

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 6 Активная корпускулярная диагностика

© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ НГУ на 2009–2018 годы

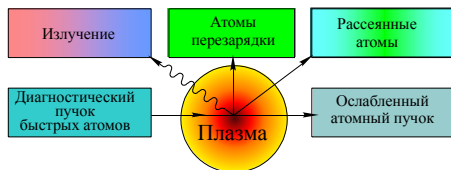
Активная корпускулярная диагностика плазмы (часть 1)

- Основы метода
 - Взаимодействие диагностического пучка с плазмой
 - Источники диагностических атомарных пучков (обзорно)
- Многократное ослабление пучка
- Резерфордское рассеяние быстрых атомов
- Регистрации вторичных ионов
- Зондирование пучками тяжелых ионов или атомов
- Пучково-спектроскопические диагностики
 - Собственное свечение пучка
 - Динамический эффект Штарка (MSE)
 - Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия (CHERS)

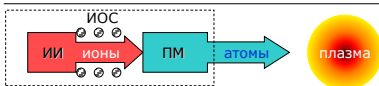
Активная корпускулярная диагностика плазмы

Параметры плазмы определяются в результате взаимодействия диагностического пучка частиц с плазмой.

Общая схема измерений:



Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов

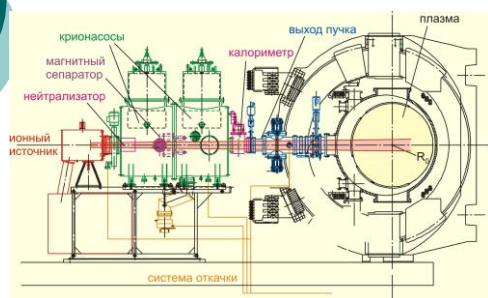


Требования к диагностическим пучкам:

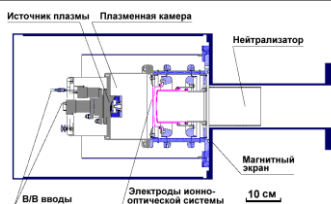
- Энергия, $E_b \sim 10\text{-}50$ кэВ
- Плотность тока, $j_0 \sim 0.01\text{..}0.2$ А/см²
- Размер пучка, $d = 1\text{-}10$ см
- Угловая расходимость, $\delta\alpha \sim 0.01$ rad
- Разброс энергии, $\delta E_b/E_b \sim 1\%$

Ток атомарного пучка измеряют в экв. А
1 экв. А $\approx 6 \cdot 10^{18}$ частиц/с

Устройство диагностического инжектора (на примере RUDI)



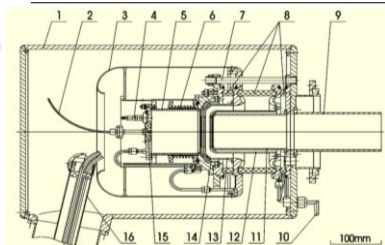
Принцип работы ионного источника



Для создания плазменных эмиттеров ионных источников диагностических инжекторов используются:

- Разряды с накаливаемыми катодами
- Высокочастотные разряды
- Дуговые генераторы плазмы

Устройство ионного источника (на примере RUDI)



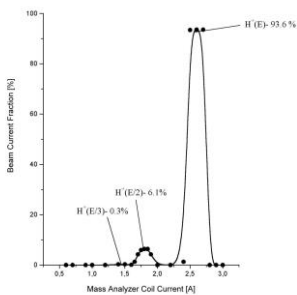
$E_0 = 50 \text{ кэВ}$
 $I = 2 \text{ экв. А}$
 $t = 10 \text{ нс}$

1 – корпус, 2 – газовая трубка, 3 – пермаллоевый экран, 4 – поджиг, 5 – разрядная камера, 6 – антенна, 7 – стягивающие стержни, 8 – алундовые изоляторы, 9 – нейтрализатор, 10 – ввод воды, 11-14 – электроды ионно-оптической системы, 15 – постоянные магниты, 16 – ввод питания

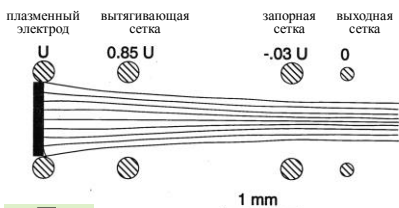
Требования к плазменным эммитерам ионных источников

Чтобы сформировать пучок с малой угловой расходимостью отклонения эмиссионной плотности тока от оптимальной не должны превышать $\pm 10 \%$

Эмитирующая плазма должна содержать малое количество молекулярных ионов H_2^+ и H_3^+



Многоапертурная ионно-оптическая система (ИОС)



$$j = \sqrt{\frac{e}{M}} \frac{U^{3/2}}{9\pi d^2}$$

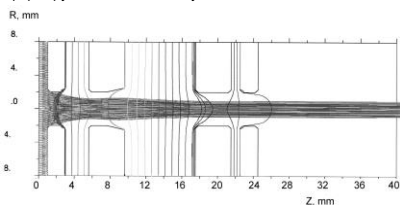
$j = 0,2 \text{ А/см}^2, U = 30 \text{ кВ} \rightarrow d \approx 15 \text{ мм}$

Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов

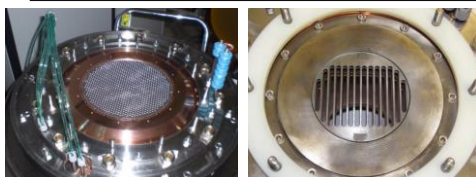
При формировании ионных пучков форма эмитирующей поверхности плазмы сильно зависит от величины перванса:

$$P = j / U^{3/2}$$

Для достижения малой угловой расходимости ($\delta\alpha \sim 0.01$ rad) требуется тщательная оптимизация элементарной ячейки, формирующей отдельный пучок.



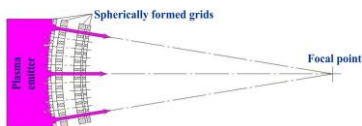
Электроды ИОС диагностических инжекторов



- RUDI-X (2013)
- 1057 holes 4mm ID
- Beam diameter 20 cm
- Grid transparency 42%
- Slit grids for RUDI
- Transparency → 67%
- Beam divergence:
- across the slit - ~0.6°
- along the slit - ~0.35°

Ion source: Formation of the diagnostic neutral beams

Ballistic beam focusing



Neutral beam current density profile in focal plane:

$$j(r, F) = \frac{j_0 e^{-r^2 / (0.5 F)^2}}{\pi^2 F^2 \delta\alpha^2}$$

Angular divergence $\delta\alpha \sim 0.5 \div 0.6^\circ$

Emission ion current density $j \sim 110 \div 130$ mA/cm²

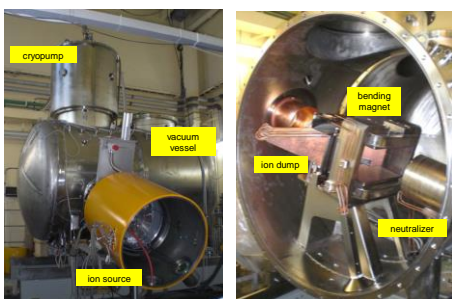
I.V.Shikhovtsev et al. 30th ITPA DTG Meeting
21-24 June 2016, Novosibirsk, Russia

List of DNBI parameters

	Discharge type	Beam energy, keV	Max. extracted current, A	Duration, s	Modulation	Ion species (by current)	Diagnostics
TEXTOR RUDI (1996)	RF/ARC with LaB ₆	20 + 50	2/3	10 / 8	500 Hz / external	60/20/20 85/5/10	CXRS
TCV DNBI (1999)	RF/ARC	20 + 55	2.7 / 3.2	2 / 1.5	External 1:1	60/20/20 85/5/10	CXRS, NPA
W7-X RU01-X (2013)	RF	20 + 60	8.5	10 (2.5 s ON)	external	55/23/22	CXRS
RFX DNBI	ARC	20 + 55	5.5	0.05	external	77/11/12	MSE, BES, CXRS
MST DNBI 2 injectors(2000)	ARC	30/20 H/He	4/4	0.0035	no	90/5/5	MSE, CXRS, RS
MST DINA (2004)	ARC	50	4.5	0.02	no	90/5/5	MSE, CXRS, RS
T-15 DNBI (2016)	ARC	60	6.1	11 (1 s beam on)	from 1:1 to 1:10	85/5/10	CXRS
Alcator C-mod DNBI (2005)	Arc with LaB ₆	20 + 55	8	3 (1.5 s ON)	external	85/5/10	MSE, BES, CXRS

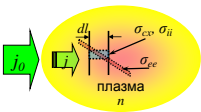
I.V.Shikhovtsev et al. 30th ITPA DTG Meeting 21-24 June 2016, Novosibirsk, Russia

Диагностический инжектор для W7X



Ослабление диагностического пучка в плазме

Ослабление пучка происходит за счет его перезарядки на ионах, а также за счет ионизации электронами и ионами



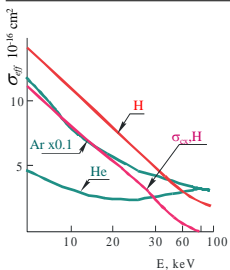
σ_{ee} и σ_{ii} — сечения ионизации атомов пучка электронами и ионами
 $(H^0 + i, e \rightarrow H^+ + i, e + e)$
 σ_{ch} — сечение перезарядки
 $(H^0 + H^+ \rightarrow H^+ + H_0 + \gamma)$

$$dj = -j \cdot n \cdot [(\sigma_{ch} + \sigma_{ii}) \cdot dl + \sigma_{ee} v_e dt] = -j \cdot n \cdot \sigma_{eff} \cdot dl$$

$$\sigma_{eff} = \left(\sigma_{ch} + \sigma_{ii} + \frac{\langle \sigma_{ee} v_e \rangle}{v_b} \right)$$

$$j = j_0 \cdot e^{-\int \sigma_{eff} n dl}$$

Ослабление диагностического пучка в плазме



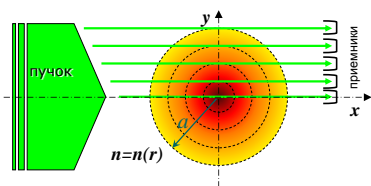
Эффективные сечения ослабления в зависимости от энергии пучка для плазмы с $T_e = T_i = 1 \text{ кэВ}$.

Легкие атомы (H) имеют меньшее по сравнению с тяжелыми (Ar) σ_{eff} и часто более предпочтительны для диагностики внутренних областей плазмы.

Обычно параметры диагностического пучка выбирают так, чтобы

$$\int \sigma_{eff} n dl \leq 1 \div 3$$

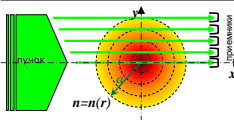
Многохордовое ослабление пучка



Линейная плотность:

$$\langle nl \rangle \equiv \tau(y) = \int_{-\sqrt{a^2-y^2}}^{\sqrt{a^2-y^2}} n(\sqrt{x^2+y^2}) dx = 2 \int_y^a n(r) \frac{r}{\sqrt{r^2-y^2}} dr$$

Многохордовое ослабление пучка



$$\tau(y) = 2 \int_y^a n(r) \frac{r}{\sqrt{r^2-y^2}} dr$$

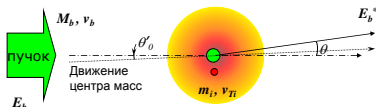
Уравнение Абеля: $n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^a \frac{\tau'(y)}{\sqrt{y^2-r^2}} dy$

Математически некорректно поставленная задача. Единственность и устойчивость решения **не гарантируется**. Необходимо использовать те или иные **методы регуляризации** (краткий обзор будет в последних лекциях)

NB: Для многохордового зондирования плазмы удобно использовать тонкие ленточные или веерные пучки.

Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

В основе метода лежит измерение зависимости энергии атомов пучка, рассеянных на ионах плазмы на малый угол, от температуры ионов плазмы. Считаем, что атом много быстрее иона ($v_b \gg v_{Ti}$)



Скорость центра масс:

$$\bar{U} = \frac{M_b}{M_b + m_i} \bar{v}_b + \frac{m_i}{M_b + m_i} \bar{v}_{Ti} \approx \frac{M_b}{M_b + m_i} v_b \bar{e}_x + \frac{m_i}{M_b + m_i} v_{Ti,y} \bar{e}_y$$

Импульс в системе отсчёта центра масс:

$$\bar{p}' = M_b (\bar{v}_b - \bar{U}) \approx \frac{M_b m_i}{M_b + m_i} (v_b \bar{e}_x - v_{Ti,y} \bar{e}_y) = \mu (v_b \bar{e}_x - v_{Ti,y} \bar{e}_y)$$

Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

После рассеяния:

$$\begin{aligned} \bar{p}'' &= \mu \sqrt{v_{b,x}^2 + v_{Ti,y}^2} (\cos \theta' \bar{e}_x + \sin \theta' \bar{e}_y) \approx \\ &\approx \mu v_b \left(\left(1 - \frac{\theta'^2}{2}\right) \bar{e}_x - \theta' \bar{e}_y \right) \end{aligned}$$

$$\bar{p}' = \bar{p}'' + M_b \bar{U} = \left(p_0 - \frac{\theta'^2}{2} \mu v_b \right) \bar{e}_x + \mu (v_{Ti,y} + v_b \theta') \bar{e}_y$$

$$\theta' \approx \frac{M_b}{\mu} \theta$$

$$E_b^* = \frac{p'^2}{2M_b} \approx E_b - \frac{\mu^2}{M_b m_i} E_b^2 \theta^2 + 2\mu v_{Ti,y} v_b \theta'$$

$$\Delta E_b = E_b - E_b^* \approx E_b \frac{M_b}{m_i} \theta^2 \pm 2 \left| \theta \right| \sqrt{\frac{M_b}{m_i} E_b E_i}$$

Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

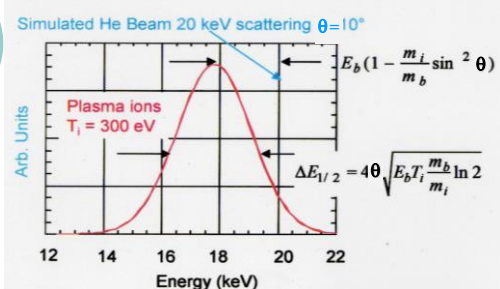
$$\Delta E_b \approx E_b \frac{M_b}{m_i} \theta^2 \pm 2 \left| \theta \right| \sqrt{\frac{M_b}{m_i} E_b E_i}$$

Первое слагаемое не зависит от энергии иона. Второе даёт уширение спектра, зависящее от функции распределения ионов плазмы.

Для максвелловского изотропного распределения ионов ширина спектра рассеянных атомов (по уровню 1/2):

$$\Delta E_b = 4\theta \sqrt{\frac{M_b}{M_p} T E_b \ln 2}$$

Резерфордовское рассеяние быстрых атомов



Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

Поток рассеянных атомов пучка:

$$I = I_0 n_t \sigma_R(E_b, \theta) \Omega e^{-2\sigma_{sc}}$$

Дифференциальное сечение резерфордовского рассеяния (на неподвижном центре):

$$d\sigma_R = \left(\frac{Ze^2}{2E_b}\right)^2 \cdot \frac{d\Omega}{\sin^4 \theta/2}$$

Требования к диагностическому пучку:

$$d\sigma_R \sim \theta^{-4}$$

$$d\sigma_R \sim E_b^{-2}$$



разрешение $l_b \approx a/\theta$

прозрачность, $\lambda \gg d$

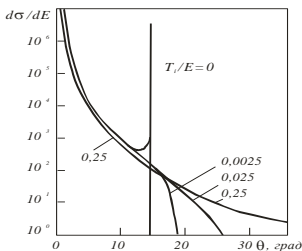
энергетический разброс $\delta E_b < \Delta E_b$,

расходимость пучка $\delta\theta < \theta$

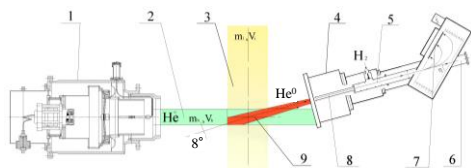
для $T_i \sim 1 \text{ кэВ}$: $\delta E_b < 0,5 \text{ кэВ}$, $\delta\theta < 1^\circ$, $E_b = 20 \text{ кэВ}$, $\theta = 10^\circ$

Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

Дифференциальное сечение рассеяния атомов He на протонах при различных T_i/E_b



Резерфордовское рассеяние быстрых атомов

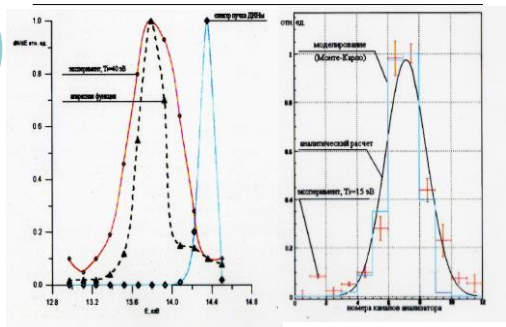


Параметры диагностического комплекса

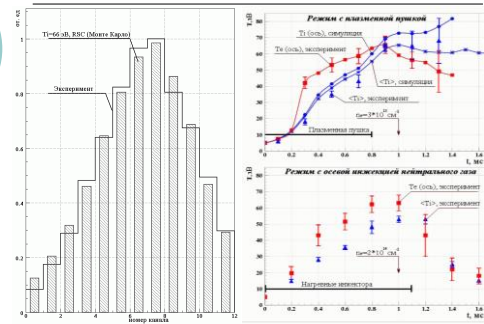
Инжектируемые атомы:	He	Угол инжекции:	8°
Энергия инжекции:	10 кэВ	Угловой разброс пучка:	0.03 рад
Ток пучка:	1 А	Число каналов регистрации:	12
Плотность тока:	20 мА/см ²	Энергетическое разрешение:	20 эВ
Длительность инжекции:	150 мкс	Температурное разрешение:	10 эВ
	Пространственное разрешение:		5x5x10 см ³



Резерфордовское рассеяние быстрых атомов



Резерфордовское рассеяние быстрых атомов





Обзоры по активной корпускулярной диагностике плазмы (на 2013 г.)

- 1) V.V.Afrosimov and A.I.Kislyakov. Proc. of the International school of plasma physics. Varenna, 1982.
- 2) G.V.Roslyakov. Proc. of the International school of plasma physics. Varenna, 1982.
- 3) Р.Дж.Голдстон. Основы физики плазмы. Том 2. М, Энергоатомиздат, 1984.
- 4) В.В.Афросимов, М.П.Петров. Диагностика плазмы. Выпуск 5. М, Энергоатомиздат, 1986.
- 5) А.Н.Зиновьев, В.В.Афросимов. Диагностика плазмы. Выпуск 7. М, Энергоатомиздат, 1990.
- 6) Л.И.Крупник, В.И.Терёшин. Физика плазмы, 1994, т.20, № 2.
- 7) E.Hintz, B.Schweer. Plasma Phys. Control. Fusion, 1995, vol.37.
- 8) В.И.Давыденко, А.А.Иванов, Г.Вайсен. Новосибирск, Издательский центр НГУ, 1999.
