Взаимодействие плазмы с поверхностью.

Проблемы термоядерного реактора.

Ю.В. Мартыненко

24.11.2011

Элементы токамака контактирующие с плазмой





Разрез камеры токамака ИТЭР (а) и дивертор (б), расположенный в нижней части камеры, звездочки - места осаждения продуктов эрозии.



Максимальнгая эрозия

Максимальное осаждение

Схема дивертора ЈЕТ

Проблемы термоядерного реактора

1. Проблема стойкости деталей реактора (первой стенки)

- эрозия элементов камеры при больших удельных нагрузках
- изменение поверхности, перепыление материала, образование сплавов, соединений с новыми свойствами

2. Проблема продуктов эрозии: пыль, плёнки

- накопление трития в продуктах эрозии,
- химическая активность наноструктур (разложение воды водород взрыв)
- токсичность Ве конъюнктивиты, дерматиты и поражения легких,
- радиологическая опасность радиоактивная пыль
- диагностические стёкла

3. Плазма и поверхности обращённые к ней – единая взаимосвязанная

система

- Самосогласованное описание плазмы со стенкой
- Пыль в токамаке переизлучение энергии, возмущение перефирийной плазмы
- стабилизация инжекцией пыли, mitigation

4. Ввод топлива с помощью пылевых и кластерных струй.

<u>Тритий в ИТЭРе</u>

Соосаждение с перепыленным материалом

DT experiments in JET



Ttitium retention in ITER



Retention by implantation and co-deposition: ~30% retained

T.Loarer. 7th EU PWI TF. Julich. 14-15 October 2008 Физическое распыление (первой стенки) поток атомов (~ 1-10 эВ), Блистеринг (первая стенка) крышки блистеров, 1-10 мкм Химическое распыление (дивертор, СFС) летучие углеводороды СН_л. Радиационно-ускоренная сублимация (дивертор, CFC) поток атомов. ELM-ы, срывы, дуги - тепловой удар (дивертор, W, CFC) испарение, корпускулярная эрозия (хрупкое разрушение, капельная эрозия)



В ПЛАЗМЕ –

диссоциация молекул, ионизация, испарение пылевых части

продукты эрозии

- атомы и ионы
- пылевые частицы



Основной механизм эрозии – ELMы

ITER

ELM ~ 1 – 4 MJ/m² in 0.5 ms Disruption ~ 20 - 40 MJ/m2 in 1ms





A.Loarte. EU PWI TF. Madrid. October 2007

J/cm ²	Ве	С
Работа пара против давления плазмы	60.7	44.5
Кин. энергия расшир пара	40.7	19.9
Излучение наружу	29.4	104
Внутр. энергия пара	61	32.4
Поглощено мишенью	8.7	0.48
Е на испарение	0.24	1.47

Расчёт (КИ + Ч-70 1996) + МК-200 (Троицк)

W=10 MW/cm²

$$2*10^{-5} c$$

 $E_{e} = 1 keV$
 $n_{e} = 4*10^{15} cm^{-3}$
P = 10 атм
B= 2T

Известны основные закономерности

Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

- Совместное облучение разных материалов
- Предыстория взаимодействия
- Синергизм разных факторов
- Свойства модифицированных материалов

Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

Эрозия при ELMax зависит от условий при нормальном режиме

(Guseva, Khripunov, Martynenko, et al.JNM.1998)



uclear Materials 258-263 (1998) 1120-1126

Fig. 2. Electron microphotographs of the RGT graphite (sample 1) after irradiation at the temperature 770°C by 200 eV D⁻- ions up to a dose of 10^{22} cm⁻². The scale length corresponds to 10 μm .



Fig. 3. Electron microphotographs of the RGT graphite (sample 1) after irradiation by the stationary and pulsed (0.25 MJ m⁻², 60 μ s, 6 pulses) plasmas. The scale length corresponds to 10 μ m.



Fig. 5. Microphotographs of the RGT graphite (sample 2) after irradiation at the temperature 1150°C by 200 eV D⁺-ions up to a dose of 10^{22} cm⁻². The scale length corresponds to 10 μ m.



Fig. 6. Microstructure of the graphite (sample 2) after stat ary and pulsed plasma irradiations. The scale length \circ **10** sponds to 10 μ m.

Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы



Combined W+C target D plasma $(N = \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3},$ $T_e \sim 5 \text{ eV},$ $E_i = 500 \text{ eV},$ $\Phi_i \sim 102^1 \text{ ion/cm}^2$



- Sputtering yields (Yw = $1.7 \cdot 10^{-2}$ at/ion, Yc = $5 \cdot 10^{-1}$ at/ion) Yw = $2.2 \cdot 10^{-3}$ at/ion, Yc < $6 \cdot 10^{-3}$ at/ion – single targets C chemical sputtering Yc < 10^{-1} at/ion
- Redeposition of W on graphite ~0.17 at.% in spots ~ 2.5 at.%.
- C redeposition on W in neighborhood to graphite ~ 60 at.%
 with tungsten carbides WC and W₂C phases.

Конкретные условия взаимодействий – новые вызовы

W πyx (fazz). 1000K < T < 2000K e^{+/m²} He, E >20~30 eV











Bubble

Pinhole

Protrusions

Swelling &Digging

Nano-

Structure (Fuzz)



 Малое распыление
 Излучение, ниже Т – меньше эрозия при ELM Дуги, образование пыли

Продукты эрозии

Плёнки

Пыль



«Столбчатая»

H 340 nm

10.0 kV 3.0 9177x

Слоистая



Пленки вблизи лимитера Т-10

-(718 nm

872 nm 1-



57 nm

50 60 70 80 90 100 110 120

particle radius (nm)

• measured radius

-Gaussian fit Gaussian fit



No.4 No.5

Пленка из Tore Supra

Det WD Exemption SE 4.9 0 XL30SFEG D138

1 мкм

Пыль из JET

0.1 мкм

Глобулярные плёнки из разных установок



Углеводородная пленка с колоннообразной формой, токамак **JT-60U**

20 мкм

Tore Supra



50 мкм

TEXTOR



DIII-D



5 мкм

NAGDIS-II



12 2 мкм

Определение фрактальной размерности глобулярных плёнок

Цель – определить удельную сорбционную поверхность



Плёнки с развитой поверхностью

Оценка величины сорбционной поверхности фрактальных кластеров

Фрактальная структура состоит из элементарных частиц – кластеров размером a_0 . Количество кластеров $N_B = r^D$, где D = 2.2 ÷ 2.3. Удельная поверхность SSA

SSA =
$$S_0 / \rho V = \int_{a_0}^{r_{\text{max}}} \frac{4\pi a_0^2}{a_0^2} (\frac{r}{a_0})^D dr / \rho \int_{a_0}^{r_{\text{max}}} \frac{4\pi a_0^3}{3\pi a_0^3} (\frac{r}{a_0^2})^D dr = \frac{3}{\rho a_0^2}$$

Плёнки из токамака ВЕТ метод (адсорбция метана при 77 ⁰С) **Tore-Supra**

SSA = 180 м²/г для углеводородной пленки

Водород хуже удерживается во фрактальных, чем в гладких пленках.

max

В твердых CHx пленках D/C = 0.2 - 0.4, в мягких CHx пленках D/C = 0.5 - 0.9.



Соосаждение – водород равномерно распределен по глубине 14

Размеры и свойства кластеров в гладкой плёнке из Т-10



Модель образования фрактальной структуры

- Начальный этап рост дендритов из одиночных подвижных атомов.
- Образование на поверхности критических зародышей центров роста дендридов флуктуационно и/или около примесей →

зависимость структуры от потока атомов и примесей, Т.

Диффузия примесей к более горячим местам в результате уменьшения энергии активации при термическом расширении решетки \rightarrow рост развитых структур.

Когда поверхность заполнена – рост фрактальной структуры за счет осаждения атомов. (Диффузионно ограниченная агрегация – DLA)



"Ballistic"

РАЗМЕР МИНИМАЛЬНОГО КЛАСТЕРА:

Диффузионное «разравнивание» слишком мелких объектов:

$$a_0 = 2\sigma \Omega / T \sim 15$$
 нм,

SSA(C) $\approx 170 \text{ m}^2/\text{r.}$ SSA(W) $\approx 16 \text{ m}^2/\text{r}$

(**о** - поверхностное натяжение, **Т** –температура поверхности, Ω – атомный объем).

Продукты эрозии: плёнки

 Известны разные типы плёнок СНх и W и общие их образования: гладкие пленки - малые потоки оседающих частиц и низкие T подножки, плёнки с развитой поверхностью, фрактальные, – высокоэнергичные режимы (потоки, температура).

Требуются количественные данные условий образования типов пленок и возможного рециклинга.

2. Исследована структура гладких пленок СНх.

Необходимы такие же исследования и для других видов плёнок

- 3. Определена удельная поверхность некоторых фрактальных пленок . Нужны более широкие исследования.
- 4. Измерены содержания водорода и ТДС некоторых видах.

Нужны более широкие исследования.

5. Теоретические оценки отрыва и фрагментации плёнок на куски ℓ ~ 10⁻²–1 см. Нужны экспериментальные работы

- Пыль мобилизуемая часть продуктов эрозии.
- Пыль влияет на работу токамака:
- 1) охлаждает плазму, попадая в центральную часть;
- инициирует малые вихри (blobs) в периферийной плазме;
- 3) возможна стабилизация разряда инжекцией пыли.

Опасна при вскрытии камеры реактора – летучесть, тритий, радиоактивность, токсичность (Ве).

Нанопыль в токамаке Т-10

Пыль собранная в ЈТ-60



Пыль собранная на кварцевом фильтре в Т-10 и ее распределение по размерам



Агломерация пыли. Стеклянный фильтр Т-10

2008 г. Программа - «Образование пыли в токамаке Т-10 и ее влияние на безопасность термоядерного реактора»

1919

Нанопыль в токамаке Т-10

600 kBт × 0.5сек = 2000 °C (50 MBт/м²)

ИТЭР – подобные условия.

25 нм





Фильтр для сбора пыли, Т-10





Водорода в пыли мало

Стабилизация плазмы пылью

Новый подход к стабилизации плазмы при инжекции пылевых частиц

Введение в плазму мелко-дисперсного (1 ÷ 100 мкм) порошка Al₂O₃ привело к увеличению времени жизни пинча Z-пинча более чем на порядок.

Разряд в чистом неоне в установке «Плазменный фокус ПФ-3»



(V.E. Fortov, V.I. Kraus, V.P. Smirnov et al, 5th Int. Conf, on Z-pinches, Albuquerque, 2002)

При напуске пыли <u>в Нагдис II</u> (2008) потоки плазмы из разряда в среднем уменьшились на 20%, но частота флуктуаций возросла.

Напуск N₂ в <u>ASDEX(2008)</u> \rightarrow

- уменьшение амплитуды и увеличение частоты ELM-ов.
- излучение возросло только в дивертере.



Inclusion of surface reactions in self-consistent global model of impurity migration K. Krieger, Ch. Linsmeier, K. Schmid

Treat complex **plasma-wall interactions** and **material evolution** in a simplified way



Analytical model:

- first wall: *n* tiles, different loads
- background plasma (B2 + EIRENE ...)
- redistribution matrix (DIVIMP)
- SDTrim sputter yields
- parametrized surface materials evolution



- 1. Ответы на новые вызовы по поведению материалов контактирующих с плазмой. Поиски решений.
- 2. Пути управления наноструктурными продуктами эрозии :
 - режимы работы с подавлением срывов, ЭЛМов,
 - mitigation (Ar, Ne),
 - модификация пыли и пленок in situ,
 - жидкая или «капельная» литиевая стенка.
- 3. Нано частицы для управления плазмой:
 - «пылевой» дивертор,
 - стабилизация плазмы инжекцией пылевых частиц.

Спасибо за внимание