

## УСКОРИТЕЛЬ СОВМЕЩЕННЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ И ЛЕГКИХ ИОНОВ

*Б.П. Ильенко, И.Н. Онищенко, В.Л. Першин*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: onish@kipt.kharkov.ua*

Представлены исследования по получению совмещенных пучков тяжелых ионов  $Fe^{5+}$  и легких ионов  $He^+$  и  $H^+$  на одном ускорителе, работающем в непрерывном режиме. По сравнению с одинарными и двойными ионными пучками тройное ионное облучение мишеней позволяет более адекватно промоделировать процессы радиационных повреждений в твердых телах (радиационное охрупчивание, распухание материалов и т.п.), имеющие место в термоядерных установках и атомных реакторах.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование ускорителей ионов в физике твердого тела для исследований радиационных повреждений продолжает оставаться актуальным. Имитацией, максимально приближенной к реальным процессам радиационных повреждений в ядерных реакторах и к проблеме первой стенки термоядерного реактора, является облучение образца одновременно несколькими пучками различных ионов. Известно, к примеру, что ферритные стали являются одними из кандидатов в материалы для первой стенки термоядерного реактора, благодаря своей отличной стойкости к радиационным повреждениям. Одной из критических проблем здесь является радиационное охрупчивание. В [1] исследовалось комбинированное действие пучков гелия и водорода на ферритные сплавы Fe-Cr с тем, чтобы получить принципиальное понимание эволюции компонентов термоядерного реактора. Показано, что синергетическое действие облучения пучками ионов  $He^+$  и  $H^+$  на эти сплавы приводит к образованию большего количества пор и большему распуханию (около 4%).

Традиционно для получения трех пучков используют три отдельных ускорителя [1-2]. В предложенном и разработанном в ННЦ ХФТИ ускорителе тяжелых ионов УТИ-3 три пучка ионов ускоряются одновременно в одном ускорителе.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ СОВМЕЩЕННЫХ ПУЧКОВ

На Рис.1 приведена схема ускорителя трех совмещенных пучков УТИ-3. Ионные источники установлены в вакуумной камере масс-сепаратора (см. Рис.1, поз. 1-3), помещенной в поперечное магнитное поле. Вакуумный объем откачивается двумя турбомолекулярными насосами типа ТМН-1000 (поз.5) и во время работы ионных источников вакуум в камере масс-сепаратора и в ускорительной трубке был  $10^{-5}$  Торр. На ускорителе УТИ-3 использовались дуговые ионные источники с подогревным катодом и осцилляцией электронов [3-4], обеспечивающих одновременную инъекцию в ускорительную трубку ионов различных металлов и

газов. Напряжения на источниках ионов  $Fe^{5+}$ ,  $He^+$  и  $H^+$  были равны 22, 25 и 25 кВ, соответственно. Максимальная напряженность магнитного поля в середине зазора величиной 220 мм равна 4,5 кЭ. В этом магнитном поле осуществляется разделение ионов по величине  $A/Z$  ( $A$  – атомный вес,  $Z$  – заряд ионов) с фокусировкой пучка при повороте на  $180^\circ$ . Источник ионов металла был установлен на радиусе  $R=44$  см (поз.1), равном ларморовскому радиусу ионов  $Fe^{5+}$  заданной энергии и в заданном магнитном поле. Соответственно, ионный источник гелия был установлен на радиусе  $R = 22$  см (поз.2), водородный ионный источник расположен на выходе масс-сепаратора (поз.3). На водородном ионном источнике эмиссионная щель смещена относительно оси ионного источника на  $90^\circ$ . На водородном ионном источнике установлен дополнительно корректор, позволяющий отклонять водородный ионный пучок в направлении фокуса ионных пучков  $Fe^{5+}$  и  $He^+$ . На выходе ионных пучков из масс-сепаратора расположен плоский конденсатор, позволяющий перемещать ионные пучки металла, гелия и водорода на геометрическую ось ускорительной трубки (поз.4). Инжектированные из масс-сепаратора ионы ускоряются в ускорительной трубке, к которой приложено постоянное напряжение 200 кВ. Ускоряющее напряжение на ускорительной трубке (поз.10) подается от каскадного генератора КГ(200) [5].

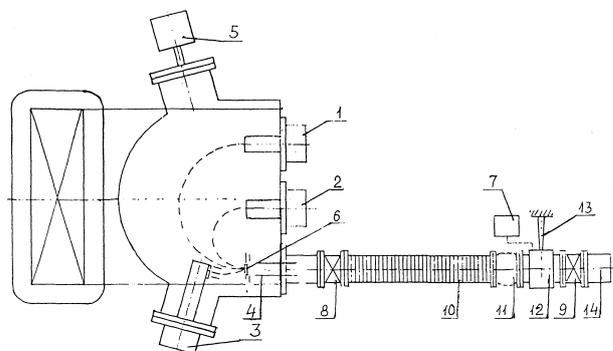


Рис.1. Схема ускорителя совмещенных пучков:  
1 – источник ионов металла; 2,3 – источники ионов газов ( $He^+$  и  $H^+$ ); 4 – корректор; 5 – вакуумный насос; 6 – цилиндр Фарадея; 7 – каскадный

генератор; 8,9 – клапаны; 10 – ускорительная трубка,  
11 – сиффон; 12 – азотная ловушка; 13 – изолятор;  
14 – камера мишеней

Энергия ускоренных ионов  $Fe^{5+}$ , приобретаемая в ускорительной трубке, равна 1.0 МэВ, а ионов  $He^+$  и  $H^+$  – 200 кэВ. Мишенный комплекс УТИ-3 находится на конце ускорительной трубки под напряжением 200 кВ.

Измерение тока ионных пучков проводилось на выходе масс-сепаратора цилиндром Фарадея (поз.6). Цилиндр Фарадея после измерения тока пучка в процессе работы ускорителя с помощью сиффонного механизма может перемещаться относительно оси движения пучка.

### 3. КОНФИГУРАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ $Fe^{5+}$ , $He^+$ , $H^+$ И УСКОРИТЕЛЯ

Расположение источников в камере масс-анализатора определяется траекторией ионов в заданном магнитном поле. На Рис.2 приведена спектрограмма ионов, попадающих в ускоряющую трубку, в зависимости от величины магнитного поля масс-сепаратора. Как видно из Рис.2, ускоренные ионы  $Fe^{5+}$  на спектрограмме появляются при величине магнитного поля  $H=1,5$  кЭ.

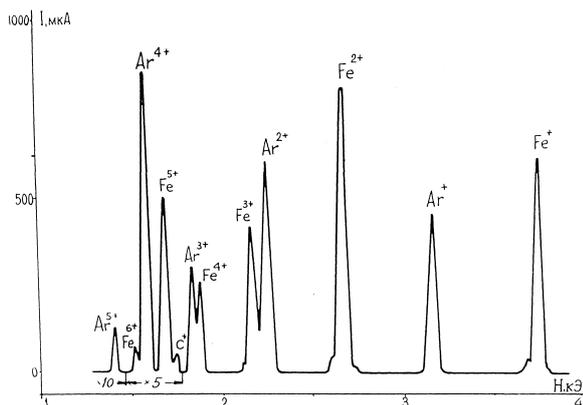


Рис.2. Спектрограмма ускоренных ионов Fe и Ar

В дальнейшем ускорение всех трех пучков ( $Fe^{5+}$ ,  $He^+$  и  $H^+$ ) проводилось при этом значении

магнитного поля,  $H=1,5$  кЭ. Ларморовский радиус (радиус дуги поворота) ионов определяется величинами магнитного поля и энергии ионов, согласно формуле

$$R = \frac{1.4 \cdot 10^2}{H(\text{э})} \sqrt{\frac{A}{Z}} U(\text{э}),$$

где  $U$  – ускоряющее напряжение,  $H$  – магнитное поле. Отсюда радиусы траектории поворота ионов  $Fe^{5+}$  и  $He^+$  при  $H=1.5$  кЭ равны  $R_1=44$  см и  $R_2=22$  см, соответственно. Этим определяется место расположения источников ионов  $Fe^{5+}$  и  $He^+$  в камере масс-сепаратора. Из-за малости радиуса траектории ионов водорода в таком магнитном поле источник ионов  $H^+$  размещался на противоположной стороне камеры масс-сепаратора. В нем предусмотрена коррекция траектории ионов  $H^+$  с помощью электрического поля плоского конденсатора.

Аналогичные расчеты геометрии расположения источников ионов  $H^+$  и  $He^+$  могут быть произведены для пучков тяжелых ионов других металлов, полученных дугowymi ионными источниками с осцилляцией электронов, разработанными в ННЦ ХФТИ и приведенными в [6].

### ЛИТЕРАТУРА

1. T. Tanaka, K. Oka, S. Ohnuki, et al. // *Journal of Nuclear Materials*. 2004, v.329-333, p.294-298.
2. H. Tanigawa, M. Ando // *Journal of Nuclear Materials*. 2001, v.297, p.279.
3. М.Ю. Бредихин, В.Ф. Зеленский, Б.П. Ильенко, В.К. Хоренко // *ПТЭ*. 1981, № 6, с.147-149.
4. М.Ю. Бредихин, Б.П. Ильенко, В.К. Хоренко // *ПТЭ*. 1983, № 4, с.39-41.
5. И.Т. Веневцев, Г.М. Скоромный, Е.И. Ревуцкий: Препринт ХФТИ, 1979.
6. В.Р. П'енко, I.N. Onishchenko, I.M. Nekludov // *Review of Sci. Instr.* 1998, v.69, p.849-851.

Статья поступила в редакцию 07.12.2007 г.

## ACCELERATOR OF COMBINED HEAVY AND LIGHT ION BEAMS

*V.P. P'enko, I.N. Onishchenko, V.L. Pershin*

The investigations on producing combined beams of heavy ions  $Fe^{5+}$  and light ions  $He^+$  and  $H^+$  by means of a single accelerator operating in the continuous mode have been presented. In comparison with single- and dual-ion beams, the triple-ion beam irradiation offers to simulate more adequately the processes of radiation damage in solid materials (irradiation embrittlement, swelling of material and so on), which take place in thermonuclear devices and atomic reactors.

## ПРИСКОРЮВАЧ СПОЛУЧЕНИХ ПУЧКІВ ВАЖКИХ ТА ЛЕГКИХ ІОНІВ

*Б.П. Ільєнко, І.М. Оніщенко, В.Л. Першин*

Представлені дослідження по отриманню сполучених пучків важких іонів  $Fe^{5+}$  і легких іонів  $He^+$  та  $H^+$  на одному прискорювачі, що працює в неперервному режимі. Порівняно з одинарними і подвійними іонними пучками потрійне іонне опромінювання мішеней дозволяє більш адекватно промоделювати процеси радіаційних пошкоджень в твердих тілах (радіаційне охрупчування, розпухання матеріалів і т.п.), що мають місце в термоядерних установках і атомних реакторах.