

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 3 Приёмники потоков частиц и излучения

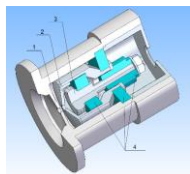
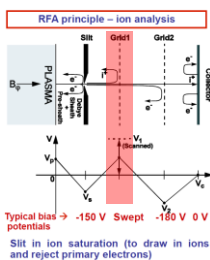
© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

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

Приемники потоков частиц и излучения.

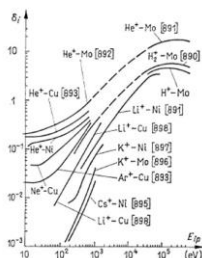
- Регистраторы потоков заряженных частиц:
 - Сеточный детектор;
 - Цилиндр Фарадея.
- Регистраторы потоков энергии:
 - Калориметры
 - Болометры.
 - Пирозлектрические приемники.
- Вторично-эмиссионные датчики
- Вторично-электронные умножители (ВЭУ).
- Канальный электронный умножитель (КЭУ).
- Микроканальные пластины (МКП).

Сеточный детектор (grid energy analyser) (вариация на тему Retarding Field Analyser)



Датчик потока ионов:
1 – входной электрод,
2 – вытягивающий электрод,
3 – коллектор,
4 – изоляторы.

Регистраторы потоков заряженных частиц



Akira Takagi. Ion sources // <http://slideplayer.com/slide/4452593/>

Существенная проблема – *вторичная электронная эмиссия* с поверхности детектора. При ионной бомбардировке электроны эмитируются, если полная энергия иона превышает удвоенную работу выхода:

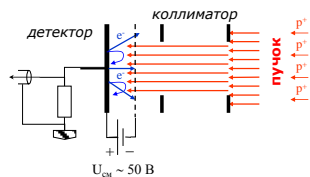
$$e\Delta\phi + \frac{mV^2}{2} > 2A_{\text{вст}}$$

Член $\Delta\phi$ отвечает за **разницу между** нижним свободным **уровнем атома/иона** и **уровнем Ферми** стенки. Характерная величина коэффициента потенциальной эмиссии ~ 0.2 , кинетической может составлять 2-3 (для металлов) и выше.

Регистраторы потоков заряженных частиц

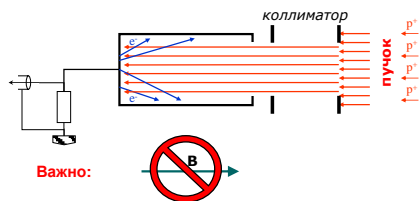
Способы решения:

1. Электрическое смещение:



Регистраторы потоков заряженных частиц

2. Цилиндр Фарадея:



Сеточный анализатор на установке C2U

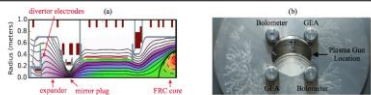


FIGURE 1: (Color online). (a) Magnetic field surface contour lines and plasma density (color) in C-2U calculated by a 2-D magnetohydrodynamic numerical simulation[7]. (b) Photograph of the ELA mounted on the divertor electrode after operation.

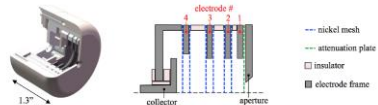
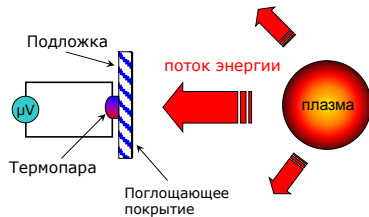


FIGURE 2: (Color online). The energy analyzer consists of a series of mesh electrodes in front of a current collector.

M. E. Griswold et al. End loss analyzer system for measurements of plasma flux at the C-2U divertor electrode // Review of Scientific Instruments 87, 11D428 (2016)

Регистраторы потоков энергии

1. Простейший калориметр:



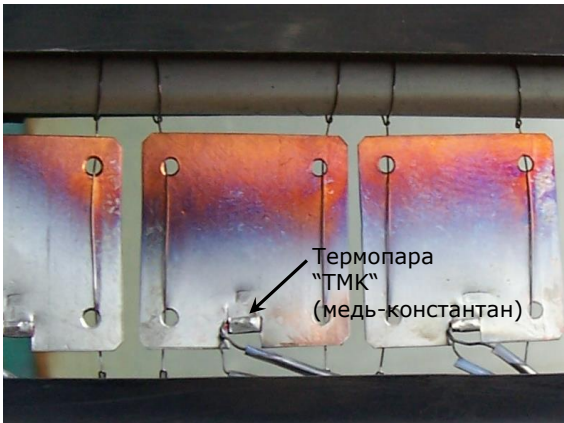
$Q = c \cdot M \cdot \Delta T / S$ – поток тепла на единицу поверхности.

Характеристики различных термопар

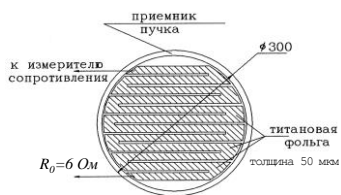
Тип термопары	Буквенное обозначение НСХ*	Материал термоэлектродов		Коэффициент термоЭДС, мкВ/°С (в диапазоне температур, °С)	Диапазон рабочих температур, °С	Пределная температура при кратковременном нагревании, °С
		положительного	отрицательного			
ТЖК	J	Железо (Fe)	Сплав константан (45% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	50-64 (0-800)	от -200 до +750	900
ТХА	K	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	35-42 (0-1300)	от -200 до +1200	1300
ТНК	T	Медь (Cu)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	40-60 (0-400)	от -200 до +350	400
ТХН	E	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	59-81 (0-600)	от -200 до +700	900
ТХЛ	L	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав копель (56% Cu + 44% Ni)	64-88 (0-600)	от -200 до +600	800
ТНН	N	Сплав никросил (83,49% Ni + 13,7% Cr + 1,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,01% Mg)	Сплав нисил (94,98% Ni + 0,02% Cr + 4,2% Si + 0,15% Fe + 0,05% C + 0,05% Mg)	26-36 (0-1300)	от -270 до +1300	1300
ТПТ13	R	Сплав платино-родий (87% Pt + 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТПТ10	S	Сплав платино-родий (87% Pt + 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300	1600
ТТР	B	Сплав платино-родий (70% Pt - 30% Rh)	Сплав платино-родий (94% Pt - 6% Rh)	10-14 (1000-1800)	от 600 до +1700	1800
ТВР	A-1 A-2 A-3	Сплав вольфрам-рений (95% W - 5% Re)	Сплав вольфрам-рений (80% W - 20% Re)	14-7 (1300-2500)	от 0 до +2200 от 0 до +1800 от 0 до +1800	2500
ТСС	I	Сплав силд	Сплав силд	-	от 0 до +800	900

Примечание: НСХ – номинальные статистические характеристики преобразования по международной классификации ТСС





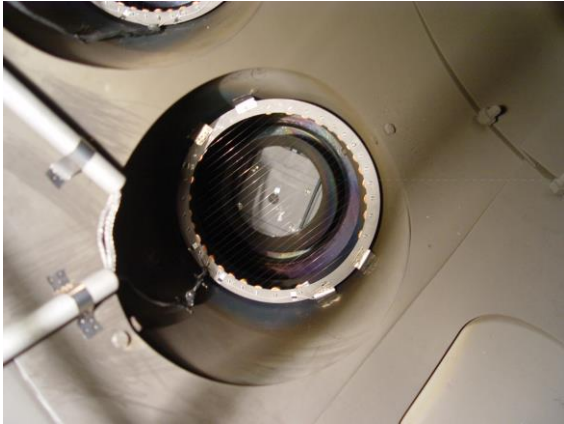
Терморезистивные болометры

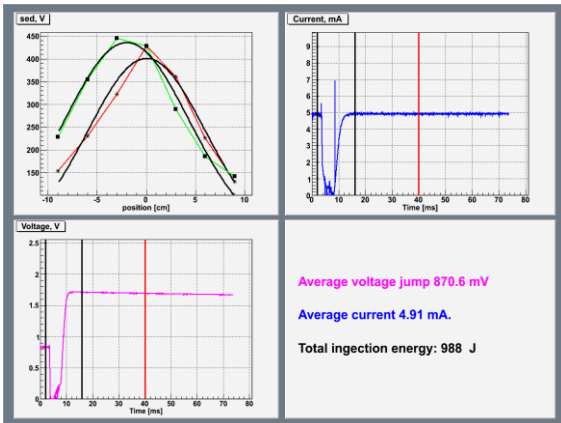


$$W = \beta \Delta R$$

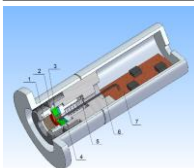
$$\beta = \frac{mc}{R_0 \alpha} \approx 500 \frac{\text{Дж}}{\text{Ом}}$$

c — удельная теплоемкость
 m — масса
 R_0 — полное сопротивление
 α — температурный коэффициент сопротивления

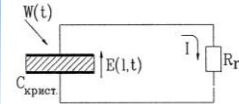




3. Пирозлектрический детектор



Эквивалентная схема:



- 1 – экранирующие сетки,
- 2 – пирозлектрическая керамика,
- 3 – капролоновый держатель,
- 4 – вакуумная резина,
- 5 – пружина,
- 6 – проводник,
- 7 – плата усилителя

Чувствительность пиродетектора

R_r	–	сопротивление нагрузки
C_{α}	–	электроёмкость кристалла
S	–	площадь поверхности кристалла
d	–	толщина кристалла
W	–	плотность падающей мощности
c	–	удельная теплоёмкость кристалла
ϵ	–	диэлектрическая проницаемость
σ	–	поверхностная плотность зарядов

Пироэлектрический коэффициент:

$$\gamma = \frac{dP}{dT} = \text{const} \quad \text{в широком диапазоне } T$$

Считаем переток тепла вдоль поверхности пренебрежимо малым. Задача становится одномерной.

Чувствительность пиродетектора

Поле D в плоском конденсаторе:

$$E(l, t) + 4\pi P(l, t) = 4\pi\sigma(t) \quad (1)$$

ЭДС кристалла и падение напряжения на нагрузке:

$$\int E(l, t) dl = IR_r \equiv U_r$$

Сила тока в цепи:

$$-S \frac{d\sigma}{dt} = I$$

Проинтегрируем (1) вдоль оси кристалла:

$$U_r(t) + 4\pi \int P(l, t) dl = -4\pi\sigma(t)d \quad (2)$$

Чувствительность пиродетектора

$$\frac{d}{dt}(2): \quad \frac{dU_r}{dt} + 4\pi \int \frac{dP}{dt} dl = \frac{4\pi d}{S} \frac{dU_r}{dt}$$

Интеграл поляризации пропорционален плотности падающей мощности:

$$\int \frac{dP}{dt} dl = \int \frac{dP}{dT} \frac{dT}{dt}(l, t) dl = \gamma \int \frac{dT}{dt}(l, t) dl =$$

$$= \frac{\gamma}{\rho c} \int \frac{dQ(l, t)}{dV dt} dl = \frac{\gamma}{\rho c} W(t)$$

$$\frac{dU_r}{dt} + 4\pi \frac{\gamma}{\rho c} W(t) = 4\pi \frac{d}{S} \frac{dU_r}{dt}$$

$$\frac{\gamma}{\rho c} \frac{S}{d} R_r W(t) = U_r - R_r \frac{S}{4\pi d} \frac{dU_r}{dt} = U_r - \frac{R_r C_{\alpha}}{\epsilon} \frac{dU_r}{dt}$$

Чувствительность пиродетектора

$$\frac{\gamma}{\rho c d} R_r W(t) = U_r - R_r \frac{S}{4\pi d} \frac{dU_r}{dt} = U_r - \frac{R_r C_{cr}}{\varepsilon} \frac{dU_r}{dt}$$

Выберем $R_r C_{cr} \ll \tau_{мин}$

Тогда чувствительность пиродетектора

$$U_r \approx \frac{\gamma}{\rho c d} R_r W(t)$$

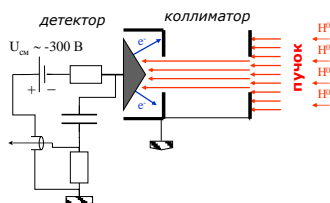
$$W(t) = \frac{\rho c d}{\gamma R_r} I(t)$$

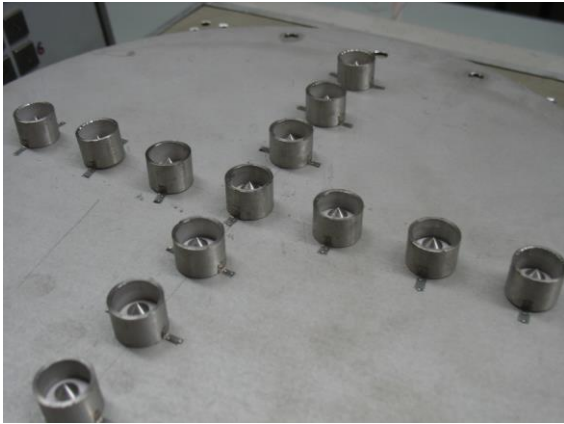
Пироэлектрические кристаллы. Ниобат и танталат лития

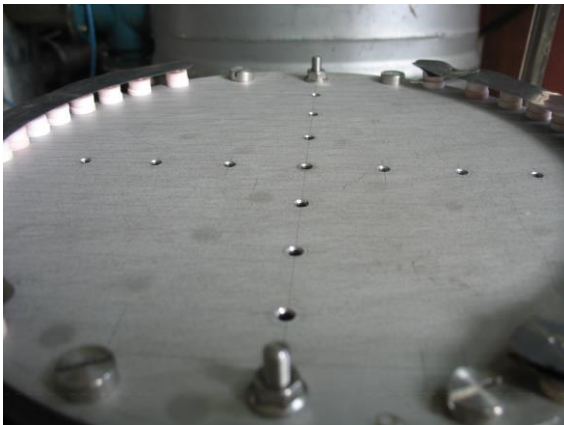
	LiNbO ₃	LiTaO ₃
γ , $\frac{\text{Кл}}{\text{°C} \times \text{м}^2}$	-8.3×10^{-5}	-2.3×10^{-4}
c , $\frac{\text{дж}}{\text{°C} \times \text{кг}}$	630	250
ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	4650	7450
$\frac{\gamma}{\rho c}$, $\frac{\text{пА} \times \text{м}}{\text{Вт}}$	28	123
Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{°C} \times \text{см}}$	4.2×10^{-2}	1.25×10^{-3}
Пьезоэлектрическая постоянная e_{33} , $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$	1.33	1.09
Диэлектрическая проницаемость ε_{33}	29	45

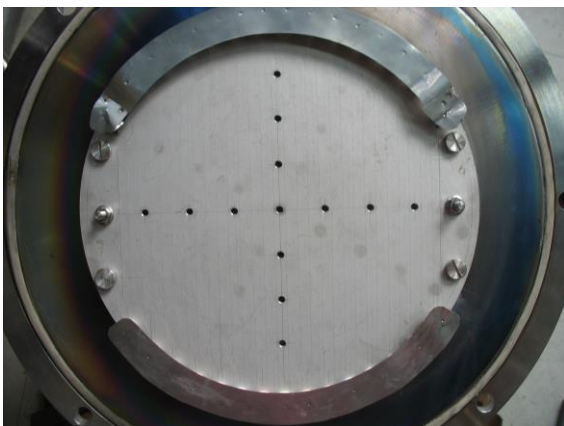
Регистраторы потоков нейтральных атомов

Вторично-эмиссионный датчик:

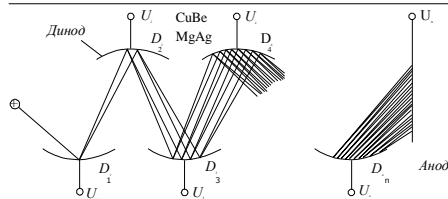








Вторично-электронный умножитель (ВЭУ, electron multiplier)

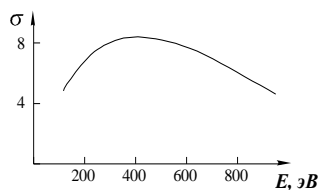


Коэффициент усиления ВЭУ $K = \xi_1 \xi_2 \xi_3 \dots \xi_n$.

Полное число динодов в различных вариантах ВЭУ составляет 10 - 25, что обеспечивает коэффициент усиления $\sim 3 \cdot 10^4 - 10^5$.

Временное разрешение ВЭУ определяется временем пролета электронов через умножитель и равно ~ 10 нс.

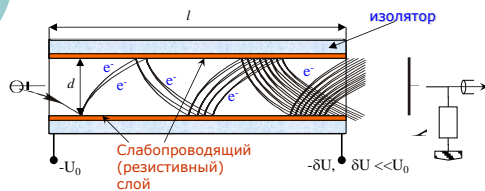
Коэффициент вторичной эмиссии при бомбардировке электронами (MgO)



Коэффициент вторичной электронной эмиссии зависит от угла падения. При скользящих углах падения коэффициент эмиссии возрастает в несколько раз, что используется в конструкции ВЭУ.

Канальный электронный умножитель (КЭУ, continuous electron multiplier)

Умножение электронных лавин можно обеспечить и в системах, где отсутствуют дискретные диноды. Такие системы называются канальными электронными умножителями (КЭУ).



Внутри канала возникает продольное электрическое поле $E = U_0/l$

Коэффициент усиления (упрощённая модель)

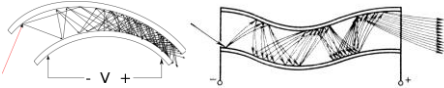
- Будем предполагать, что все вторичные электроны вылетают нормально к поверхности с одинаковой энергией eU_n
- Время пролета от стенки до стенки $\tau \approx d/V_n$
- Продольное движение равноускоренное, $a = eEm$
- «Длина свободного пробега» электрона вдоль трубки составляет: $\lambda \approx at^2/2 \approx d^2 U_0/4U_n$
- Энергия электрона при ударе со стенкой $U_{\text{уд}} \approx \lambda U_0/L$
- Энергия вторичных электронов связана с энергией падающего электрона и, следовательно, коэффициентом умножения $\sigma \sim A U_{\text{уд}}^{\alpha}$.
- Число степеней умножения $N \approx L/\lambda$.

$$K \approx \left[A \left(\frac{\alpha U_0}{2U_n^{1/2}} \right) \right]^{L/d}$$

Канальный электронный умножитель (КЭУ)

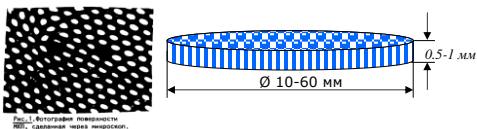
Усиление КЭУ определяется только калибром канала $\alpha = d/l$. Коэффициент усиления достигает максимума при некотором U_0 из-за энергетической зависимости $\sigma(E)$.

При достижении $K \geq 10^4 \cdot 10^5$ даже при вакууме 10^{-4} Па в канальном умножителе наблюдается значительная ионная обратная связь из-за обратных ионных лавин. Подавление ионной связи обеспечивается изогнутостью канала.



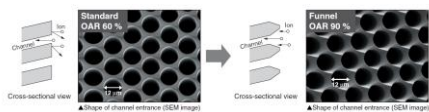
Стандартный канальный умножитель КЭУ-6 имеет $l/d - 50 - 100$, коэффициент усиления $K - 10^7 - 10^8$, собственный фон на уровне одного импульса в секунду.

Микроканальные пластины (МКП)



диаметр каналов	~ 10 - 20 мкм;
расстояние между каналами	~ 20 - 60 мкм;
коэффициент вторичной эмиссии:	$1 < \sigma < 2.5$;
напряжении на пластине	~ 0,8 - 1 кВ;
коэффициент усиления, К	~ $10^4 - 10^5$;
время усиления первичного сигнала:	1 нс;
фронт нарастания:	100-200 нс.

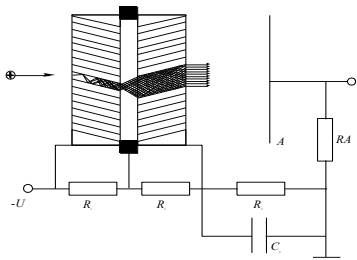
Микроканальные пластины



Каталог Hamamatsu Photonics

Многоступенчатые микроканальные пластины

Сборка из двух и более пластин («шеvron») позволяет достигать коэффициента усиления $K \sim 10^8$



«Мёртвое» время канала

Оценим время нечувствительности отдельного канала после каждого импульса. Электрические параметры пластины (ГОИ-Т30):

$$C = 25 \times 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$R = 3 \times 10^8 \text{ Ом}$$

$$N = 5 \times 10^6$$

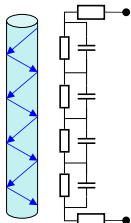
$$\tau_{in} \sim R_i C_i \approx 0.04 \text{ с}$$

Для отдельного канала

$$C_c = 2.5 \times 10^{-17} \text{ Ф}$$

$$R_c \approx 1.5 \times 10^{15} \text{ Ом}$$

$$\tau_{in} \sim R_c C_c \approx 0.04 \text{ с}$$



Темновой ток

$$I \sim 1 \text{ имп./}(\text{см}^2 \times \text{с}) \text{ при } K \sim 10^7$$
