, а також іонами гелію та водню для дослідження впливу накопичення цих газів на розвиток пошкоджуваності та зміну фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів. Крім опромінення комплекс забезпечує вимірювання ядерно-фізичними методами просторово-концентраційних розподілів введених газових домішок та дослідження їх еволюції в процесі опромінення та відпалу.

## ACCELERATING COMPLEX FOR STUDY OF HELIUM AND HYDROGEN BEHAVIOR IN CONDITIONS OF RADIATION DEFECTS GENERATION

G.D. Tolstolutskaia, V.V. Ruzhytskiy, I.E. Kopanetz, V.N. Voyevodin, A.V. Nikitin, S.A. Karpov, A.A. Makienko, T.M. Slusarenko

Description of the complex of three charged particle accelerators the beams of which are aligned on the target is presented. The complex gives the possibility of simultaneous irradiation of materials by the beams of heavy ions for damage production on the level 1...200 displacements per atom and also by helium and hydrogen ions for investigation of the influence of these gases accumulation on damage development and change of structural materials physical-mechanical properties. Beside the irradiation the complex allows measurement of space-concentration distribution of implanted gaseous impurities and investigation of their evolution under irradiation and annealing by nuclear-physical methods.