

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 3 Магнитные измерения в плазме

© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

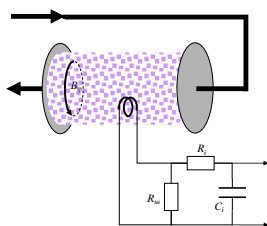
* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ НГУ на 2009–2018 годы

Магнитные зонды

- **Интегральные магнитные измерения**
- Диамагнитный зонд (диамагнитная петля)
- Диамагнитная петля с компенсатором
- Факторы влияющие на измерения
- Пояс Роговского
- **Локальные магнитные измерения**
- Катушки Мирнова
- Применение магнитных зондов для измерений характеристик колебаний в плазме

2

Простейшая схема магнитного измерения



- Чувствительность:

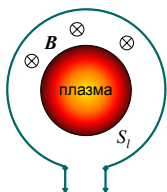
$$U_{\text{инт}} = NS \frac{dB}{dt}$$

- Частота сигнала:

$$1/f_{\text{max}} \cong \tau = \frac{L}{R_w}$$

3

Диамagnetная петля (Diamagnetic loop)



Пусть плазма находится в вращающемся магнитном поле (продольное в открытой ловушке и тороидальное в замкнутой). Плазма — диамагнетик, поле вытесняется наружу

$$B = B_{vac} + \delta B$$

$$\delta B \ll B_{vac}$$

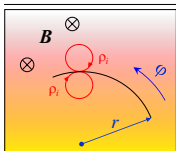
$$B_{vac} = const$$

$$U_{loop} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -S_l \frac{d}{dt} \langle \delta B \rangle_{S_l} [CH]$$

$$\langle \delta B \rangle_{S_l} = -\frac{1}{S_l} \int U_{loop}(t) dt$$

4

Диамagnetная петля



Найдём изменение поля δB (для удобства в СГС):

$$j_\phi(r) = ev_\perp [f(r + \rho_\perp)] - ev_\perp [f(r - \rho_\perp)] =$$

$$= 2e \frac{\partial f}{\partial r} \rho_\perp v_\perp = 2e \frac{\partial f}{\partial r} \frac{mc v_\perp^2}{\hbar B} =$$

$$= \frac{2c}{B} \frac{\partial}{\partial r} (fmv_\perp^2)$$

После интегрирования по скоростям

(выражаем $\rho_\perp = \rho_0 F(r, z)$):

$$j_\phi(r) = \frac{2c}{B} \frac{\partial p_\perp}{\partial r} = \frac{2c p_0}{B} \frac{\partial F}{\partial r}$$

5

Диамagnetная петля

$$\delta B_z = \frac{2\pi}{c} \int_z \int_r \frac{j_\phi}{r^2 + z^2} r dr dz = \frac{2\pi}{c} \frac{2c p_0}{B} \int_{r,z} \frac{\partial F(r, z)}{\partial r} \frac{r dr dz}{r^2 + z^2} = A$$

Геометрический фактор

$$\frac{\delta B}{B} = \frac{4\pi p_0}{B^2} A = \frac{1}{2} \beta A$$

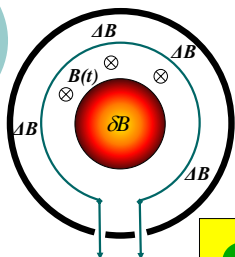
$$\beta = \frac{p}{B^2 / 8\pi}$$

$$U_{loop} = -\frac{AS_l}{2} \frac{\partial}{\partial t} (B \langle \beta \rangle_{S_l})$$

Если учесть электроны, то $p_0 = p_{oi} + p_{oe}$

6

Факторы, усложняющие измерения

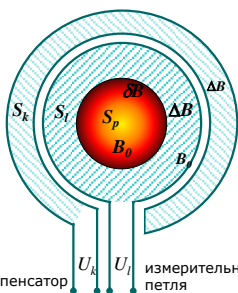


- Часто в плазме $\beta \ll 1$
- Магнитное поле импульсное $B=B(t)$
- Влияние стенок вакуумной камеры
- ВЧ колебания плазмы

Как компенсировать $\frac{\partial B_{vac}}{\partial t}$ и избежать влияния ΔB ?

7

Диамагнитная петля с компенсатором



$$\Phi_l = N(S_l - S_p)(B_0 + \Delta B) + S_p(B_0 + \Delta B - \delta B)$$

$$\Phi_k = N_k S_k (B_0 + \Delta B)$$

Выполним условие: $N_k S_k = NS_l$

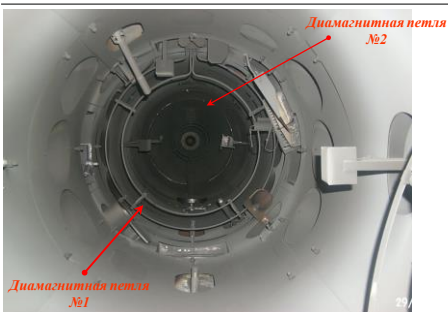
$$\Phi_l - \Phi_k = NS_p \delta B$$

$$\delta B = \frac{c}{NS_p} \int (U_l - U_k) dt$$

компенсатор U_k U_l измерительная петля

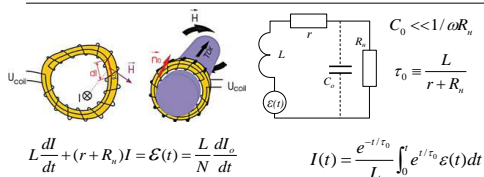
8

Диамагнитная петля с компенсатором: ГДЛ



9

Пояс Роговского (Rogowski coil)



I: $\tau \ll \tau_0$

$$L \frac{dI}{dt} + (r + R_n)I = \mathcal{E}(t) = \frac{L}{N} \frac{dI_0}{dt}$$

$$I(t) \approx \frac{1}{L} \int_0^t \mathcal{E}(t) dt = \frac{I_0(t)}{N}$$

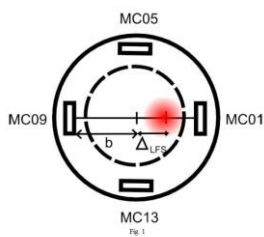
$$U_{\text{out}}(t) = R_n I(t) = \frac{R_n}{N} I_0(t)$$

II: $\tau \gg \tau_0$

$$I(t) \approx \frac{\mathcal{E}(t)}{r + R_n} = \frac{\tau_0}{N} \frac{dI_0}{dt}$$

$$U_{\text{out}}(t) = R_n I(t) = \frac{L}{N} \frac{R_n}{r + R_n} \frac{dI_0}{dt}$$

Катушки Мирнова (Mirnov coils)



Токонесущая плазма
 Смещение центра тока приводит к изменению магнитного потока в катушках:

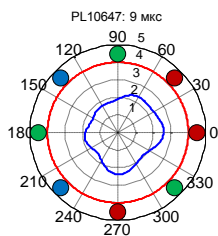
$$B_i \sim \frac{I}{r_i}$$

$$\delta B_i \sim \frac{I}{r_i^2} \delta r_i$$

Location of Mirnov coils with unperturbed plasma column represented by red, fading circle. Limiter is represented by dashed, circular line.

11

Катушки Мирнова (Mirnov coils)



Массив из нескольких зондов позволяет диагностировать изменения формы тока (методы обработки — в последних лекциях)

- Синий — поле понизилось
- Красный — поле возросло
- Зелёный — поле неизменно

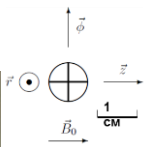
12

Применение магнитных зондов для исследования колебаний в плазме

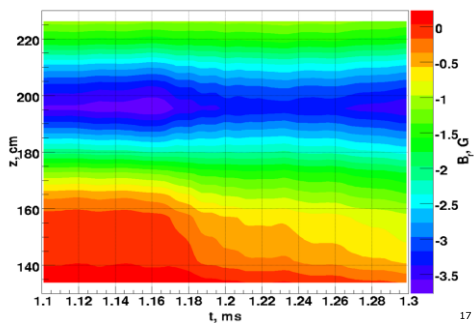
ВЧ магнитный зонд ГДЛ

Зонд состоит из 3-х витков, измеряющих производные 3-х компонент поля:

$$\frac{\partial B_x}{\partial t}, \frac{\partial B_y}{\partial t}, \frac{\partial B_z}{\partial t}$$

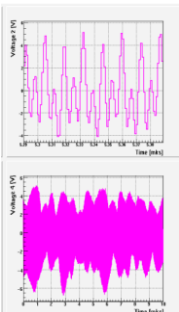


Применение магнитных зондов для исследования колебаний в плазме (ГДЛ)

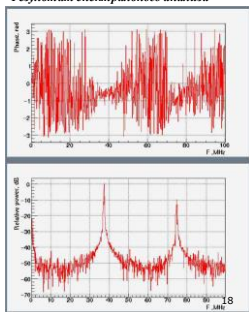


Применение магнитных зондов для исследования колебаний в плазме

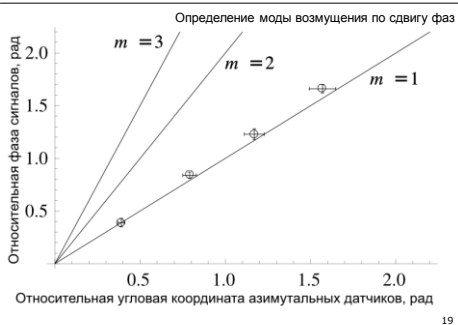
«Свой» сигнал зонда



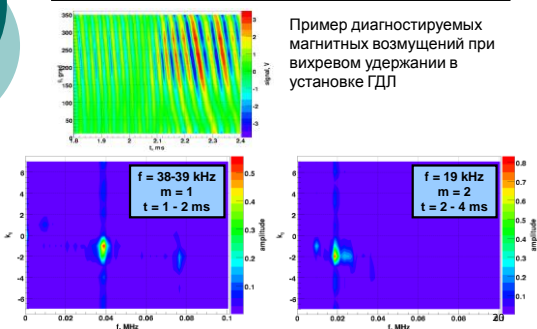
Результат спектрального анализа



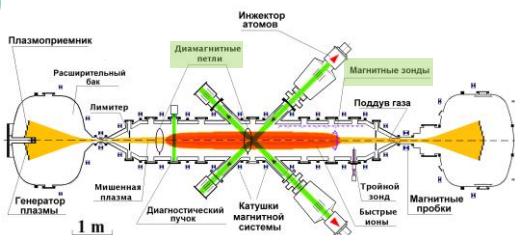
Применение магнитных зондов для исследования колебаний в плазме



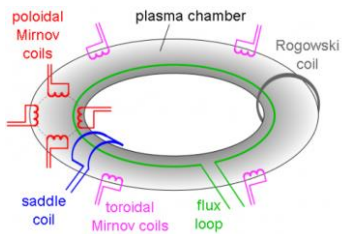
Применение магнитных зондов для исследования колебаний в плазме



Пример: магнитные диагностики, используемые на установке ГДЛ



Пример: магнитные диагностики, используемые на установке GOLEM



S. Zurek, *Encyclopedia Magnetica*, CC-BY-3.0.

22

Пример: магнитные диагностики, планируемые для установке ITER

Measurement	Number	Rotational & Risk
axial inductive probe: equilibrium reconstruction, real-time control	120 Mirnov, 2 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial flux loops for equilibrium reconstruction and real-time control	4 full loops (in 2 sectors)	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial probe in the divertor region	120 saddle loops	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial probe in the divertor region	30 Rogowski, 15 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial sensor for high-frequency MHD	120 Rogowski, 120 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial flux loops for low-frequency MHD	72 saddle loops	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
diagnostic flux for steady state	24 loops	current standard method, calibration, compensation for plasma rotation, 1D effects, 1D noise
Rogowski coils for high-current measurements	160 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial inductive probe: equilibrium reconstruction (real-time control)	180 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial inductive probe: real-time control	60 Rogowski	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial flux loops for equilibrium reconstruction	4 full loops	current standard method, long-term failure, 1D effects, 1D noise
Rogowski coils inside TF and inside	9 coils fitted	current standard, same location, long-term failure, 1D effects, 1D noise
axial sensor using Faraday rotation method	4 sensors in 2 sectors	new method, same location, long-term failure, 1D effects, 1D noise

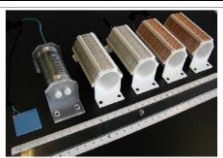
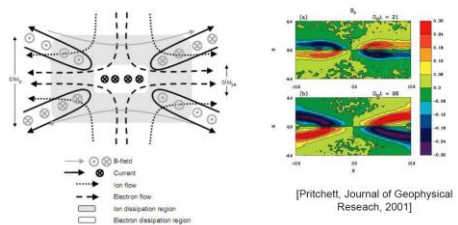


Figure 2. Some of the high-frequency sensors being proposed for ITER. LFC and LFC-2 are non-ferromagnetic sensors, conventional Mirnov-type coils wound in tungsten and copper (two off each with different geometry).

D. Testa et al. The magnetic diagnostic set for ITER

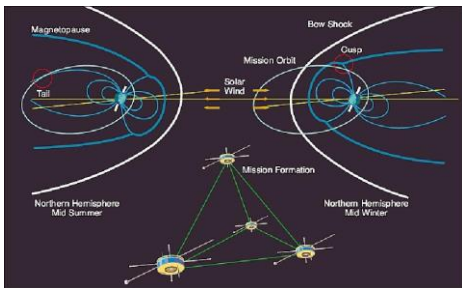
23

Пример: магнитные поля в токовом слое при пересоединении



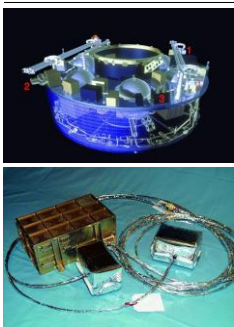
[Pritchett, Journal of Geophysical Research, 2001]

Пример: магнитная диагностика спутников CLUSTER



25

Пример: магнитная диагностика спутников CLUSTER

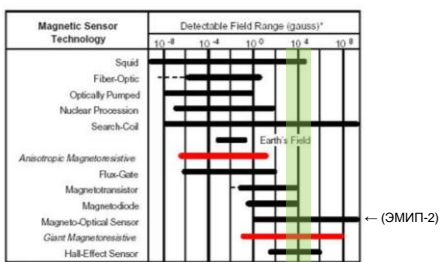


(1)
 Located on a five metre long boom to avoid interference from the spacecraft, two fluxgate magnetometers (два феррозонда) measure the magnetic fields along the orbit. FGM can take high resolution measurements with up to 67 samples per second.

Date: 03 November 1998
 Satellite: Cluster
 Depicts: FGM Instrument
 Copyright: ESA

26

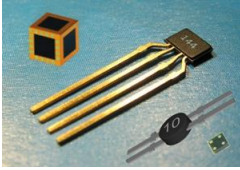
Технологии магнитных зондов



<http://slideplayer.com/slide/5070113/> EE698A Advanced Electron Devices

27

Холловские датчики



Пример одно-, двух- и трёхкомпонентных холловских датчиков фирмы Hoeben (без усилителей).

Основная проблема применения распространённых промышленных холловских датчиков в плазменном эксперименте — встроенные предусилители. Схема оптимизируется для измерения малых магнитных полей и низких частот.

28
