



$Ve \leftrightarrow W+V$: Взаимодействие плазмы с поверхностью и боронизация

Гаспарян Ю.М.
НИАУ МИФИ

13.09.2022



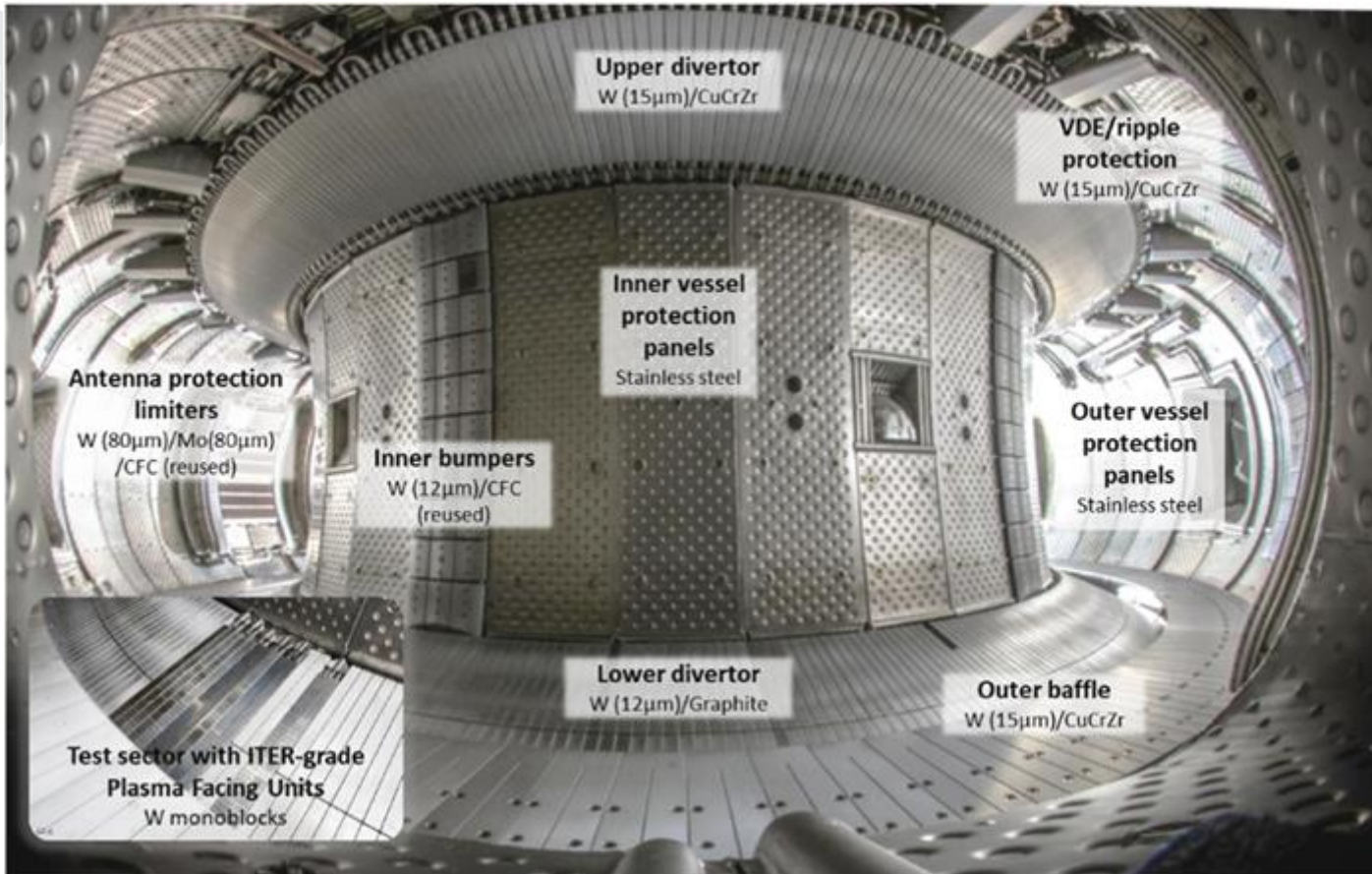
Основные вопросы

1. Вызвана ли замена бериллия на вольфрам преимущественно соображениями инженерно-технологического удобства и безопасности обращения?
2. Все ли необходимые функции первой стенки сохраняются при замене бериллия на вольфрам без дополнительного покрытия?
3. Есть ли физические причины, требующие замены бериллия?
4. Избавляет ли полностью замена бериллия на вольфрам от рисков разрушения (плавления, короткого замыкания) элементов облицовки при срывах, ELMs, VDE, от накопления изотопов водорода (в первую очередь, трития)?
5. Достаточно ли имеющихся сегодня экспериментальных данных для суждения о не накоплении в центральной плазме количества вольфрама, препятствующего достижению термоядерной температуры при имеющихся мощностях нагрева?
6. Достаточно ли имеющихся сегодня экспериментальных данных для суждения о приемлемости скорости эрозии, трещинообразования, раскалывания и оплавления вольфрама для работы ИТЭРа при запланированных параметрах плазмы?
7. Возможны ли достижение плановых параметров плазмы и реализация миссии ИТЭРа при использовании вольфрама без покрытия?
8. Потребуется ли при нанесении покрытия апробированными технологиями и работе ИТЭРа на базовых режимах частое (после нескольких разрядов) обновление покрытия?
9. Сохраняются ли в случае применения бора или его соединений в качестве покрытия все «плюсы» перехода на вольфрам?
10. Можно ли на основе имеющихся экспериментальных данных сделать вывод о достаточности предлагаемых изменений в способах донагрева для достижения обеих целей ITER: $Q \geq 10$ индуктивных режимов и $Q \geq 5$ стационарных режимов?
11. Следует ли ожидать в результате замены бериллия на вольфрам дополнительных осложнений, связанных с убегающими электронами?



- ❖ **The main impact of Be** on assembly operations is related to the **substantial additional complexity to the assembly activities**. The tasks are manageable. However, such complexity leads to **additional risks** and to an additional **cost** associated with Be-related operations
- ❖ Mo has been used as FW material in **EAST and Alcator C-Mod** and W in **ASDEX-Upgrade and WEST** thus providing reasonable operational experience in medium-sized tokamaks.
- ❖ With the exception of WEST, the devices mentioned above have demonstrated **routine high confinement H-mode operation with a Mo or W first wall** (WEST has demonstrated H-mode access albeit with a low level of confinement improvement). **All of them use wall conditioning techniques based on low Z materials (lithium (Li) or boron (B)) which are deposited on the FW by glow discharge (B), evaporation (Li) or by powder injection during plasma discharges (B and Li).**
- ❖ ASDEX Upgrade: “boronization” provides reduction of oxygen for approximately 100 plasma discharges and for protection of the FW - about 10 discharges (flat-top duration: 5-10 sec)

Пример – опыт токамака WEST



Usual wall conditioning techniques (150 °C–200 °C baking sequences and deuterium glow discharge cleaning) as well as plasma operations were found to **be inefficient** to get satisfactory tungsten wall conditions. **The solution was to use boronization** during the second plasma campaign (He-15% B₂H₆ mixture used). The first boronization of the vessel walls considerably improved breakdown conditions by almost completely suppressing RE beam formation and extending prefill ranges up to ~20 mPa. In addition, it opened the operational domain to densities well above the $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ limit encountered before the first boronization.

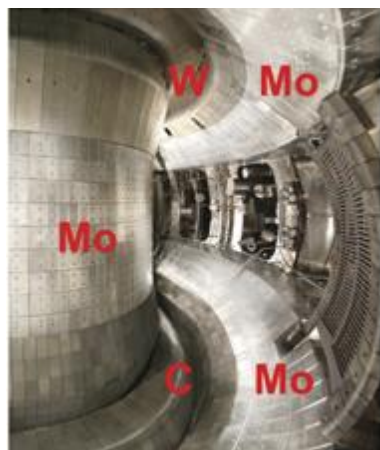
Покрyтия для кондиционирования (подавления O,C)

При кондиционировании покрывается «тневая» часть стенки, что позволяет снизить:

- Поток O/C примесей (кислород, углерод) и, как следствие поток тяжелых примесей, распыляемых O/C.
- Распыление тяжелых элементов из «тени» нейтралами перезарядки
- Поток изотопов водорода со стенки на начальной стадии разряда



T-11M



EAST

Table 1. Free energy of formation ΔG and free energy of formation per oxygen atom $\Delta G/O$ for various oxides (at 0°C) (ΔG data from *Tables of Physical and Chemical Constants* by G W C Kaye and T H Laby (New York: Longman, 1973).

Z	Atom	Oxide	$-\Delta G$ (kJ mol ⁻¹)	$-\Delta G/O$ (kJ mol ⁻¹)
<i>Low-Z getters</i>				
4	Be	BeO	581	581
5	B	B ₂ O ₃	1194	397
<i>Medium-Z getters</i>				
12	Mg	MgO	569	569
13	Al	Al ₂ O ₃	1582	527
14	Si	SiO ₂	857	428
<i>High-Z getters</i>				
22	Ti	TiO ₂	889	444
73	Ta	Ta ₂ O ₅	1911	352
<i>Bad getters</i>				
74	W	WO ₃	764	254
26	Fe	Fe ₂ O ₃	742	247
28	Ni	NiO	212	212
<i>Reference molecules</i>				
1	H	H ₂ O	228	228
6	C	CO ₂	394	197
		CO	137	137
3	Li	Li ₂ O	134	134

Согласно таблице:

- Be, B, Si хорошие low-Z геттеры.
- Ti, Cr хорошие medium- Z геттеры.
- Li, согласно таблице, имеет низкую энергию связи кислорода. Хотя успешно применяется для снижения примесей.

J. Winter. Plasma Phys. Control. Fusion 38 (1996) 1503

Вольфрам без «защитных» покрытий

В областях максимальных потоков ионов на стенку покрытия будут быстро распыляться. Однако, можно ожидать большое покрытие на протяжении длительного времени (по оценкам, более двух рабочих недель).

Вопрос: Требуется ли защита всей стенки? Или достаточно сохранять нужную поверхность («геттер») в «теневых» областях (большая площадь)?

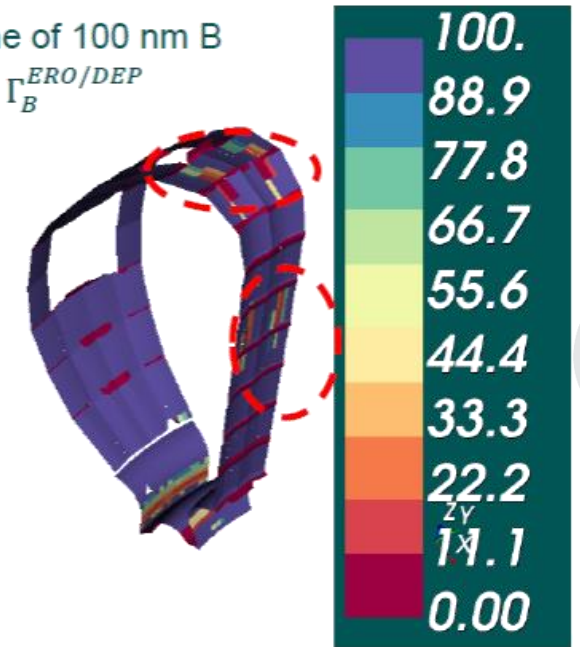
Согласно оценкам ИТЭР, можно сохранить приемлемую концентрацию вольфрама в центре шнура даже в предельных режимах.

Однако, отмечается что расчеты требуют уточнения и верификации на экспериментах с вольфрамовой стенкой.

Во многих расчетах используются исходные данные, полученные для старой конфигурации.

[K. Schmid, WalldYN3D]

➤ Lifetime of 100 nm B
due to $\Gamma_B^{ERO/DEP}$

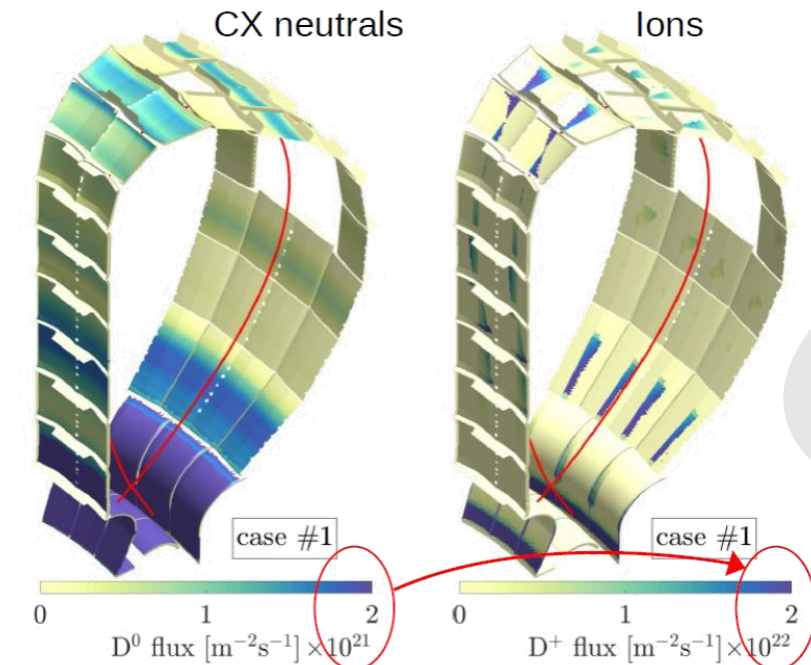


Вольфрам без «защитных» покрытий

ЭЛМы в расчет не берутся, предполагая что они не допустимы для сохранности дивертора. В текущих экспериментах они вносят существенный вклад в распыление, т.к. на стенку приходят частицы с большей энергией.

Оценки с помощью кода ERO2.0 показывают, что распыление ионами (с учетом ~1% Ne) будет доминировать, но масштаб источника $W < 3 \times 10^{21} \text{ W atom/s}$ [Schmid 2023] - приемлемый? На 3-4 порядка меньше, чем для бериллия?

Распыление вольфрама за счет нейтралов перезарядки в теневых областях первой стенки считается меньшей проблемой при наличии ионов неона. К тому же, может быть уменьшено за счет присутствия бора на поверхности.



J.Romazanov, NF-2022

Накопление примесей вольфрама в плазменном шнуре

Есть ожидания, на основе моделирования «неоклассического» транспорта примесей, что при большом градиенте температуры ионов накопления вольфрама в центре плазменного шнура не будет.

Проведены расчеты в коде JINTRAC. Утверждается, что эти расчеты подтверждаются экспериментами в токамаке JET.

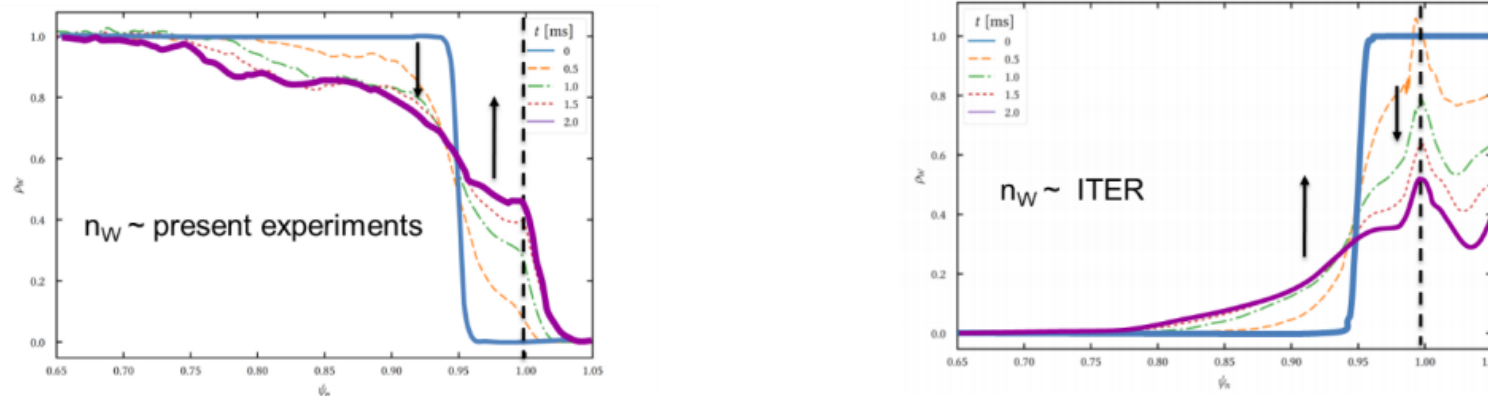


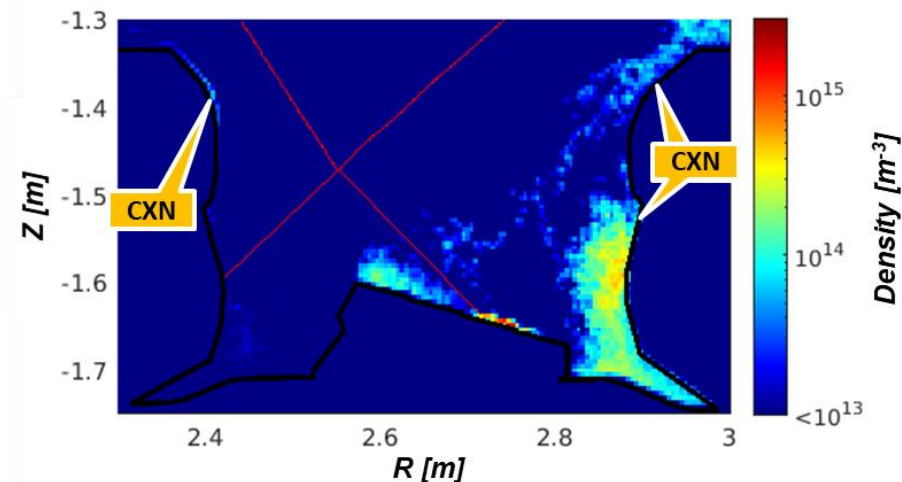
Figure 2-13. Upper: JOREK model fluid velocity during ELMs for ASDEX Upgrade (arrows indicate the direction of the drift, with the colour indicating the magnitude). Lower left: W impurity distribution before (blue) and after (violet) the ELM assuming inwards edge W transport between ELMs as in present experiments. Lower right: W impurity distribution before (blue) and after (violet) the ELM assuming outwards edge W transport between ELMs as expected in ITER. The dashed vertical line corresponds to the separatrix and the horizontal axis is in normalized flux units [van Vugt 2019].

Распыление дивертора и первой стенки

Анализ данных Asdex-Upgrade предполагает, что из дивертора идет больше, чем с первой стенки. Это считается доводом, что «хуже» от вольфрамовой первой стенки не будет.

Хотя из общих соображений кажется, что:

- В ИТЭР можно ожидать лучше экранировку примесей в диверторе, чем в существующих машинах.
- При наличии бериллия на первой стенке возможна частичная защита диверторных пластин пленкой бериллия. Верхняя часть дивертора дает значительный вклад в источник примесей и местом осаждения бериллия.



D. Borodin, PSI-2022

Как предлагается организовать боронизацию?

- Предполагается отработанная на ряде токамаков процедура с использованием диборана в тлеющем разряде на гелии (или дейтерии).
- Произведены расчеты расположения дополнительных электродов и инжекторов газа для равномерного покрытия стенки и анализ возможности размещения других необходимых узлов

Очевидные сложности:

- Нанесение в тлеющем разряде требует выключение магнитного поля
- Диборан - ядовитый газ, требуется дополнительные меры обращения.
- При наличии трития дополнительные сложности с системой разделения газов.
- Регулярная боронизация подразумевает со-осажденные слои с тритием (оценки показывают умеренную скорость накопления)
- Необходимо избежать проблем с отшелушиванием пленок.

Real time осаждение бора

В качестве запасного варианта рассматривается инъекция борной пыли в ходе рабочего разряда, что позволяет локальное осаждение в область максимальной эрозии, обеспечивая возобновление.

“Real time” кондиционирование путем инжесктирование частиц лития применялось в рекордных разрядах на токамаке EAST.

Инжекция литиевой или борной пыли (EAST) приводит также к подавлению ELMов.

“Real time” осаждение бора/лития уменьшает обратный поток водорода (рециклинг). Может быть важно для длительных разрядов.

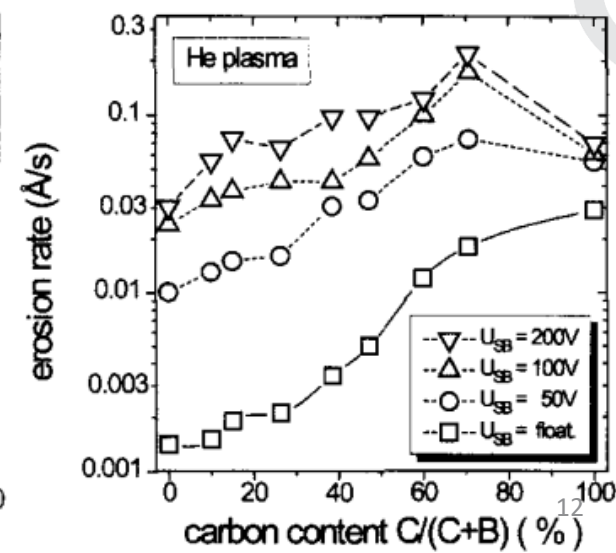
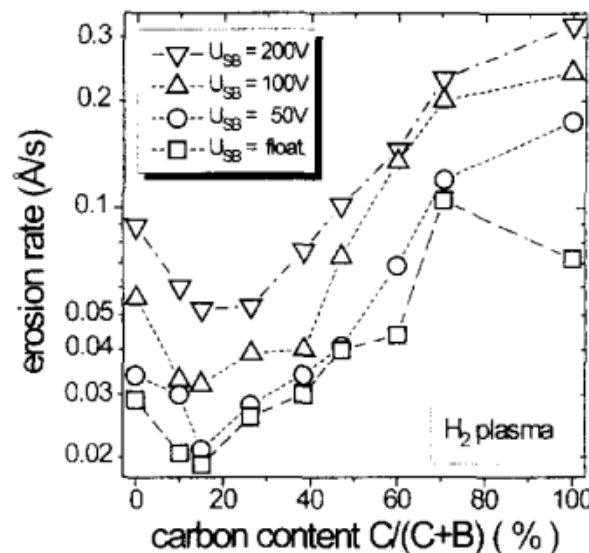
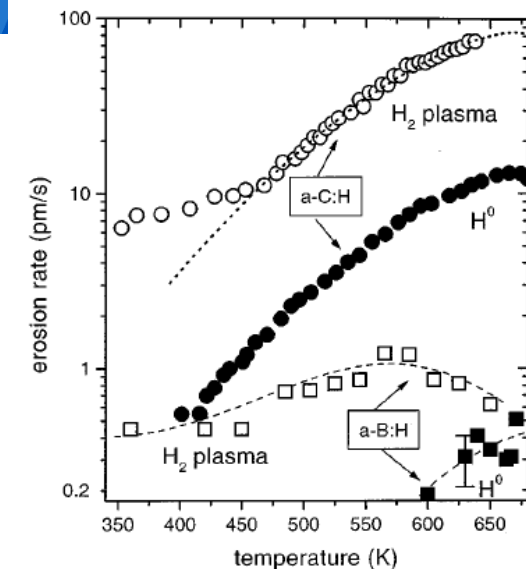
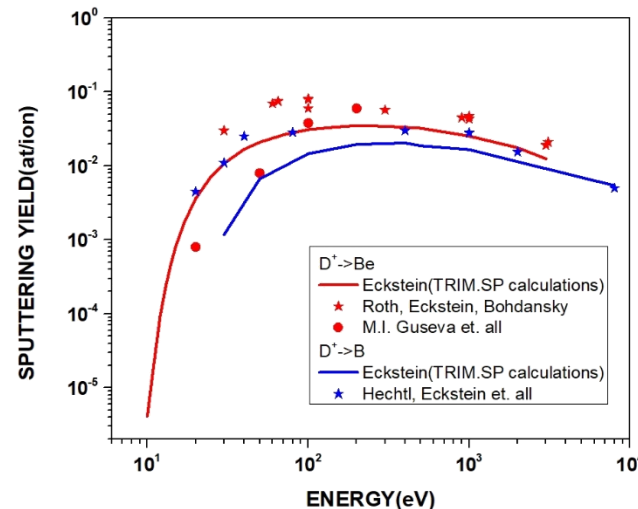
Что с накоплением трития? «The boron powder injection experiments in ASDEX Upgrade showed that a good wall coverage required injection of 340 mg of powder per discharge [Bortolon 2019]. Scaling with surface area and discharge duration leads to the injection of ~50 g per 100 s discharge in ITER.»



DIII-D, San Diego

Эрозия бора

- ❖ Скорость физического распыления сравнима (чуть меньше) с бериллием
- ❖ При малых энергиях доминирует **химическое распыление**, но заметно меньше, чем у углерода (экспериментальных данных мало). Максимум эрозии при ~ 580 К
- ❖ Отшелушивание или отслоение при воздействии ЭЛМов? + возможен эффект повышенной эрозии тонкой пленки на тяжелой подложке
- ❖ Отслоение при контакте с атмосферой? (наблюдается на Л-2М)
- ❖ Скорость распыления меньше в случае B_4C



Со-осаждение бора и трития

- ❖ Захват водорода в пленках бора больше, чем Be, но меньше, чем в углеродных пленках (все данные только по осаждению из газовой фазы?)
- ❖ Можно ожидать увеличение накопления по сравнению с Be стенкой, если полное покрытие стенки бором.
- ❖ «co-deposition rates with B will be similar or higher to those with Be, but the trapped fuel in the H-B layers will not be released at any baking temperature accessible to ITER»
- ❖ Накопление дейтерия и пыли в ASDEX-Upgrade значительно меньше, чем в случае углеродной стенки.

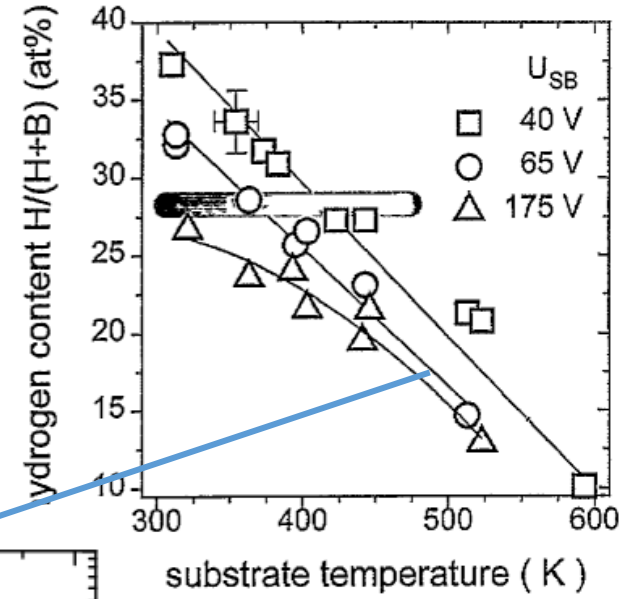
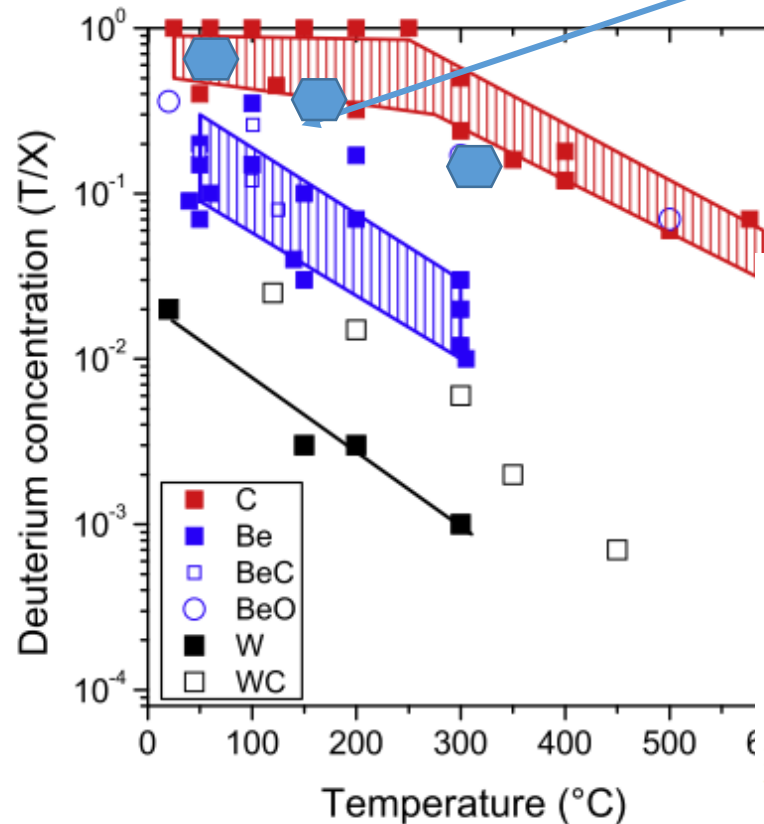


Figure 4 (top): Hydrogen content $H/(H+B)$ on the substrate as a function of substrate temperature and self-bias U_{SB} . The grey line indicates a transition between thermally stable (located below this line) and unstable (located above this line) hydrogen content. The lines are only a guide to the eye.

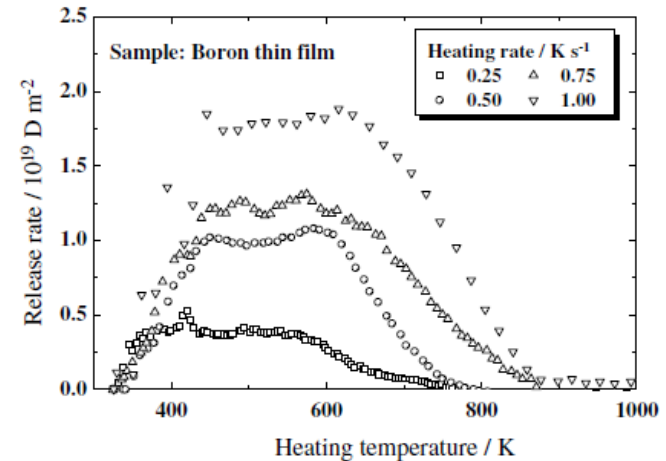


Figure 4 (bottom): Thermal desorption spectra of deuterium obtained from boron thin film with various heating rates.

Эксперименты в JET

- ❖ Анализ распыления нейтралами перезарядки вольфрама и бериллия в JET.
- ❖ Разница менее, чем на два порядка.
- ❖ Если не покрывать бором, то будет большая проблема.

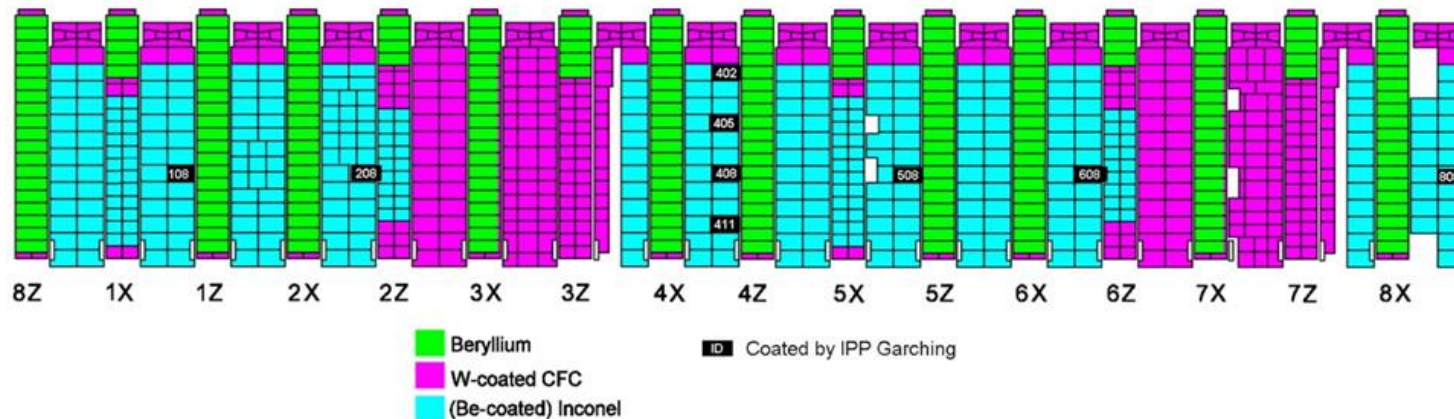


Table 2

Erosion data for W in RAIW region for ILW1, ILW-2 and ILW-3 campaigns.

Campaign	ILW-1	ILW-2	ILW-3
Total erosion, averaged over toroidal and vertical directions, [10^{15} atoms/cm ²] / [nm]	59 / 9.4	63 / 10	145 / 23
Average total erosion in midplane region, [10^{15} atoms/cm ²] / [nm]	59 / 9.4	69 / 11	147 / 23
Total erosion, averaged over toroidal and vertical directions, [10^{11} atoms/cm ² ·sec]	8.5	9.1	16.9
Average erosion rate in midplane region, [10^{11} atoms/cm ² ·sec]	8.6	10	17.3
RSD toroidal, %	11	20	6
RSD poloidal, %	19	11	9

Table 3

Erosion data for Be in RAIW region for ILW1, ILW-2 and ILW-3 campaigns.

Campaign	ILW-1	ILW-2	ILW-3
Total erosion, averaged over toroidal and vertical directions, [10^{15} atoms/cm ²] / [nm]	3500 / 290	1900 / 160	2900 / 240
Average total erosion in midplane region, [10^{15} atoms/cm ²] / [nm]	5100 / 420	2200 / 180	3500 / 290
Average erosion rate, [10^{11} atoms/cm ² ·sec]	510	280	340
Average erosion rate in midplane region, [10^{11} atoms/cm ² ·sec]	740	330	410
RSD toroidal, %	21	33	26
RSD poloidal, %	41	13	16

Заключение

- ❖ С точки зрения ВПП серьезных проблем с бериллием нет. Есть вопросы по тепловым нагрузкам при срывах, которые могут остаться и для вольфрама.
- ❖ Без боронизации не получается хороших разрядов ни с вольфрамом, ни с молибденом
- ❖ Опыт использования вольфрама на первой стенке – это покрытия. Будет ли разница с поликристаллом? – растрескивание, хуже сцепление пленок бора?
- ❖ Накопление трития может увеличиться по сравнению с бериллиевой стенкой при полном покрытии бором стенки.
- ❖ Оценки накопления вольфрама в плазме основаны на ряде теоретических предсказаний, которые требуют верификации.
- ❖ Боронизация будет приводить к запылению всех доступных поверхностей – может быть проблемой для диагностических систем?

Возможные альтернативы?

Если соглашаться с аргументами необходимости ухода от бериллия, какие альтернативы?

- ❖ Осаждение карбида бора из карборана? (Использование карборана возможно в ходе рабочего импульса в отличие от ядовитого диборана. Ниже распыление B_4C . Сохраняются ли геттерные свойства?)
- ❖ Имеет ли смысл в каких-либо областях использовать предварительно напыленные «толстые» слои?
- ❖ Литий?

Основные вопросы

1. Вызвана ли замена бериллия на вольфрам преимущественно соображениями инженерно-технологического удобства и безопасности обращения?
2. Все ли необходимые функции первой стенки сохраняются при замене бериллия на вольфрам без дополнительного покрытия?
3. Есть ли физические причины, требующие замены бериллия?
4. Избавляет ли полностью замена бериллия на вольфрам от рисков разрушения (плавления, короткого замыкания) элементов облицовки при срывах, ELMs, VDE, от накопления изотопов водорода (в первую очередь, трития)?
5. Достаточно ли имеющихся сегодня экспериментальных данных для суждения о не накоплении в центральной плазме количества вольфрама, препятствующего достижению термоядерной температуры при имеющихся мощностях нагрева?
6. Достаточно ли имеющихся сегодня экспериментальных данных для суждения о приемлемости скорости эрозии, трещинообразования, раскалывания и оплавления вольфрама для работы ИТЭРа при запланированных параметрах плазмы?
7. Возможны ли достижение плановых параметров плазмы и реализация миссии ИТЭРа при использовании вольфрама без покрытия?
8. Потребуется ли при нанесении покрытия апробированными технологиями и работе ИТЭРа на базовых режимах частое (после нескольких разрядов) обновление покрытия?
9. Сохраняются ли в случае применения бора или его соединений в качестве покрытия все «плюсы» перехода на вольфрам?
10. Можно ли на основе имеющихся экспериментальных данных сделать вывод о достаточности предлагаемых изменений в способах донагрева для достижения обеих целей ITER: $Q \geq 10$ индуктивных режимов и $Q \geq 5$ стационарных режимов?
11. Следует ли ожидать в результате замены бериллия на вольфрам дополнительных осложнений, связанных с убегающими электронами?