

04;12  
©1995

## О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СМЕЩЕНИЯ $B_4C$ -ЛИМИТЕРА НА ПОСТУПЛЕНИЕ БОРА В ПЛАЗМУ ТОРСАТРОНА "УРАГАН-3М"

*Г.П.Глазунов, Ю.В.Гутарев, В.Г.Котенко,  
Н.П.Пономаренко, О.С.Павличенко, Е.Д.Волков,  
Н.И.Назаров, Ю.К.Миронов, В.Г.Коновалов,  
Д.И.Барон, В.А.Шевляков*

В торсатроне "Ураган-2М" (У-2М) [1], ввод в действие которого завершается в Институте физики плазмы ННЦ ХФТИ, магнитная сепаратриса в некоторых режимах может пересекать стенку вакуумной камеры, выполненную из нержавеющей стали, что вызовет увеличение потока тяжелых примесей в плазму и ухудшит ее параметры. Поэтому области предполагаемого взаимодействия стенки с плазмой защищены специальными пластинами из нержавеющей стали с покрытием из нитрида титана. Использование такого покрытия на ВЧ-антеннах торсатрона "Ураган-3М" дало положительный эффект [2]. Однако более перспективным в этом плане материалом является карбид бора со стехиометрией, близкой к  $B_4C$ , покрытия из которого с успехом применяются в ряде плазменных установок [3]. В работах [4,5] для защиты стенок вакуумной камеры У-2М предложено использовать горячепрессованный в вакууме карбид бора, технология изготовления которого разработана в ННЦ ХФТИ. Исследование скорости удельного газовыделения этого материала в вакууме, низкие значения эрозии при облучении быстрыми ионами изотопов водорода подтверждают (см. таблицу) возможность применения горячепрессованного  $B_4C$  для защиты первой стенки и изготовления неподвижных и подвижных лимитеров в У-2М.

В настоящее время изучению влияния электрических смещений различной полярности на лимитерах на плазменные характеристики посвящено много работ в связи с поиском режимов с улучшенным удержанием (так называемые L-N переходы) [6,7]. Однако вопрос возможного изменения распыления и переноса материала лимитера в условиях подачи на него электрических смещений практически не изучен. Поэтому перед размещением  $B_4C$ -лимитеров в торсатроне У-2М представлялось целесообразным исследовать процесс выхода бора при воздействии рабочих плазменных импульсов на головную часть  $B_4C$ -лимитера с наложен-

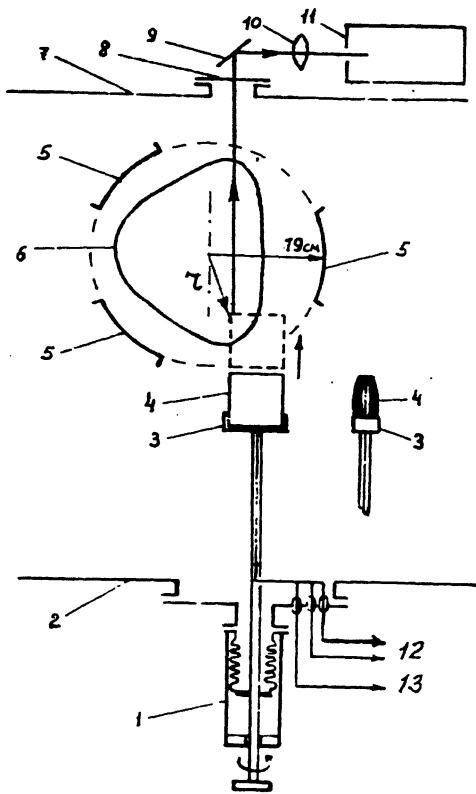


Рис. 1. Схема эксперимента с подвижным лимитером на торсатроне "Ураган-3М": 1 — сильфонный ввод; 2 — днище вакуумной камеры У-3М; 3 — держатель из нержавеющей стали; 4 — пластины из карбида бора; 5 — полюса винтовой обмотки; 6 — крайняя замкнутая магнитная поверхность; 7 — верхняя крышка вакуумной камеры; 8 — кварцевое окно; 9 — зеркало; 10 — линза; 11 — прибор МДР-6; 12 — к термопаре; 13 — к источнику импульсов электрического смещения.

ным потенциалом и без такового в действующем торсатроне "Ураган-3М".

Для проведения экспериментов на торсатроне "Ураган-3М" [8] установлен подвижный лимитер, схематически показанный на рис. 1. Головная часть лимитера, непосредственно контактирующая с плазмой, выполнена в виде двух выпуклых пластин размером  $90 \times 90 \times 8$  мм, изготовленных методом горячего прессования в вакууме порошка карбида бора, скрепленных между собой держателем из нержавеющей стали. Некоторые свойства материала пластин приведены в таблице.

Плотность изделий, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент эрозии, ат/ион	Скорость уд. газовыделения, тор. л/с · см <sup>2</sup>	Удельное сопротивление, Ом · м	Теплопроводность, Вт/м · К
2.42	$2 \cdot 10^{-2}$ [9]	$< 10^{-1}$ [5]	90 [10]	120 [10]
2.45	$2 \cdot 10^{-2}$ [9]	$< 10^{-10}$ [5]		

Между В<sub>4</sub>С пластинами в верхней части лимитера расположена медьконстантановая термопара, по данным которой проводилась оценка рабочей температуры пластин. Подача на лимитер импульсов электрического смещения с амплитудой до  $\pm 300$  В относительно корпуса винтовой обмотки и длительностью 1–50 мс осуществлялась от специального блока питания с максимальным током 40 А. Через сильфонный ввод лимитер закреплен на днище вакуумной камеры У-3М так, что верхняя кромка пластин может быть установлена на расстоянии 20–12 см от тороидальной оси винтовой обмотки.

Измерения проводились при следующих параметрах плазмы вблизи лимитера: магнитное поле — 0.46 Т, концентрация электронов —  $1.8 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, температура электронов — 50 эВ [11]. Создание и нагрев плазмы осуществлялись при помощи двух ВЧ-антенн, включаемых последовательно через 5 мс [12]. Импульсы электрического смещения положительной и отрицательной полярности длительностью 5 мс подавали на лимитер примерно посередине ВЧ-импульса первой антенны, длительность которого была 15 мс.

В процессе эксперимента проводились измерения вольт-амперных характеристик, температуры пластин, спектроскопия и масс-спектрометрия бора при различных положениях лимитера с электрическим смещением на нем и без такового. Измерения интенсивности линии бора VI проводились прибором МДР-6 в ультрафиолетовой области спектра, принимающим сигнал излучения бора из района взаимодействия плазмы с пластинами лимитера через кварцевое окно в верхней крышке вакуумной камеры У-3М.

На рис. 2, а, б показаны вольт-амперная характеристика В<sub>4</sub>С-лимитера, расположенного на расстоянии 16 см от центра плазмы (граница зоны удержания) и данные по спектроскопии нейтрального бора в периферийной области плазмы. Видно, что распыление пластин (интенсивность линии бора) растет с увеличением ионного тока на лимитер и при его насыщении не меняется при росте потенциала от 120 до 160 В. Заметим, что выдвигание лимитера на расстоянии

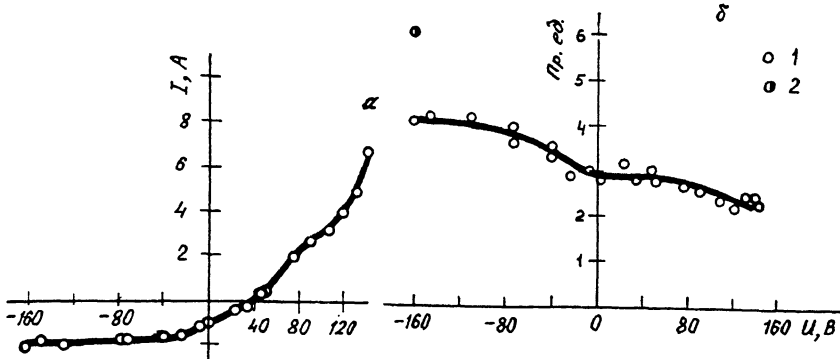


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика  $V_4C$ -лимитера (а). Зависимость интенсивности линии бора VI от потенциала на лимитере: 1 —  $r = 16$  см, плотность электронов  $1.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , ионный ток 2 А; 2 —  $r = 14.5$  см, плотность электронов  $6.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , ионный ток 7 А (б).

ближе 16 см от тороидальной оси при концентрации электронов  $1.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  оказывается невозможным из-за срыва разрядов. По-видимому, это связано с тем, что при такой концентрации электронов резонансная для ВЧ-создания плазмы зона расположена на периферии [12]. Наличие в этой зоне лимитера препятствует созданию плазмы. Увеличение концентрации электронов до  $6.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  позволило передвинуть резонансную зону внутрь объема удержания, что, в свою очередь, дало возможность приблизить лимитер на расстояние 14.5 см от тороидальной оси. При этом ионный ток насыщения увеличился до 7 А, а интенсивность линии VI выросла в несколько раз (точка с координатами — 160, 6 ед. на рис. 2, б). Отметим также наблюдавшийся эффект подавления омического разряда, возникающего в камере У-3М на фазах нарастания и спада величины винтового магнитного поля, при помощи небольшого ( $\geq 40$  В) отрицательного смещения на подвижном лимитере, находящемся на расстояниях 15–19 см, т. е. даже вне последней замкнутой магнитной поверхности. При напряжениях положительной полярности амплитудой до 300 В такого эффекта не наблюдалось.

При подаче положительного смещения на лимитер интенсивность спектральной линии бора VI несколько снижается, что обусловлено, по-видимому, запиранием ионного потока. Данный режим можно использовать для защиты головной части лимитеров от эрозии и снижения поступления примесей при проведении плазменных экспериментов. Напротив, режим с подачей отрицательного смещения при больших ионных токах, по-видимому, можно использовать

для проведения процесса боронизации. Действительно, положив коэффициент эрозии  $V_4C$  на уровне  $5 \cdot 10^{-2}$  ат/ион и длительность импульса 50 мс, получим количество распыленных за импульс частиц материала  $n \cong 10^{18}$  частиц/имп. Для создания покрытия в один монослой, например на поверхности вакуумной камеры торсатрона У-2М, обращенной к плазме, необходимо  $\approx 2.5 \cdot 10^{20}$  частиц  $V_4C$ . Следовательно, около 1000 импульсов достаточно для нанесения нескольких монослоев  $V_4C$  на расположенные вблизи плазмы поверхности из нержавеющей стали. Количество импульсов, необходимых для боронизации, можно существенно снизить специальным подбором параметров плазмы и положения лимитера, повысив ионный ток, вытягиваемый на пластину. Оценки показывают, что реально существует возможность повышения скорости боронизации ионным распылением лимитера в 10–100 раз. Процедуру боронизации желательно проводить не во время экспериментальных рабочих импульсов, а в период подготовки установки к экспериментам. В нашем случае это чистка камеры высокочастотными разрядами, которая длится обычно несколько недель. Неясным, однако, остается вопрос переноса и осаждения распыленного материала лимитера, поскольку в стеллараторе он может происходить в основном вдоль магнитной сепаратрисы. Изучение этой проблемы путем измерения скорости осаждения и характеристик пленок  $V_4C$  является одной из задач дальнейших исследований на торсатроне У-3М.

### Список литературы

- [1] *Bykov V.E., Georgievsky A.V., Demchenko V.V. et al. // Fus. Technology. 1990. V. 17. P. 140–147.*
- [2] *Vasil'ev V.V., Vojtsenya V.S., Volkov E.D. et al. // J. Nucl. Mat. 1989. V. 162–164. P. 787–790.*
- [3] *Langley R.A. // Review of wall conditioning and wall materials for fusion devices. ORNL, Tennessee, 1989. P. 1–20.*
- [4] *Глазунов Г.П., Волков Е.Д., Дикий А.Г., Конотон П.И., Барон Д.И. // Тезисы докл, науч. конференции "Состояние и перспективы развития вакуумной техники". Казань, 1991. Ч. 2. С. 94.*
- [5] *Глазунов Г.П., Волков Е.Д., Войцены В.С., Барон Д.И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1993. В. 1/60. С. 97–100.*
- [6] *Аскинази Л.Г., Голант В.Е., Итс Е.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 54. С. 315–318.*
- [7] *Uckan T., Aceto S.C., Baylor L.R. et al. // J. Nucl. Mat. 1991. V. 196–198. С. 308–311.*
- [8] *Volkov E.D. Overview of Uragan-3M experiment. IX Stellarator workshop. IAEA, Vienna, Austria. 1992. P. 1–5.*
- [9] *Garsia-Rosales C., Gauthier E., Roth J. et al. // J. Nucl. Mat. 1991. V. 189. P. 1–8.*

- [10] Неметаллические тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1985. 224 с.
- [11] *Bykov V.Ye., Chechkin V.V., Fomin I.P. et al.* // Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on Stellarator and Other Helical Confinement Systems. Garching, Germany. IAEA, Vienna. 1993. P. 245.
- [12] *Kasilov S.V., Lysovan A.I., Moiseenko V. et al.* // Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on Stellarator and Other Helical Confinement Systems. Garching, Germany. IAEA, Vienna. 1993. P. 447.

Харьковский  
физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
6 мая 1994 г.  
В окончательной редакции  
24 февраля 1995 г.