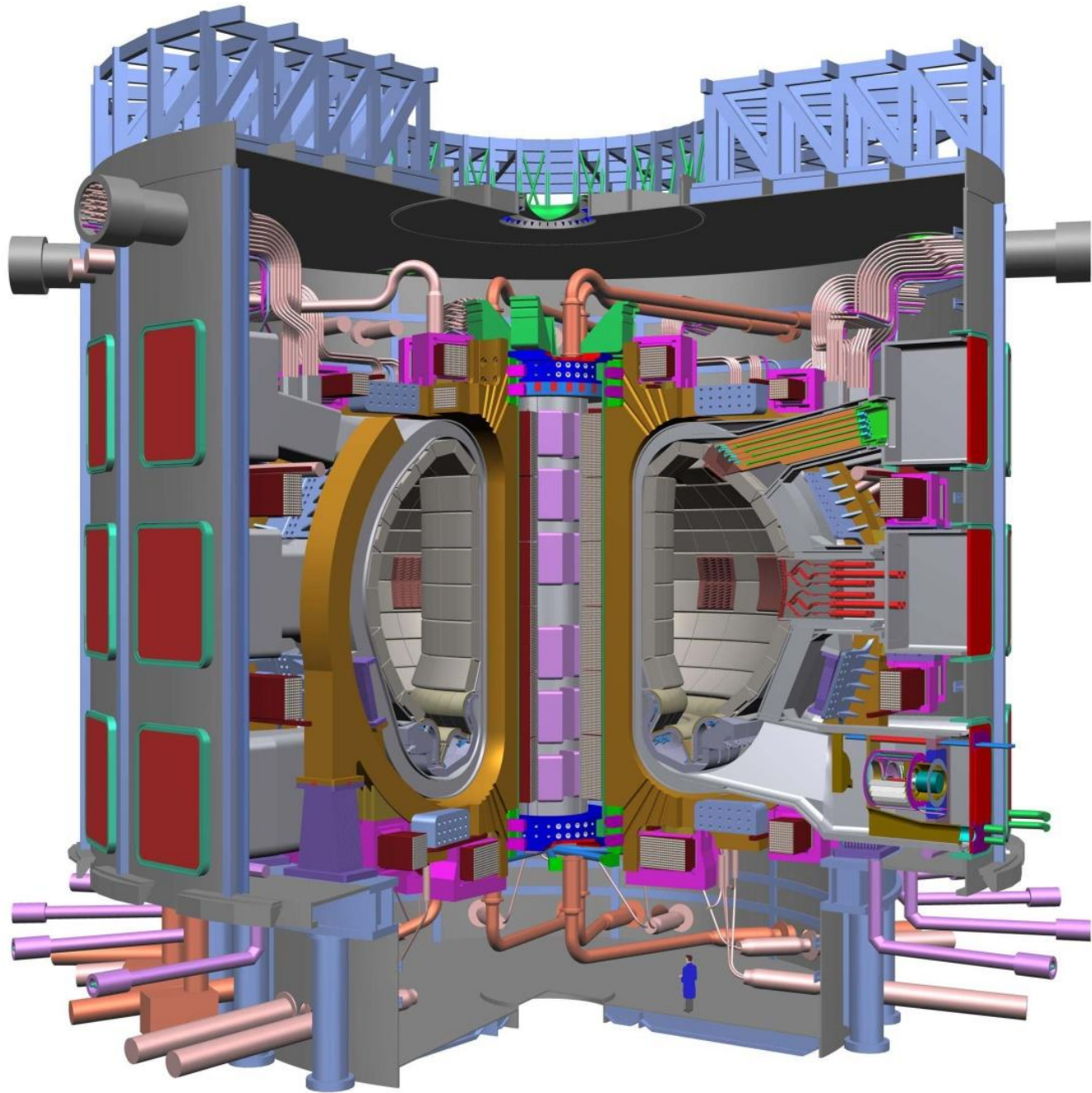


**Поиск течей в электро-вакуумных установках (проект ИТЕР).
Метод мультиспектральной актинометрии**

Ханенко Павел Олегович, 5 курс КАУ



Leak detection system in ITER S.

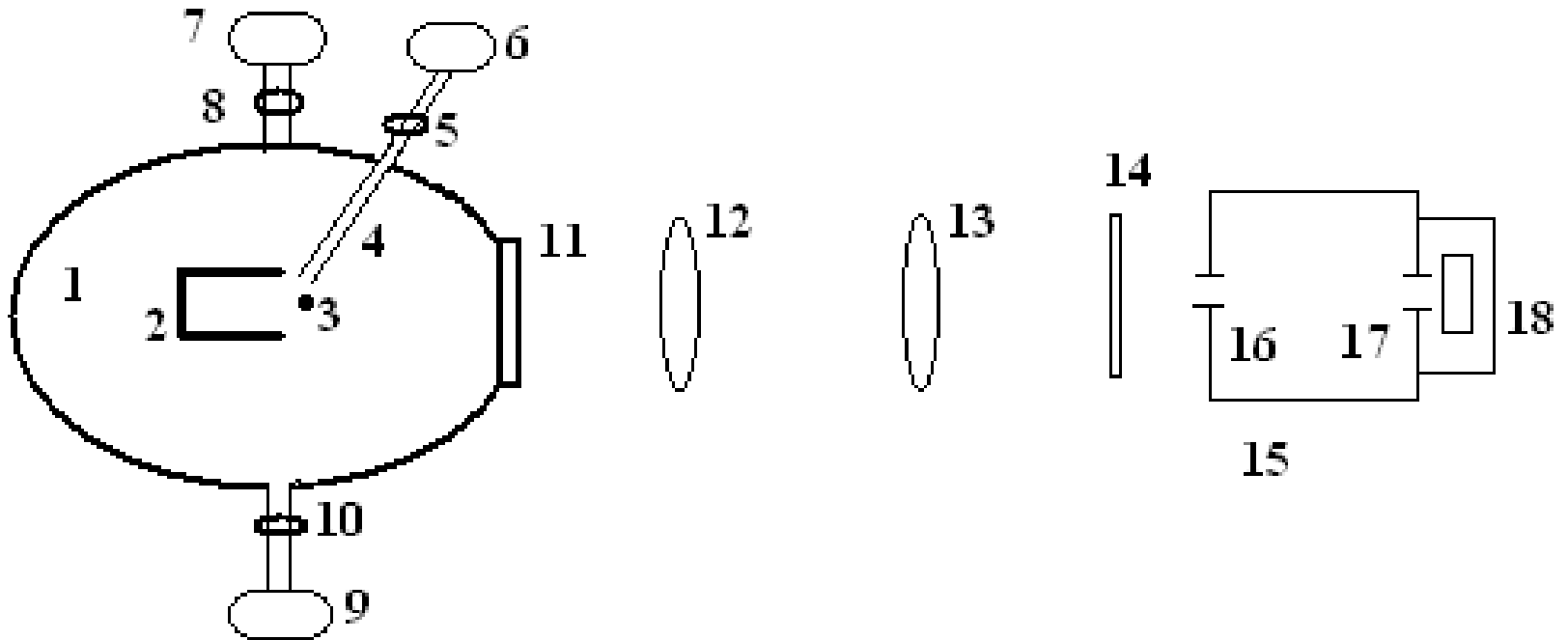
Hiroki *, P. Ladd, K. Shaubel, G. Janeschitz, R.A. Marrs

Table 1

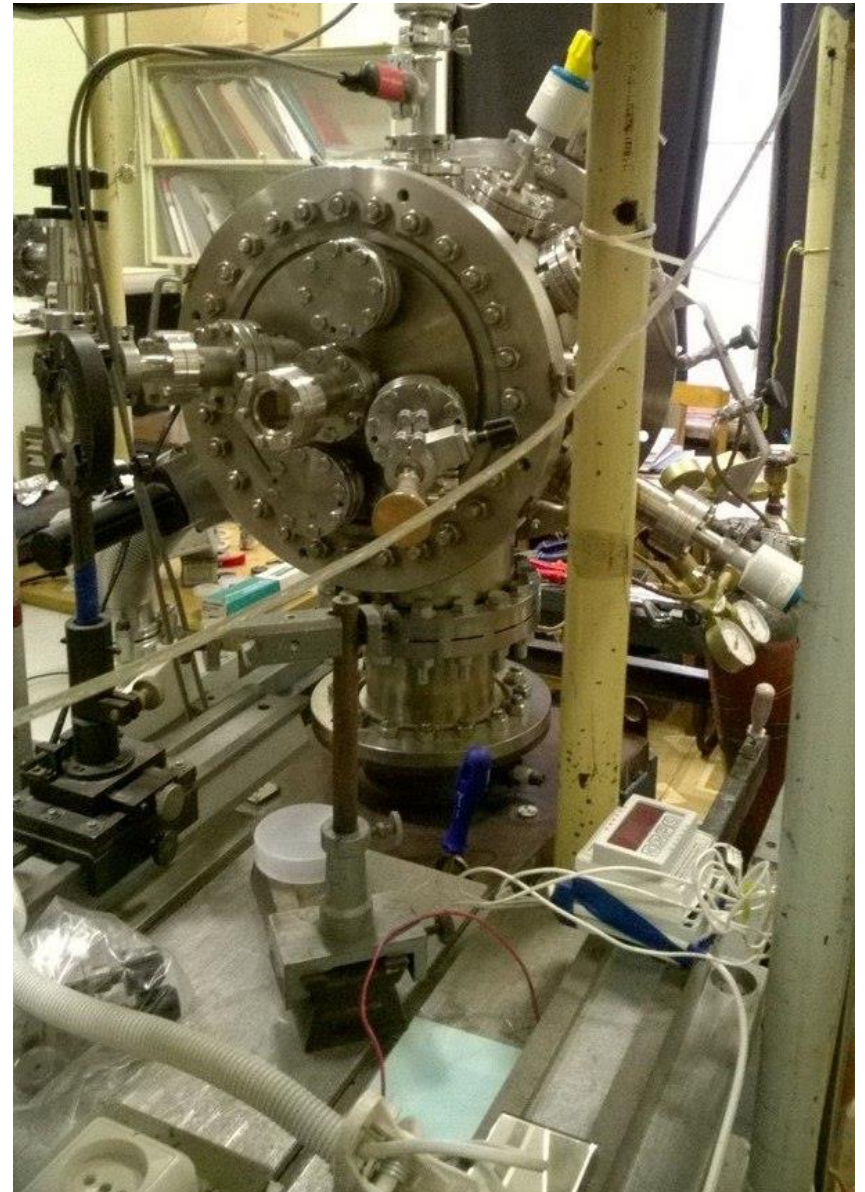
List of the overall leak detection system

Leak detection subsystem	Integrated leak rate (Pa m ³ s ⁻¹)	Unit	Quantity
Torus	$<1 \times 10^{-7}$	MSLD type 1	1
		RGA unit type 1	5
		RGA unit type 4	3
		Calibration unit type 1	1
NB/DNB injector	$<1 \times 10^{-8}$	MSLD type 1	1
Cryostat	Before operation: $<1 \times 10^{-5}$ During operation: <0.1 (Air) $<1 \times 10^{-3}$ (Helium)	MSLD type 2	1
		RGA unit type 2	1
		Calibration unit type 2	1
Service Vacuum	$<1 \times 10^{-8}$ for each component	MSLD type 3	3
		RGA unit type 3	12
		Calibration unit type 2	3
EC H&CD	$<1 \times 10^{-8}$	MSLD type 3	2
		Calibration unit type 2	2

Экспериментальная установка



Общий вид установки



Методика измерений (метод оптической актинометрии)

Излучения частиц X, A при переходах $u-l$, для оптически прозрачного слоя плазмы представимы в виде:

$$I_{X,A} = C_{X,A} * h * \nu_{X,A} * A_{X,A} * k_{X,A} * N_{X,A} * (Q_{X,A} + (\tau_{X,A})^{-1})^{-1}$$

где $C_{X,A}$ – оптические коэффициенты, определяемые пропусканием оптики, спектральной чувствительностью измерения и телесными углами собираемого излучения; h – постоянная Планка; $\nu_{X,A}$ – частота излучения; $A_{X,A}$ – коэффициенты Эйнштейна для переходов; $k_{X,A}$ – скорости возбуждения из основных состояний верхних уровней переходов, в расчете на одну частицу; $N_{X,A}$ – концентрации частиц X, A в основных электронных состояниях (предполагается, что они практически равны полной концентрации); $Q_{X,A} = \sum q_{X,A} N_i$ – частота распада верхнего уровня впоследствии столкновений с частицами в плазме (тушение излучающих состояний из-за столкновений), $q_{X,A} = \langle \nu_{X,A} \sigma_{X,A}^q \rangle$ – константы скоростей тушения; $\tau_{X,A}$ – радиационные времена жизни излучающих состояний. Если выбрать наиболее сильные оптические переходы с рассматриваемого излучающего и возбуждающего состояния, то $(\tau_{X,A})^{-1} = A_{X,A}$.

Тогда искомая концентрация равна:

$$N_X = N_A \frac{I_X}{I_A} * \frac{C_A}{C_X} * \frac{\nu_A}{\nu_X} * \frac{A_A}{A_X} * \frac{k_A}{k_X} * \frac{Q_X + A_X}{Q_A + A_A}$$

Учет тушения излучающих состояний

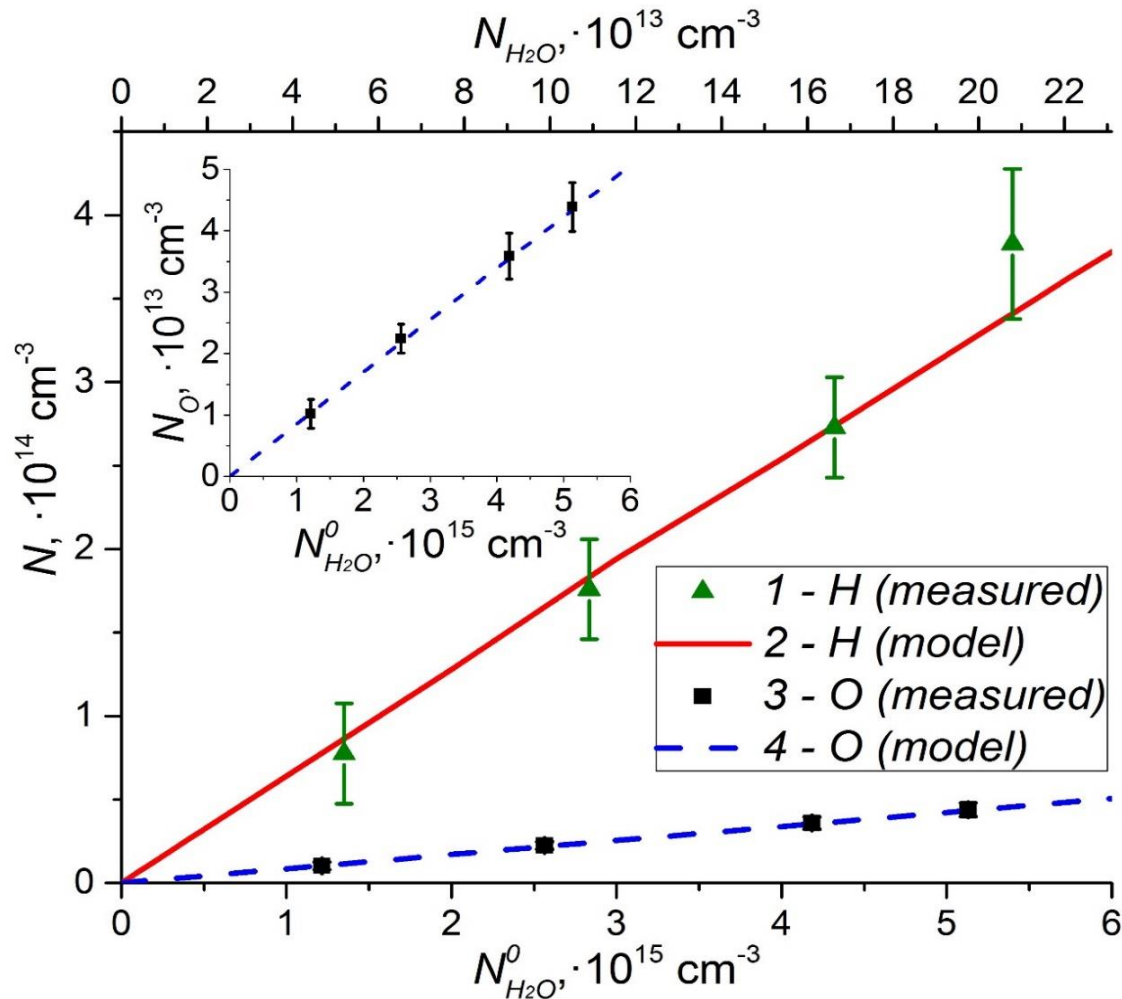
Система уравнений для определения концентраций искомых веществ в плазме:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{H_2O} = N_{Xe} * \frac{I_{OH}}{I_{Xe}} * \frac{\lambda_{OH}}{\lambda_{Xe}} * \frac{C_{Xe}}{C_{OH}} * \frac{k_{Xe}}{k_{OH}} * \frac{A_{Xe}}{A_{OH}} * \frac{Q_{OH} + A_{OH}}{Q_{Xe} + A_{Xe}} \\ N_H = N_{Ar} * \frac{I_H}{I_{Ar}} * \frac{\lambda_H}{\lambda_{Ar}} * \frac{C_{Ar}}{C_H} * \frac{k_{Ar}}{k_H} * \frac{A_{Ar}}{A_H} * \frac{Q_H + A_H}{Q_{Ar} + A_{Ar}} \\ N_O = N_{Xe} * \frac{I_O}{I_{Xe}} * \frac{\lambda_O}{\lambda_{Xe}} * \frac{C_{Xe}}{C_O} * \frac{k_{Xe}}{k_O} * \frac{A_{Xe}}{A_O} * \frac{Q_O + A_O}{Q_{Xe} + A_{Xe}} \\ N_{H_2O}^0 - N_{H_2O} = N_{H_2} = 2N_{O_2} \end{array} \right.$$

Уравнения для определения скорости тушения:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{OH} = q_{OH}^{H_2O} * N_{H_2O} + q_{OH}^H * N_H + q_{OH}^O * N_O + q_{OH}^{Xe} * N_{Xe} + \\ \quad + q_{OH}^{Ar} * N_{Ar} + q_{OH}^{He} * N_{He} + q_{OH}^{O_2} * N_{O_2} + q_{OH}^{H_2} * N_{H_2} \\ Q_H = q_H^{H_2O} * N_{H_2O} + q_H^H * N_H + q_H^O * N_O + q_H^{Xe} * N_{Xe} + \\ \quad + q_H^{Ar} * N_{Ar} + q_H^{He} * N_{He} + q_H^{O_2} * N_{O_2} + q_H^{H_2} * N_{H_2} \\ Q_O = q_O^{H_2O} * N_{H_2O} + q_O^H * N_H + q_O^O * N_O + q_O^{Xe} * N_{Xe} + \\ \quad + q_O^{Ar} * N_{Ar} + q_O^{He} * N_{He} + q_O^{O_2} * N_{O_2} + q_O^{H_2} * N_{H_2} \\ Q_{Xe} = q_{Xe}^{H_2O} * N_{H_2O} + q_{Xe}^H * N_H + q_{Xe}^O * N_O + q_{Xe}^{Xe} * N_{Xe} + \\ \quad + q_{Xe}^{Ar} * N_{Ar} + q_{Xe}^{He} * N_{He} + q_{Xe}^{O_2} * N_{O_2} + q_{Xe}^{H_2} * N_{H_2} \\ Q_{Ar} = q_{Ar}^{H_2O} * N_{H_2O} + q_{Ar}^H * N_H + q_{Ar}^O * N_O + q_{Ar}^{Xe} * N_{Xe} + \\ \quad + q_{Ar}^{Ar} * N_{Ar} + q_{Ar}^{He} * N_{He} + q_{Ar}^{O_2} * N_{O_2} + q_{Ar}^{H_2} * N_{H_2} \end{array} \right.$$

Результаты измерений



Поведение концентрации атомов H и O в зависимости от концентраций молекул воды:

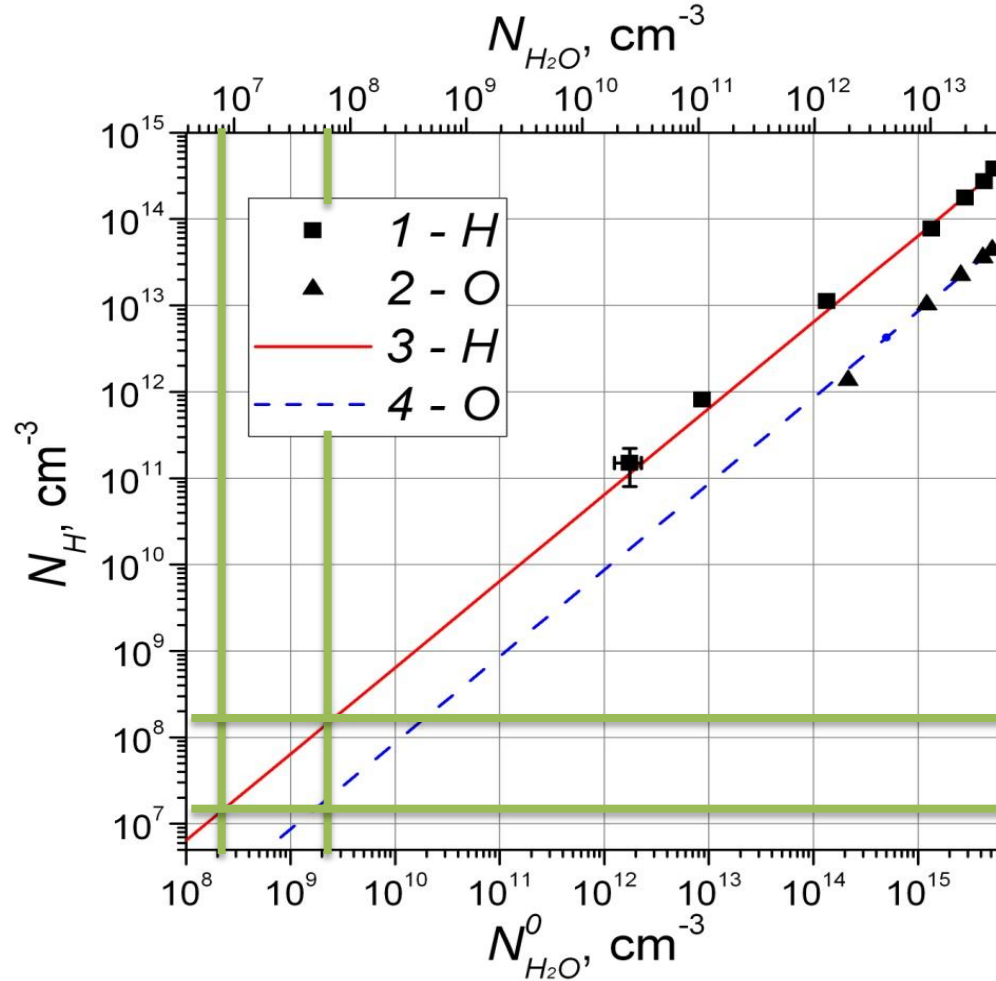
1 – результаты измерений концентраций атомов H;

2 – результаты моделирования поведения концентраций атомов H;

3 – результаты измерений концентраций атомов O;

4 – результаты моделирования поведения концентраций атомов O.

Результаты измерений



Поведение концентрации атомов Н и О в зависимости от концентраций молекул воды:

1 – результаты измерений концентраций атомов Н;

2 – результаты измерений концентраций атомов О;

3 – результаты моделирования поведения концентраций атомов Н;

4 – результаты моделирования поведения концентраций атомов О.

Выводы

1. Модернизирована установка "Течь": достигнуто остаточное давление внутри камеры при откачке на уровне $8 \cdot 10^{-7}$ мбар.
2. Проведены измерения концентраций атомов Н и О в зависимости от начального количества молекул воды в разряде в широком диапазоне начальных концентраций молекул H_2O (10^{12} - 10^{16} см⁻³). Результаты измерений находятся в согласии с результатами проведённого моделирования плазмохимических процессов. Установлен линейный характер полученных зависимостей.
3. Проведённые исследования показали, что сделанное ранее предложение об использовании "промежуточных" актинометров для измерений концентраций молекул воды в плазме, удобно для использования в электровакуумных установках в широком диапазоне концентраций паров воды в плазме.

Публикации по теме дипломной работы

Часть материалов данной работы были представлены на 10-ой конференции "Современные средства диагностики плазмы и их применение" (MDPA2016) и опубликованы в сборнике тезисов этой конференции:

А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, И.В. Кочетов, П.О. Ханенко. Исследование поведения концентраций атомов кислорода и водорода в плазме с примесями паров воды // Современные средства диагностики плазмы и их применение: Сборник тезисов докладов X Конференции. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 21-24.

Спасибо за внимание