# УДК 539.1.08, 538.97-405, 621.384.63



# УСТАНОВКА ДЛЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИОНАМИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ

С.И.Бугаёв, А.А.Дрозденко, М.И.Захарец, И.Г.Игнатьев, В.Б.Москаленко

## Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины,

40000, ул. Петропавловская, 58, Сумы, Украина,

# e-mail: igignatew@gmail.com

## Аннотация

Описана конструкция устройства для непрерывного облучения мишеней пучками ионов.

Рассматривается возможность создания пучка многозарядных ионов Fe в ускорительном масс-спектрометре ИПФ НАН Украины с целью имитационного облучения реакторных материалов и их исследования под действием облучения.

Ключевые слова: пучок ионов, облучение, многозарядный ион, ионы железа, массспектр.

Abstrakt

The design of the tests for simultaneous beam ion irradiations is described.

In the paper, a possibility of multiply charged Fe ions beams formation for imitation irradiation of reactor materials with using the IAP NAS Ukraine accelerator mass spectrometer is considered.

Keywords: ion beam, irradiation, multiply charged ion, iron ions, mass spectrum.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня одной из ключевых проблем разработки новых мощных источников энергии (ядерных реакторов IV поколения и термоядерных реакторов) является создание материалов, способных без потери конструкционных свойств выдерживать высокие потоки ионного и нейтронного излучения. Но в настоящее время отсутствуют экспериментальные реакторы, где можно было бы облучать реакторные материалы высокими дозами.

Выходом из сложившейся ситуации стали имитационные эксперименты – облучение перспективных материалов ионами на ускорителях вместо их облучения нейтронами в реакторах. В настоящее время сформулированы критерии подобия условий облучений в реакторах условиям облучения на ускорителях [1].

Ключевым параметром установок имитационного облучения является скорость набора дозы, или скорость дефектообразования. Этот параметр зависит от пары ион-материал, энергии первичных ионов, температурных условий облучения. Ионы металлов имеют массу в несколько десятков раз больше, чем нейтроны, поэтому при одинаковых энергиях они производят гораздо больше точечных дефектов. Как правило, для создания дефектов в материалах используются имплантеры ионов невысокой энергии.

Одним из возможных вариантов исследования конструкционных материалов ядерных реакторов является проведение имитационных экспериментов на пучках заряженных частиц [1-4]. Как следствие, время набора необходимого количества радиационных изменений в исследуемом образце сокращается с десятков лет до десятков часов. Ионное облучение не вносит в образец наведенную радиацию, что позволяет применять стандартный инструментарий для дальнейшего изучения материала.

Одна из лучших установок для проведения имитационных исследований создана в ННЦ «Харьковский физико-технический институт», которая позволяет достичь рекордной дозы облучения до 500 сна/с.[1]. Недостатком

данной установки является размещение образцов внутри высоковольтного электрода ускорителя, находящегося в баке высокого давления, что существенно усложняет условия эксплуатации.

# Устройство установки для имитационных экспериментов при помощи облучения материалов ядерных реакторов ионами тяжёлых металлов

Для получения пучков многозарядных ионов металлов мэвных энергий в ИПФ НАН Украины существует возможность использования ускорительного масс-спектрометра с максимальным напряжением на кондукторе 1 MB.

Институтом прикладной физики НАН Украины проведены подготовительные работы и запущен в эксплуатацию ускорительный массспектрометр Tandetron 1.0 MV модель 4110Bo-AMSHVEEB.V. (Рисунки 1,2).

Так как ускоритель данного масс-спектрометра тандемного типа, то технология исследования материалов упрощаются: источник ионов и мишень (универсальная камера) находятся за пределами ускорителя, в атмосфере, вне действия сильных электрических полей.



Рисунок 1. Общий вид ускоряющего масс-спектрометраTandetron 1.0 MV модель 4110Bo-AMS HVEE B.V.



Рисунок 2.Размещение элементов ускоряющего масс-спектрометраTandetron 1.0 МV модель 4110Bo-AMS HVEE B.V.[2-8].

Ускоряющиймасс-спектрометр детально описан в работах [2-8].

К приоритетным направлениям научных исследований с помощью Tandetron 1.0 MV Model 4110Bo-AMS относятся следующие:

 материаловедение (конструкционные материалы для ядерной энергетики и радиационных технологий, полупроводниковые и сверхчистые материалы, биомедицинские материалы);

- геофизические, биофизические и медико-биологические исследования;

- археология (датировка объектов);

- радиационные исследования (природные и техногенные образцы из чернобыльской зоны и объекты модельных экспериментов).



Рисунок З.Универсальная камера в составе ускорительного масс-спектрометра Tandetron 1.0 MV:(1) - цезиевый источник отрицательных ионов на 50 проб; (2) - распределительный магнит с электростатическим переключением пучка; (3) - ускоритель; (4) -диспергирующий магнит; (4.1) - универсальная камера, с оборудованием для проведения имитационных исследований; (5) - блок коллекторов; (6) - электростатический энергоанализатор; (7) - детектор ионов; (8) - система вытяжки едких газов; (9) - система вытяжной вентиляции; (10) - система замкнутого водяного охлаждения; (11) - система осушки и регенерации SF <sub>6</sub>; (12) - система приточной вентиляции; (13) - щит электропитания; (14) - пульт управления; (15) - стол оператора.

## Оценка скорости создания дефектов

По параметрам пучков ионов была рассчитана скорость образования дефектов под действием ионизирующего излучения. Для этого мы воспользовались формулой приведенной в [10]:

$$K_0 = \frac{\Phi \cdot \gamma}{N},$$

где Ф – плотность потока ионов, ү – число дефектов, который создаёт ион на единицу пробега, *N* – атомная плотность материала мишени. Величина Ф

зависит от зарядового числа ионов (*qe*), ионного тока на мишени *I* и площади облучения *S*.

Для примера рассмотрим ионный ток (<sup>56</sup>Fe<sup>2+</sup>) *I*=85,64 нА и воспользуемся програмним пакетом SRIM [12] для определения величини  $\gamma$ . Для энергии ионов железа <sup>56</sup>Fe<sup>2+</sup> (2,52 МэВ), которые облучают образец,  $\gamma = 2,1 \times 10^4$  дефектов/(ион×мкм). Тогда, для площади *S*= 25 мм<sup>2</sup>, *K*<sub>0</sub> составит 2,7× 10<sup>-3</sup> сна/сек.

Для других многозарядных ионов были рассчитаны скорости образования дефектов, представленные в Таблице.

Тип иона	Енергия ионов (МэВ)	Токпучка (нА)	Пробег ионов, мкм	<b>ү,</b> дефектов /(ион∙мкм)	<sup>К</sup> 0, сна/сек
<sup>56</sup> Fe <sup>2+</sup>	2,52	85,64	1	$2,1.10^4$	2,70·10 <sup>-3</sup>
<sup>56</sup> Fe <sup>3+</sup>	3,42	22,32	1,5	1,6·10 <sup>4</sup>	3,54·10 <sup>-4</sup>
<sup>56</sup> Fe <sup>1+</sup>	0,64	15.92	0,525	2,0·10 <sup>4</sup>	9,34·10 <sup>-4</sup>
<sup>56</sup> Fe <sup>2+</sup>	0,99	3,39	0,721	$1,9.10^{4}$	9,45·10 <sup>-5</sup>

Таблица. Скорости создание дефектов для разных типов ионов.

Рассчитанные значения скорости выработки дефектов в дальнейшем могут использоваться при моделировании концентрационных профилей элементов в многокомпонентных сплавах [11].

Параметры многозарядных ионных пучков, созданных на ускорительном масс-спектрометре позволяют обеспечить необходимую для проведения имитационных экспериментов скорость дефектообразования в диапазоне10<sup>-4</sup> - 10<sup>-2</sup> сна / сек., что подтверждает возможность применения ускорительного масс-

#### выводы

Разработанная и созданная В ИПФ НАН Украины установка ДЛЯ имитационных экспериментов облучения материалов ионами тяжёлых дальнейшем будет металлов В использована для исследования материалов конструкционных ядерних (в перспективе, термоядерних) реакторов на пучках заряженных частиц и является важным диагностическим инструментом в совершенствовании технологий и безопасности на объектах атомной энергетики, продления срока эксплуатации существующих реакторов.

В настоящее время разработана, изготовлена и установлена на ТАНДЕТРОНЕ 1. универсальная камера, произведён монтаж механических и вакуумных узлов установки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Устройство для моделирования эффектов взаимодействия нейтронних потоков с матеріалами ядерных реакторов / А.В. Пермяков, В.В. Мельниченко, В.В. Брык, В.Н. Воеводин, Ю.Э. Куприянова // Вопросы атомной науки и техники. - 2014. - № 2. - с. 180-186. - Библиогр.: 21 назв.
- 2. D.E. Nelson, R.G. Korteling, W.R. Stott. Carbon-14: Direct Detectionat Natural Concentrations. Science 198(4316), (1977), p. 508.
- 3. J. Chen, Z. Guo, K. Liu, Rev. Accel. Sci. Technol. 4 (2011), p. 117-145.
- M. Suter, St. Jacob, H.-A. Synal, Nucl. Instr. Meth. B 123 (1-4) (1997), p. 148-152.
- 5. H.A. Synal, S. Jacob, M. Suter, Nucl. Instr. Meth. B 172 (1-4) (2000) 1-7.
- A.M. Muller, M. Christl, M. Dobeli, P.W. Kubik, M. Suter, H.-A. Synal, Nucl. Instr. Meth. B 266 (10) (2008) p. 2207-2212.
- 7. B.J. Hughey, P.L. Skipper, R.E. Klinkowstein, R.E. Shefer, J.S. Wishnok,

S.R.Tannenbaum, Nucl. Instr. Meth. B 172 (1-4) (2000) p. 40-46.

- В.Б. Москаленко, С.Н. Данильченко, А.А. Дрозденко, В.Е. Сторижко,
  В.Д. Чиванов, И.Г. Чижов. Состояние и перспективы развития центра ускорительной масс-спектрометрии Института прикладной физики НАН Украины. Наука и инновации, 2014, т.10, №2. с. 8-18.
- ПатентUA №106430,И.Г. Чижов и др. Способ технического обслуживания високовольтних устройств с элегазовой (SF<sub>6</sub>)изоляцией. Опубликовано 26.08.2014, бюл. № 16/2014, (на укр. яз.).
- G.S.Was. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metalsand Alloys. Berlin, Heidelberd: Springer-Verlag, 2007, p. 827.
- 11. В.Б. Москаленко, О.М. Бугай, В.Л. Денисенко. Получение многозарядных ионов железа <sup>56</sup>Fe с энергией 0,6-7,92 МэВ для облучения конструкционних материалов // Ядерна фізика та енергетика, 21(2020) с. 147 - 151, (на укр. яз.).
- 12. J.F. Ziegler. The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM).