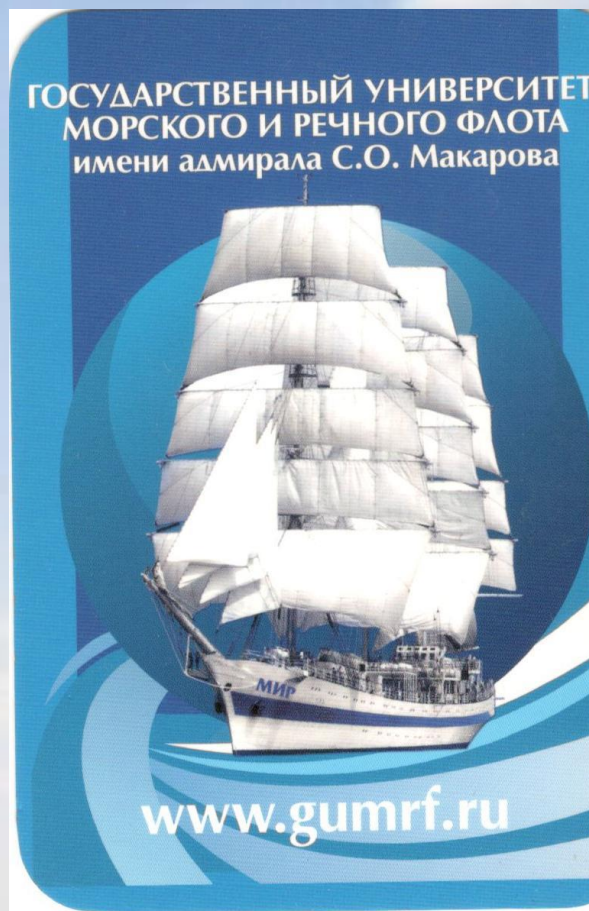


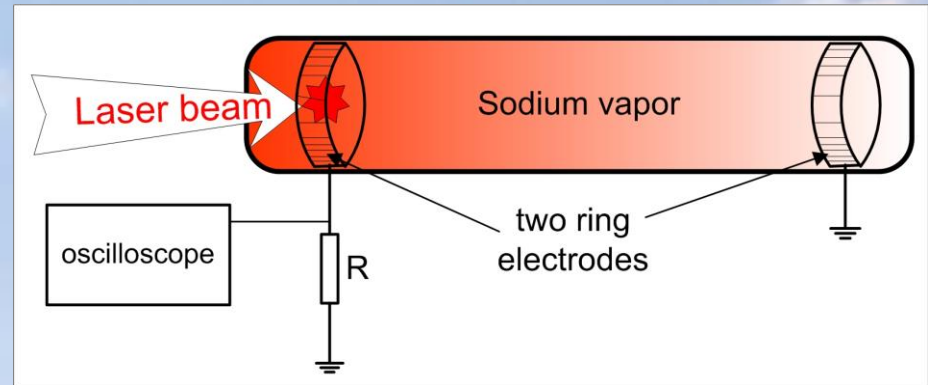
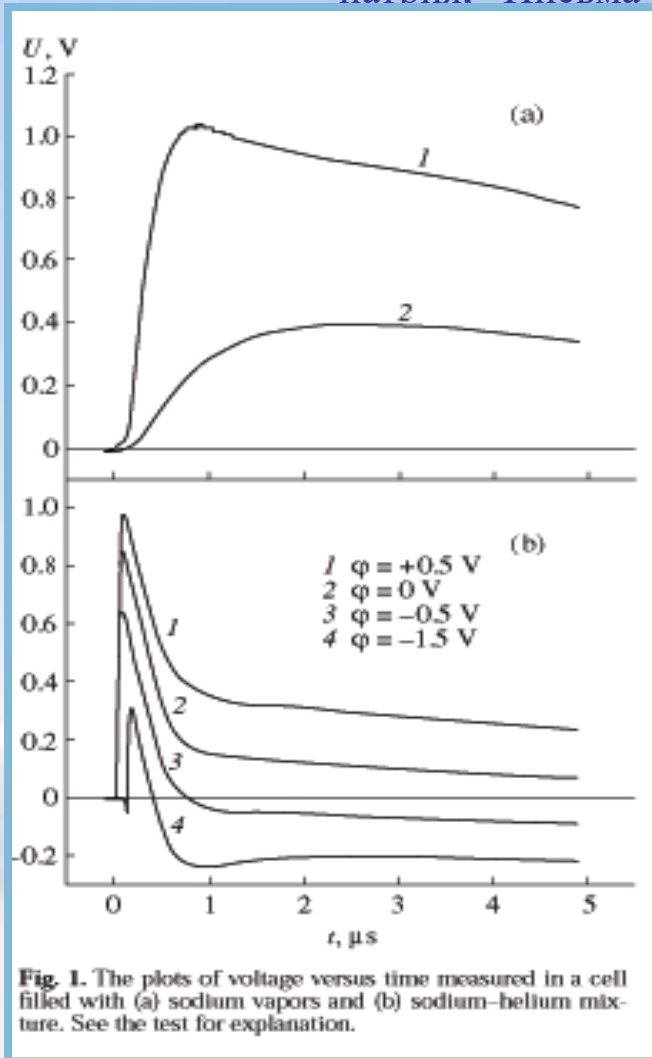
# Моделирование плазменного фотоэлектрического преобразователя сфокусированного солнечного излучения

Горбунов Николай



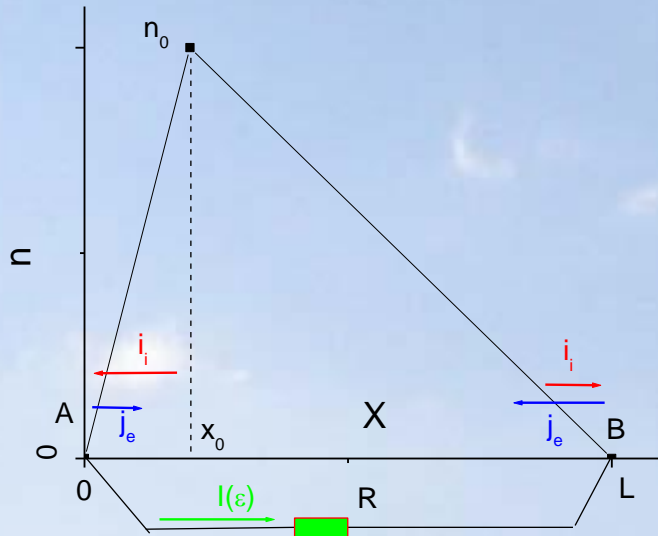
# Первое экспериментальное наблюдение

Н.А. Горбунов и Т. Stacewicz, “Наблюдение фотоЭДС при резонансном возбуждении паров натрия.” Письма в ЖТФ., Т. 26, №. 15, стр. 21–26, 2000.



- The initial experimental studies of photo-EMF in plasma were performed in a glass cell filled with sodium vapors. The resonance pulsed laser radiation was used to produce photoplasma. **The maximum value of a photo-induced voltage was 4 Volts.** This value was almost one order of magnitude higher than in semiconductor devices. The intensified values of EMF resulted from **high values of the electron temperature**, which were detected in the photoplasma by the probe technique.

# Аналитическая модель для расчета вольт-амперной характеристики плазменного фотопреобразователя. Gorbonov, Flamant ЖТФ 2004



- Рассмотрим ионизацию под действием концентрированного излучения. Это позволяет представить источник ионизации в виде дельта-функции  $I \cdot \delta(x - x_0)$ , где  $I$  – скорость ионизации. В отсутствие рекомбинации заряженных частиц в объеме диффузионное уравнение для плотности заряженных частиц в плазме ( $n$ ) имеет вид:
- здесь  $Da$  – коэффициент амбиполярной диффузии. В случае равновесных распределений по энергиям электронов и ионов  $Da = Di(1 + Te/Ti)$ , где  $Di$  – коэффициент диффузии ионов,  $Te$  и  $Ti$  температуры электронов и ионов соответственно.

## Диффузионное уравнение

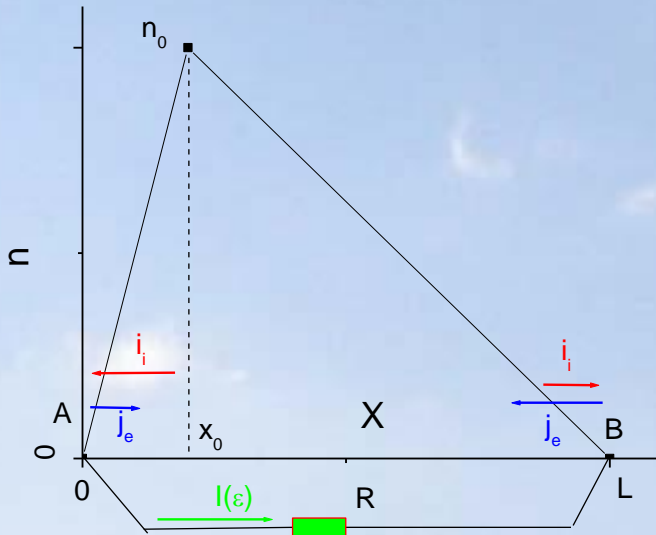
$$D_a \frac{d^2 n}{dx^2} = I \cdot \delta(x - x_0) \quad \text{Граничные условия}$$

$$n(0) = n(L) = 0$$

$$n(x) = \frac{n_0}{x_0} x \quad \text{При } 0 \leq x \leq x_0$$

$$n(x) = \frac{n_0}{L - x_0} (L - x) \quad \text{При } x_0 \leq x \leq L$$

# Аналитическая модель для расчета вольт-амперной характеристики оптического разряда.



Законы Кирхгофа для электрической цепи запишутся в следующем виде:

Здесь  $I(\varepsilon)$  – величина тока во внешней цепи,  $\varepsilon$  – разность потенциалов между двумя электродами,  $j_A, j_B$  – плотности токов электронов на электроды А и В соответственно,  $i_A, i_B$  – плотности токов положительных ионов.

Если цепь, замыкающая электроды А и В, представляет собой просто сопротивление  $R$ , то  $I = \varepsilon / R$ .

$$I(\varepsilon) = i_A - j_A$$

$$-I(\varepsilon) = -i_B + j_B$$

$$\varepsilon(I) = \phi_A + \varphi_A - \phi_B - \varphi_B$$

$$j(e\varphi) = \frac{n_g e \bar{v}}{4} \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT_e}\right)$$

- Для стационарных условий концентрация заряженных частиц  $n_0$  в точке  $x_0$  задается соотношением
- $n_0 = I(x-L)x / D_a L$ . В приповерхностных слоях происходит образование скачков приповерхностного потенциала  $\phi_A$  и  $\phi_B$ . Амбиполярное падение потенциала  $\phi$  в квазинейтральной плазме определяется выражением:

$$\phi = T_e \int \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} dx$$

- Отсюда для получаем  $\phi_A = T_e \ln(n_0 / n_{gA})$  и
- для  $\phi_B = T_e \ln(n_0 / n_{gB})$ .
- Ток ионов определяется скоростью амбиполярного потока  $i = -D_a \cdot dn/dx$ . Отсюда находим  $i_A = D_a n_0 / x_0$  и  $i_B = D_a n_0 / (L - x_0)$ . Плотность потока электронов на стенку определим в приближении бесстолкновительного слоя, поскольку длина свободного пробега электрона, как правило, значительно превосходит  $\lambda_i$ .
- При максвелловском распределении электронов этот поток выражается через известную формулу Ленгмюра: где  $n_g$  – концентрация заряженных частиц на границе слоя,  $\bar{v}$  – средняя тепловая скорость электронов.



# Общий вид ВАХ плазменного фото-преобразователя

$$\Phi = T_e \ln \left( \frac{L - x_0}{x_0} \right)$$

$$\varepsilon = T_e \ln \left[ \frac{\frac{D_a n_0}{x_0} + I}{\frac{D_a n_0}{L - x_0} - I} \right]$$

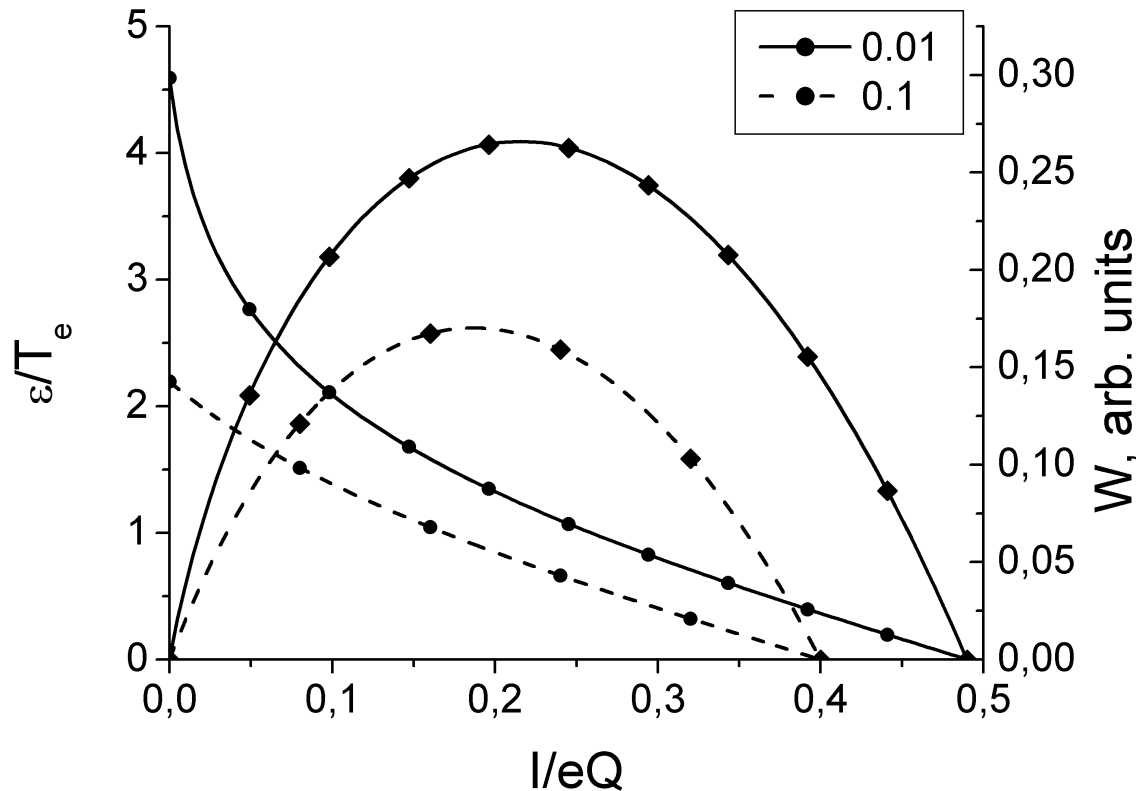
- $\Phi$  - фотоЭДС в режиме разомкнутой внешней цепи ( $I(\varepsilon)=0$ ) определяется амбиполярной разностью потенциалов, а пристеночные скачки потенциалов равны между собой ( $\varphi_A=\varphi_B$ )

## Основные выводы:

- Если электроды расположены симметрично относительно зоны ионизации  $x_0=L/2$ , то  $\Phi=0$ ,  $i_A=i_B$ , а следовательно  $\varepsilon=0$ . **Таким образом, асимметричное расположение электродов относительно зоны ионизации ведет к возникновению фотоЭДС в плазме.**
- Относительно высокие значения фотоЭДС по сравнению с полупроводниковыми преобразователями являются следствием высоких  $T_e$ , реализующихся в фотоплазме.
- Максимально возможный ток, который можно реализовать в режиме короткого замыкания  $\varepsilon=0$ , определяется диффузией положительных ионов (не основных носителей тока) и геометрическими размерами преобразующего элемента

$$I_{\max} = Q(L - 2x_0) / 2L$$

Графики фото-ЭДС (●) и выходной мощности (◆) в зависимости от выходного тока при различных положениях источника ионизации ( $x_0/L=0.01; 0.1$ ).

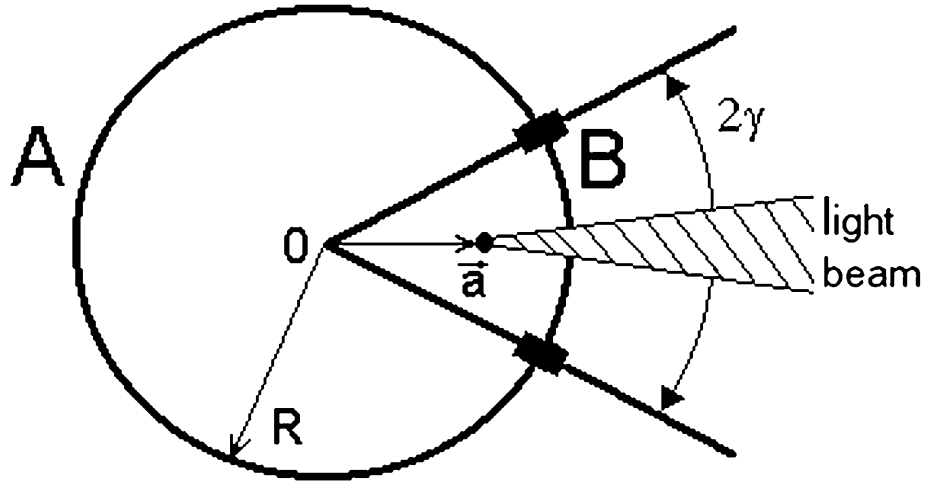


при  $x_0 \ll L$  получим

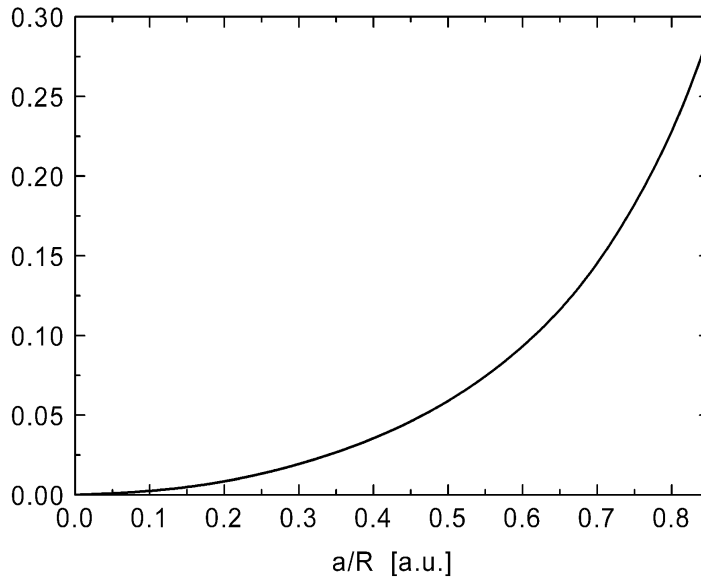
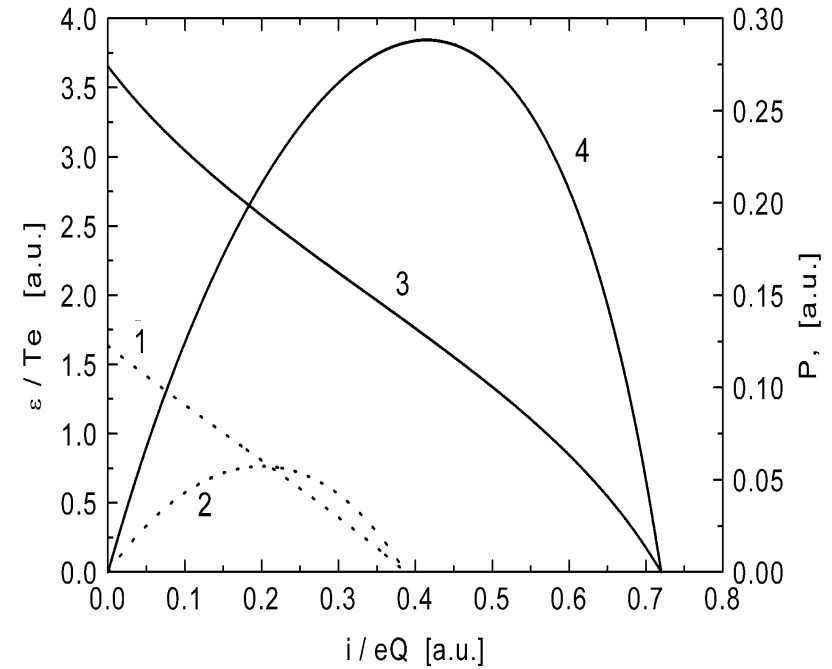
$$\text{КПД} \quad \eta = \frac{P_{opt}}{J} = \frac{1}{4} \frac{L - 2x_0}{L} \frac{T_e}{\Delta E_{0i}} \ln \left( \frac{3L - 2x_0}{L + 2x_0} \right)$$

$$\eta = \frac{P_{opt}}{J} = \frac{1}{4} \frac{T_e}{\Delta E_{0i}} \ln 3 < 2\%$$

# 2D-диффузионная модель



Gorbunov, Flamant IEEE 2005



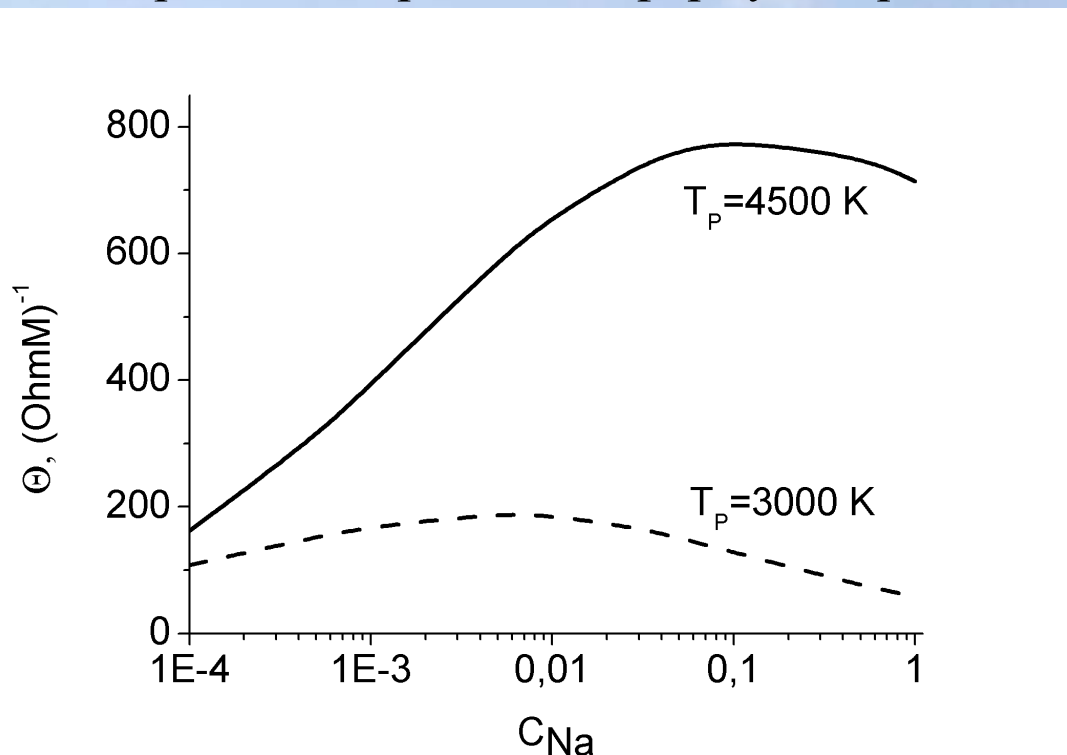
КПД

$$\varepsilon(i) = \frac{kT_e}{e} \left( \frac{I_B - i S_A}{I_A + i S_B} \right)$$

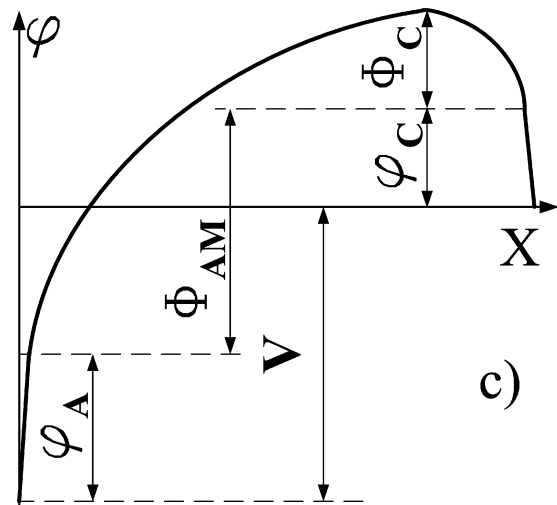
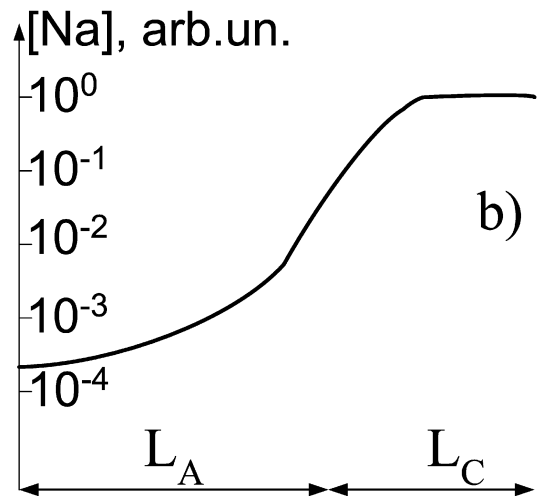
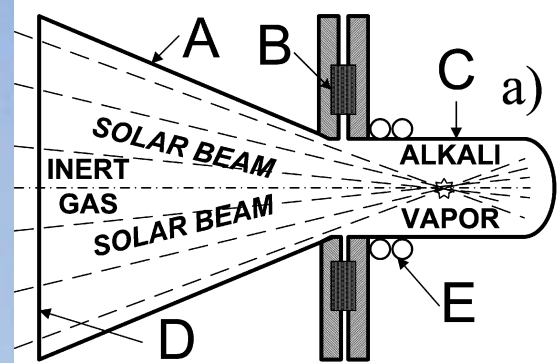
# Конструкция плазменного фотоэлектрического преобразователя.

ЖТФ 2009 Горбунов, Flamant

Проводимость Na-Kr смеси в зависимости от концентрации Na, расчет по формуле Фроста



**A- anode; B- electric insulator; C- cathode; D- input window; and E - external cooling system.**

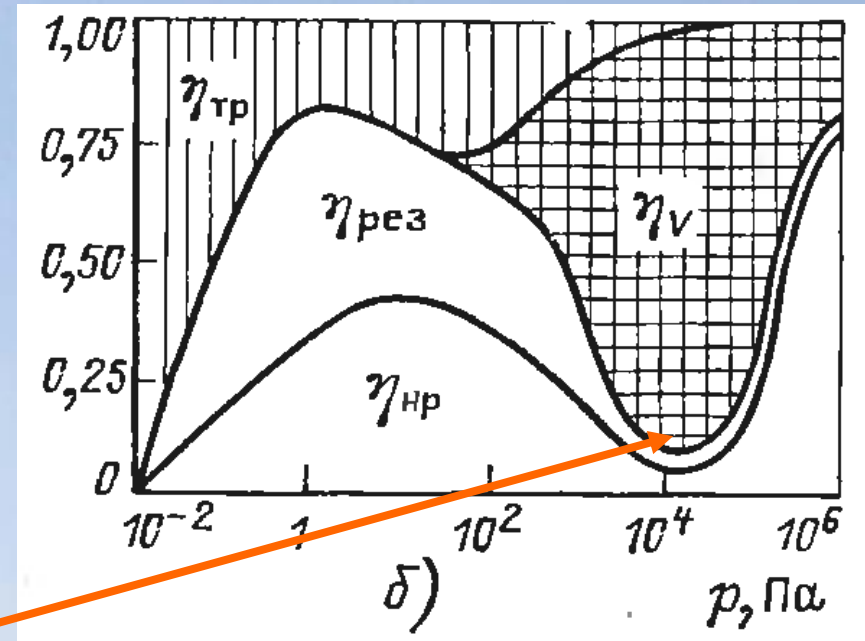




Operating conditions - **pressure**:  
Minimum of Radiation energy losses

Баланс энергии плазмы,  
полученный для газоразрядных  
источников света при высокой  
степени ионизации

Рохлин Г. Н. 1991 Газоразрядные  
источники света.



**Ожидаемая область максимальной  
эффективности плазменного  
фотоэлектрического конвертора  
в диапазоне давлений**

**$10^4$ – $10^5$  Pa**

# Оценка параметров релаксации $T_e$

Оценка температуры электронов на границе ЧЛТР плазмы и ионизационного слоя

$$-\frac{d}{dx} \left( \chi_e \frac{dT_e}{dx} \right) = H_{eh} + Q_{in}$$

$$H_{eh}(x, T_h) = \frac{3}{2} \delta n [v_{ea} + v_{ei}(T_e)] k (T_e(x) - T_h(x))$$

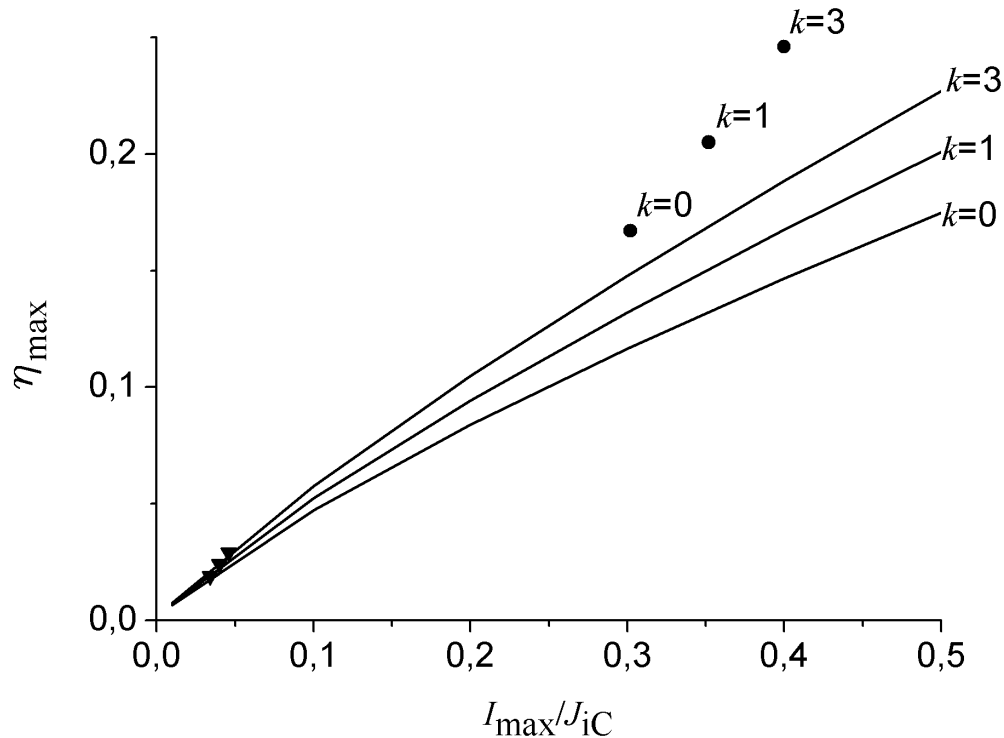
$$T_{e0}(x) = T_P - (T_P - T_{eC}) \exp\left(-\frac{x}{L_{Te}}\right) \quad L_{Te} = \frac{\chi_e (T_P - T_{eC})}{\Gamma_e}$$

$$\Gamma_e(T_{eC}) = \chi_e \left. \frac{dT_e}{dx} \right|_{x=0} = j_C (E_i + e\Delta\phi_C + 2kT_{eC} / e) \quad j_C = D_a \frac{n(T_{eC})}{\sqrt{2}L_i}$$

$$L_i = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{D_a}{\alpha_{rec}(T_{eC})}}$$

# Эффективность прямого фотоэлектрического преобразования.

Gorbunov N, Flamant G. 2015 PCPP



1) Необходимо нагреть центральную часть ЛТР плазмы до температуры  $T_p=4500K$

2)  $k = j_{em}/i_C$  – важную роль играет термоэмиссия электронов с катода

**Оптимальные условия** – затраты на ионизацию должны примерно равняться выносу тепла на стенку за счет теплопроводности тяжелых частиц:  $\Gamma_e/\Gamma_h = 1$

# Трехкомпонентная модель плазмы

- Уравнение баланса тяжелых частиц

$$-\frac{d}{dx} \left( \chi_h \frac{dT_h}{dx} \right) = H_{eh} + Q_h$$

- Модель ЧЛТР;  $Q=0$ ,  $p_0=10^4$  Па

$$\frac{nN^+}{N} = K_1(T_e) \quad n = N^+$$

$$\frac{p_0}{k} = nT_e + T_h(N + n)$$

$$\Gamma_h = \int_0^{\infty} H_{eh}(x, T_{eC}) dx$$

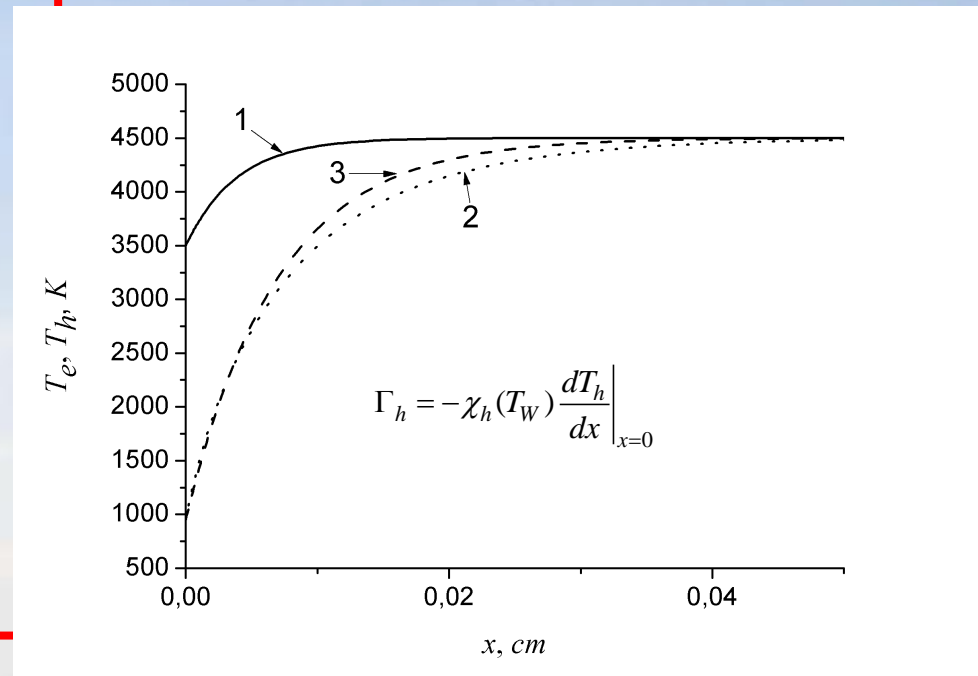
$$\Gamma_h = \chi_h \left. \frac{dT_h}{dx} \right|_{x=0}$$

$$\eta(T_{eC}=3500) \approx 0,25$$

$$\eta(T_{eC}=3200) \approx 0,09$$

$$\chi_h(T_h) = \chi_0 T_h^{0.864}$$

$$T_{h0}(x, L_{Tg}) = T_P - (T_P - T_W) \exp\left(-\frac{x}{L_{Tg}}\right)$$



# Анализ неравновесных явлений

V Rat, A B Murphy, J Aubreton, M F Elchinger and P Fauchais. Treatment of non-equilibrium phenomena in thermal plasma flows. J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 183001 (28pp)

- химический состав плазмы в модели ЧЛТР;
  - реакционная теплопроводность;
- отклонения от химического равновесия в модели ЧЛТР;
- отклонение от равновесного распределения концентрации возбужденных частиц благодаря переносу излучения.

# Реакционная теплопроводность.

Влияние переноса энергии диссоциации молекул  $\text{Na}_2$

Двухпараметрическое модельное распределение  $T_h(x)$

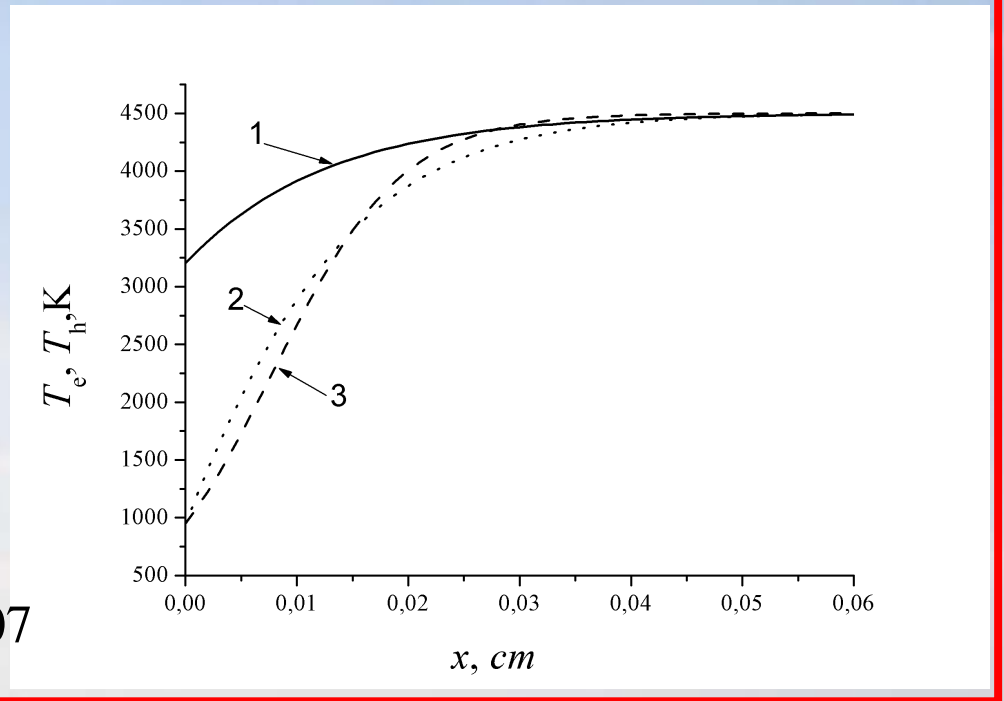
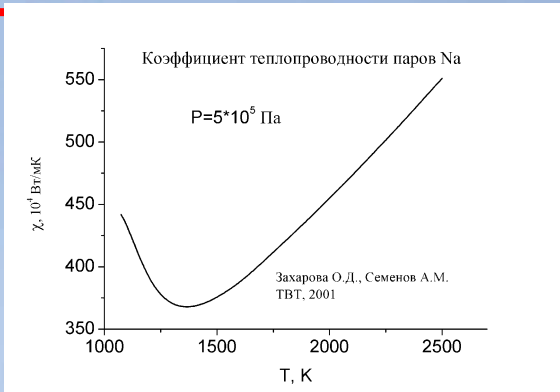
$$T_{g1}(x) = T_P - \frac{(T_P - T_W)(1 + e^{-d/L_{Tg}})}{1 + e^{(x-d)/L_{Tg}}} \quad \left. \frac{\partial \chi_h}{\partial T_h} \right|_{T < 1200} < 0$$

Уравнение коллокации при  $x=0$

$$-\chi_h \frac{d^2 T_h}{dx^2} - \frac{\partial \chi_h}{\partial T_h} \left( \frac{dT_h}{dx} \right)^2 = H_{eh0}$$

Если  $T_{eC} < 3200 \text{ K}$

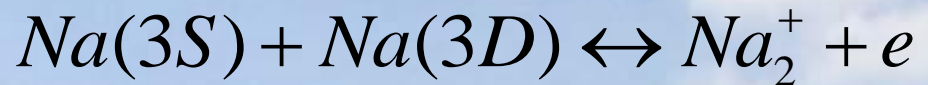
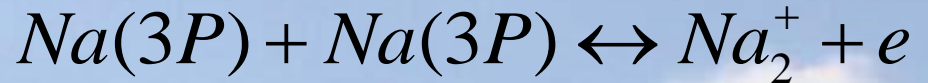
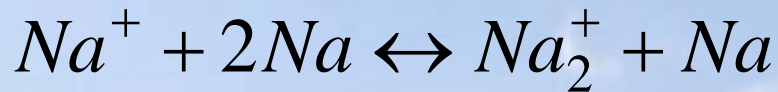
$$\left. \frac{d^2 T_h}{dx^2} \right|_{x=0} > 0 \quad \eta(T_{eC}=3200) \approx 0,07$$





# Химически неравновесная плазма

Кинетика молекулярных ионов  $\text{Na}_2^+$



$$n_2^+ = \frac{K_C n^+ N_0^2 + j_{ai}(T_e, T_g)}{K_D N_0 + k_{dr} n_e}$$

$$Q_h = E_D (K_C n^+ N_0^2 - K_D n_2^+ N_0)$$

$$K_D(T_h, T_v) = \alpha_D(T_h) \beta_D(T_h, T_v)$$

$$\beta_D(T_h, T_v) = \frac{T_h}{T_v} \exp\left(\frac{D}{k} \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_v}\right)\right)$$

Модель активированного промежуточного комплекса

$$K_D N_0 \gg k_{dr} n_e$$

$$Q_h \approx E_D j_{ai}$$

$$\beta_e(T_e) N_0 (n_e) n_e + j_{ai} - \alpha_e(T_e) n_e^3 = 0$$

# Модель расчета $T_h$ с учетом ассоциативной ионизации

Модель постоянства температуры возбуждения

$$j_{ai} = k_{ai3P} [Na_{3P}]^2 \approx k_{ai3P} \left\{ \frac{p_0}{kT_h} \frac{g_{3P}}{g_{3S}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{12}}{T_P}\right) \right\}^2$$

$$y = \exp(-d / L_g) \quad L_g(y) = \chi_g(T_W) \frac{(T_P - T_W) y}{(1 + y) \Gamma_e(T_{eC})}$$

$$y(T_{eC}) = \frac{1}{1 - \frac{\partial \ln \chi_g(T_W)}{\partial T_g} (T_P - T_W) - \frac{S_0(T_{eC}) \chi_g(T_W) (T_P - T_W)}{\Gamma_e^2(T_{eC})}}$$

$$\Gamma_e(T_{eC}) = \int_0^\infty \left\{ \frac{3}{2} \delta n_e [v_{ea} + v_{ei}] k_B (T_{e0}(x, T_{eC}) - T_h(x, y(T_{eC}))) - Q_h(T_h(x)) \right\} dx$$

Решение системы существует при  $p_0 > 2 * 10^4$  Па

# Результат расчета $T_h$ с учетом ассоциативной ионизации

$T_{eC}=2500$ ,  $p_0=5E5$  Па,  $T_w=1100$  К

Для однопараметрической модели

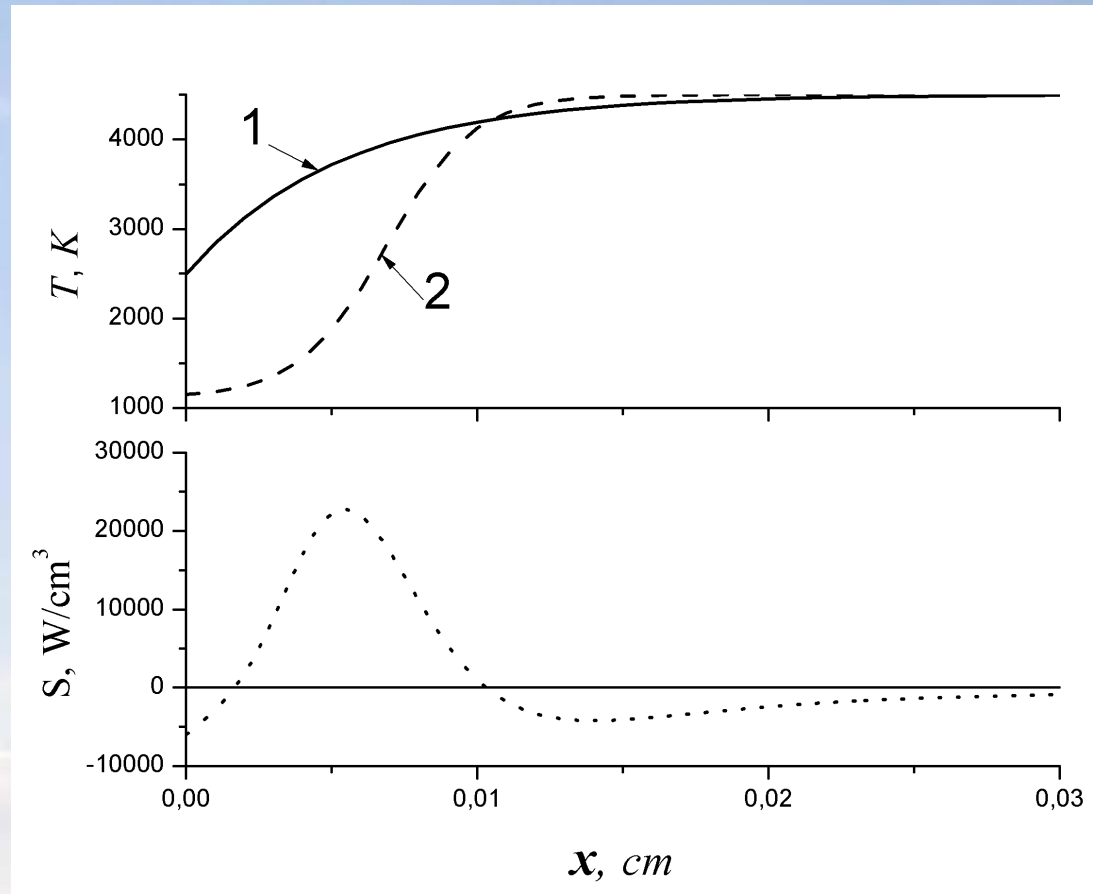
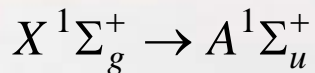
$$\Gamma_h = 184 \text{ Вт/см}^2,$$

Для двухпараметрической модели

$$\Gamma_e = \Gamma_h = 9,2 \text{ Вт/см}^2,$$

$$y_e(0) = 2.3$$

- Расширилась область действия охлаждения;
- Сузилась область действия нагрева;
- Влияние на радиационные свойства плазмы, увеличилась толщина слоя молекул  $Na_2$  и оптическая толщина за счет молекулярного перехода



**Формируется молекулярный теплоизолирующий слой**

# Бистабильность решений с ростом $T_w$

$$T_{eC}=2500, p_0=5E5 \text{ Па}, T_w=1400 \text{ К}$$

$$L_g(y) = \sqrt{\frac{(T_P - T_W) y}{-S_0 (1+y)^2} \left( \frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} (T_P - T_W) y + \chi_g(T_W) (1-y) \right)}$$

$$d = -L_g \ln y$$

Действительные значения  $L_g$

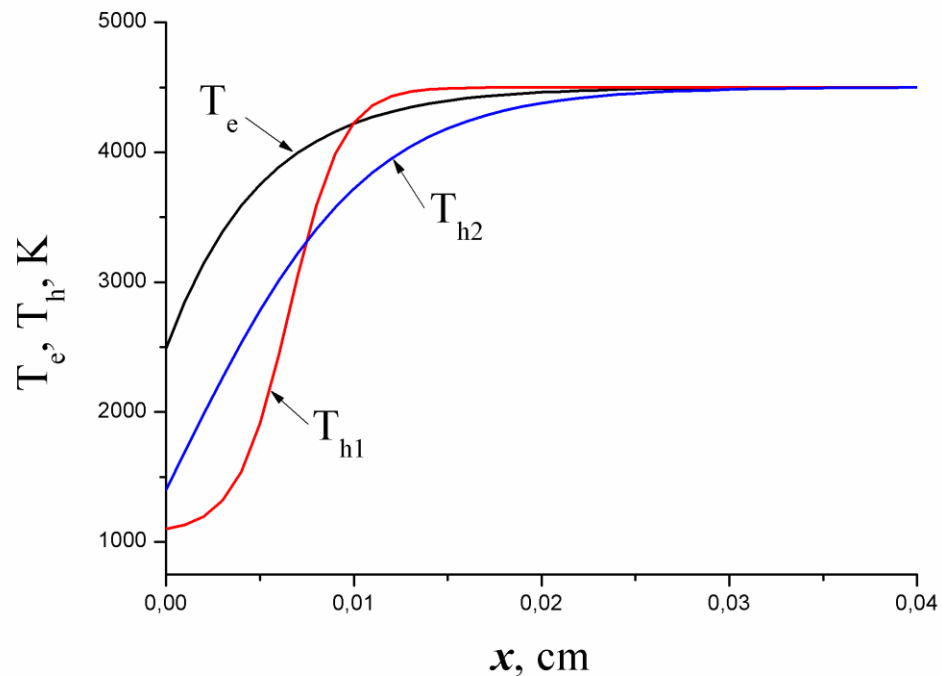
$$S_0 < 0$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} < 0 \quad y \ll 1$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} > 0 \quad y \approx 1 \quad \Gamma_h = 110$$

$$S_0 > 0$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} > 0 \quad y > 1$$



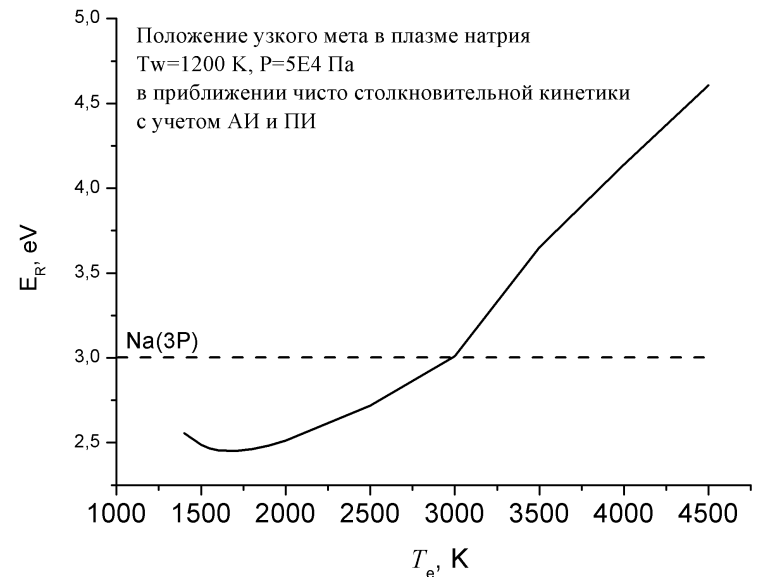
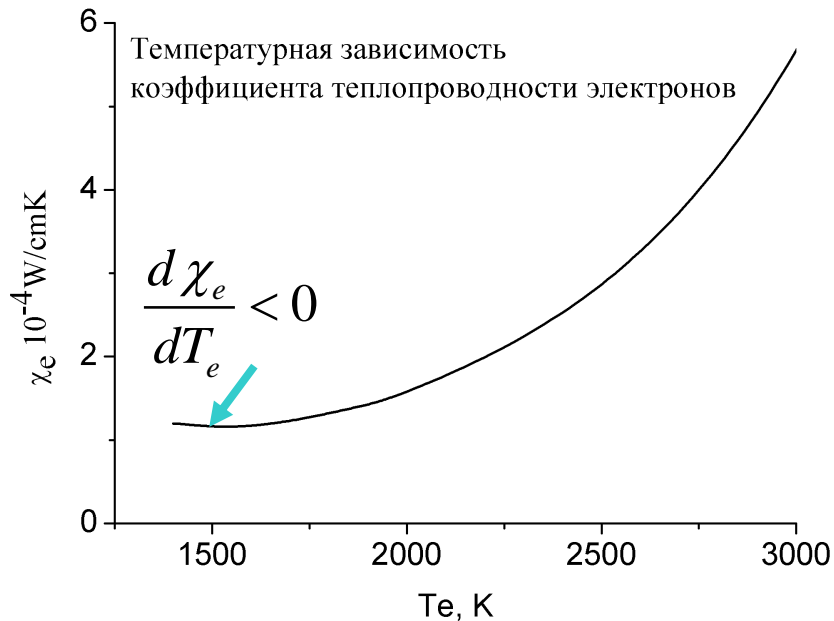
# Уравнение баланса $T_e$

$$-\frac{d}{dx} \left( \chi_e \frac{dT_e}{dx} \right) = -\frac{3}{2} n \delta (v_{ea} + v_{ei}) (T_e - T_W)$$

$$-E_{01} n \left( k_{01}(T_e) [Na_{3S}] - k_{10}(T_e) [Na_{3P}] \right) -$$

$$-\left( E_{1i} [Na_{3P}] k_{1i}(T_e) n - E_R \alpha_{rec}(T_e) n^3 \right)$$

**Необходимо отдельное уравнение для Na(3P)**



*Стоит ли заниматься этой темой?*

*Пришло время эксперимента*

**Спасибо за внимание**