

Conversion of energy of fast charged particles into electricity in inert gases due to non-uniform gas ionization

Filippov A V^{1,2,@}, Babichev V N² and Pal A F^{2,3}

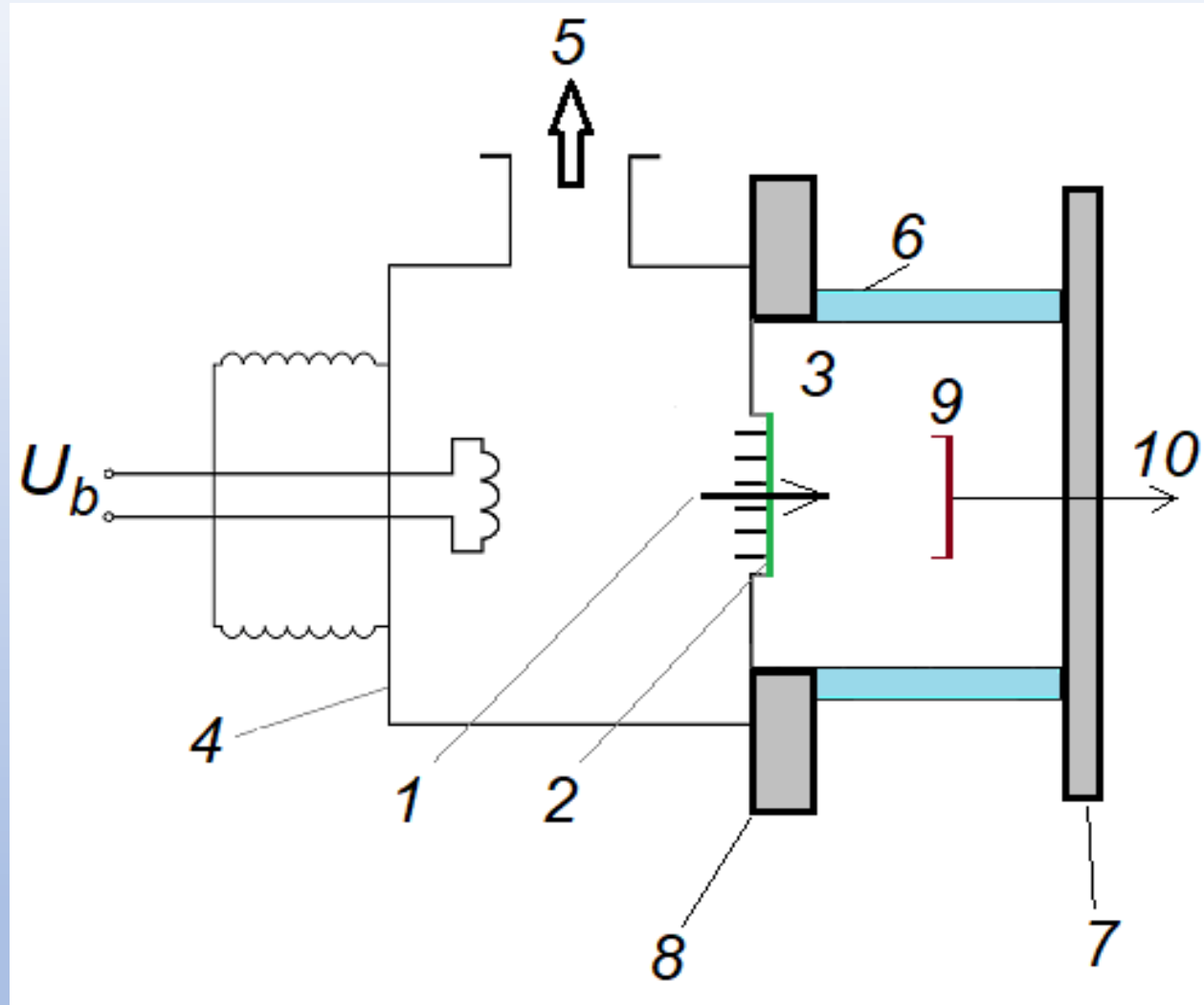
¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Izhorskaya 13 Bldg 2, Moscow 125412, Russia

² State Research Center of the Russian Federation—Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Pushkovykh Street 12, Troitsk, Moscow 108840, Russia

³ Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory 1, Moscow 119899, Russia

@ fav@triniti.ru

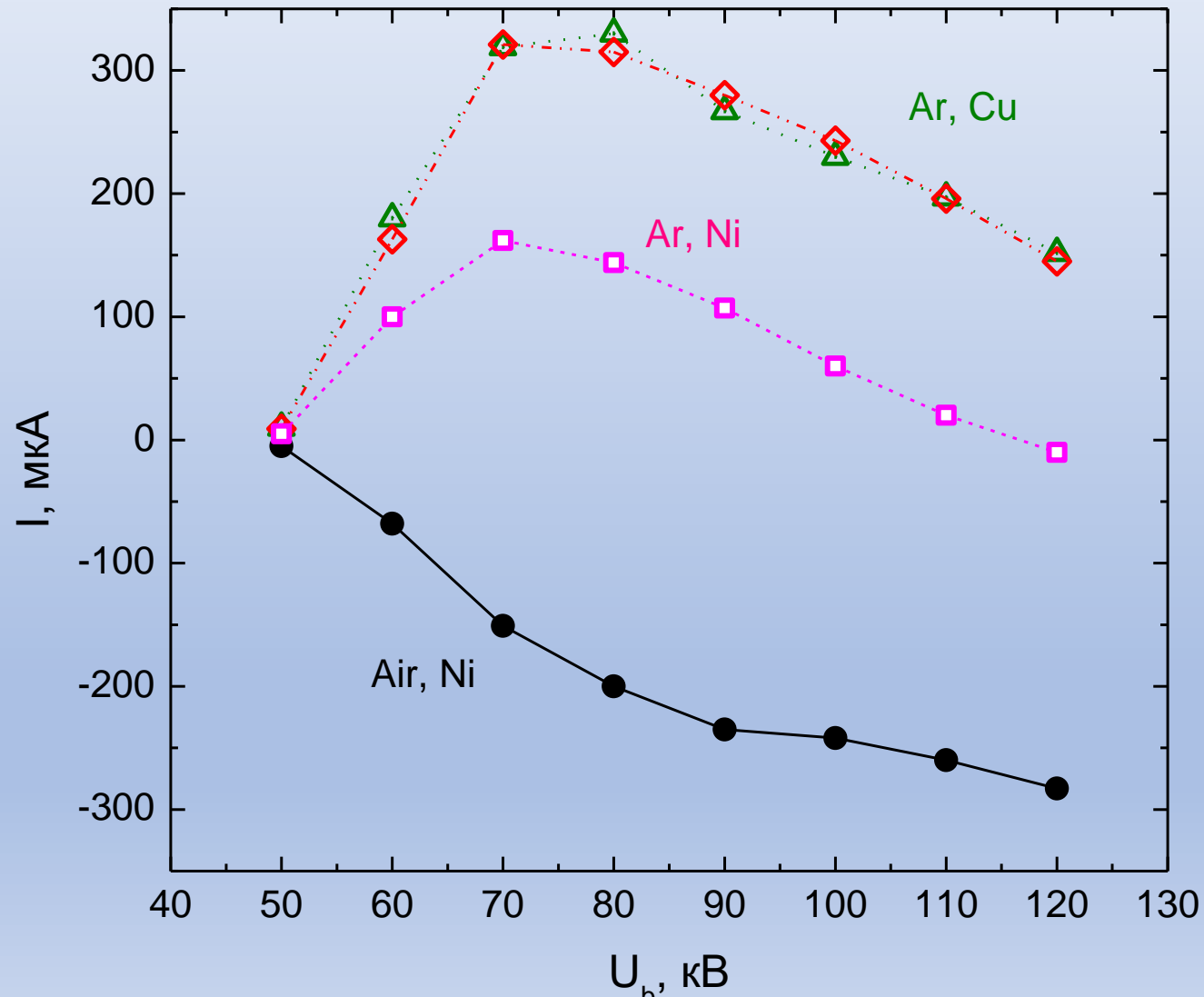
Эксперимент



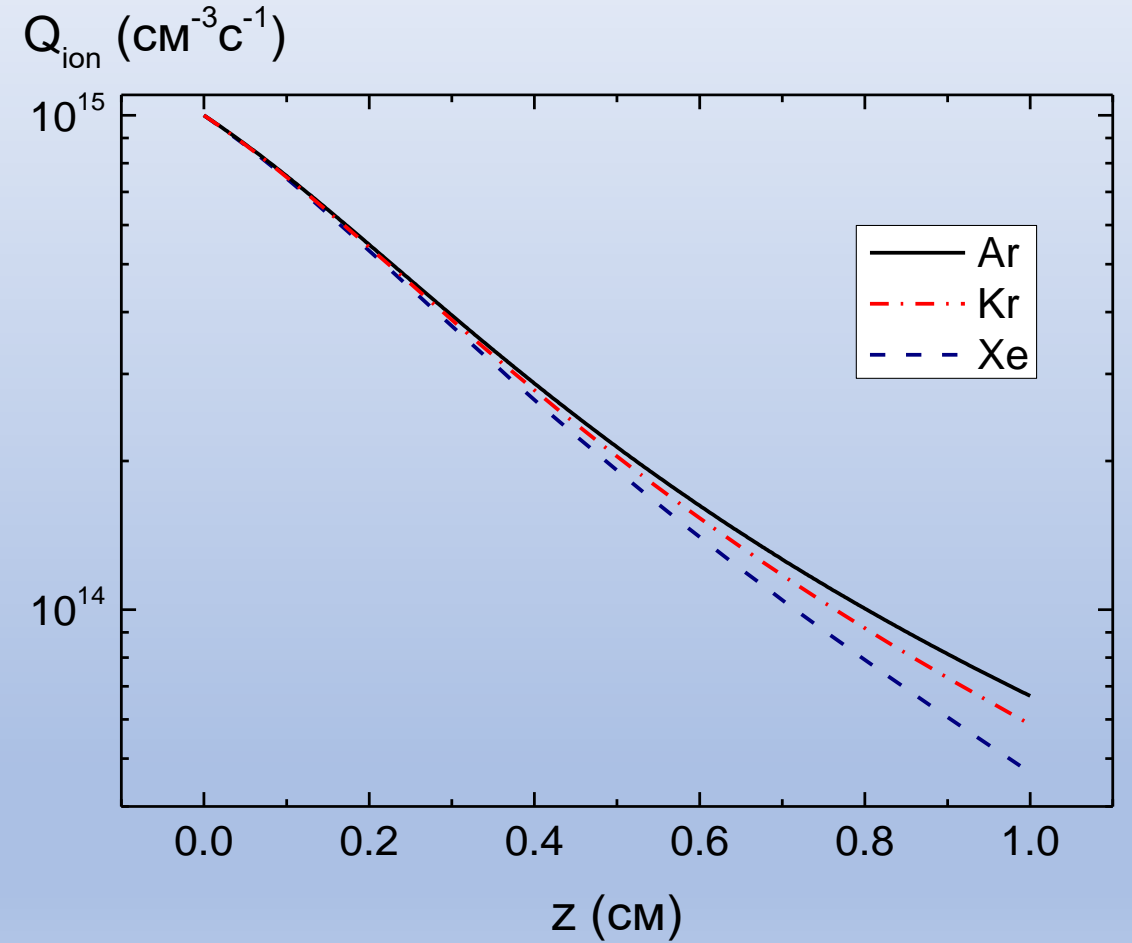
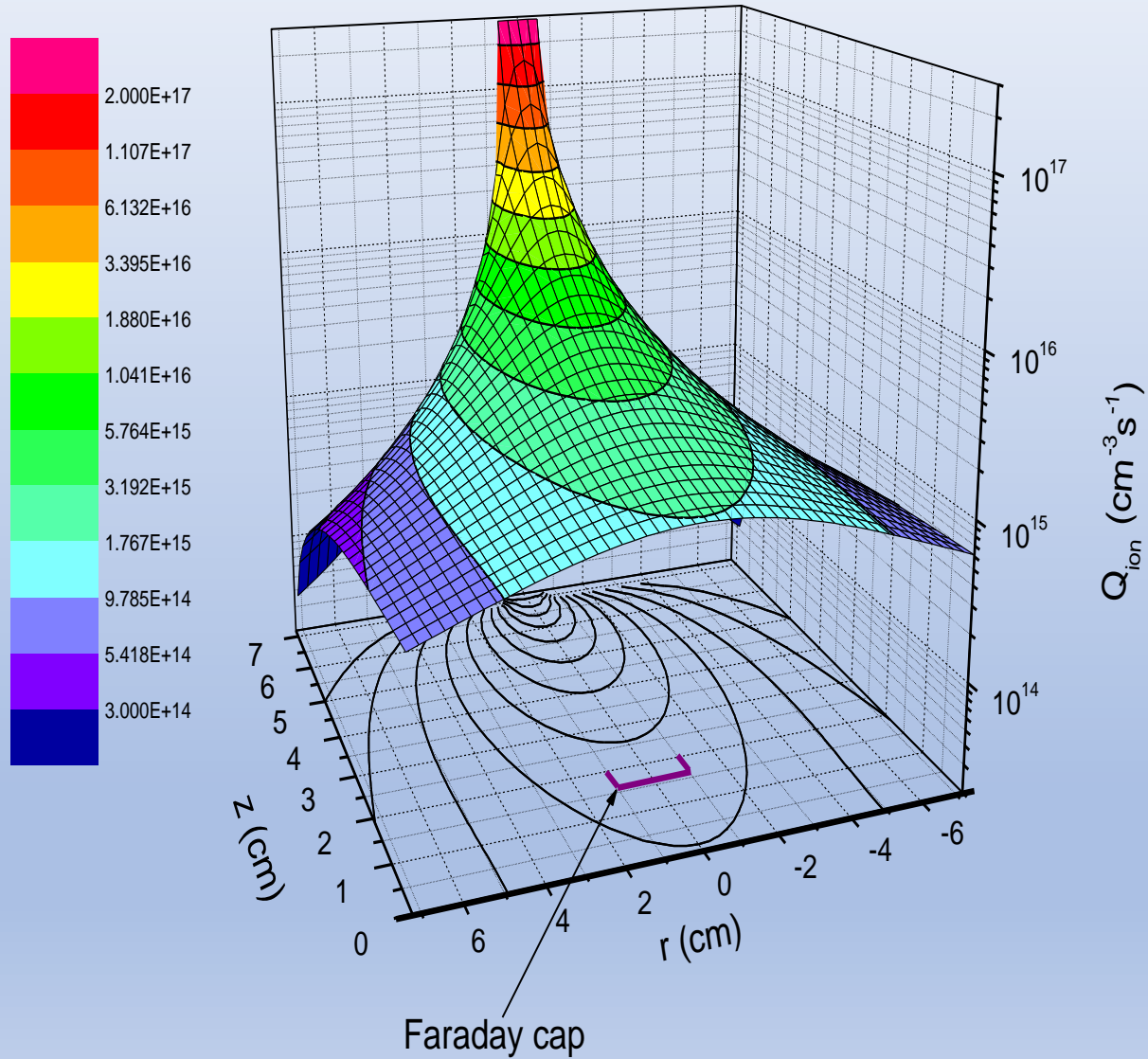
1 — электроны, 2 — фольга с опорной решеткой, 3 — рабочая камера с рабочим давлением газа $1-760$ Торр, 4 — корпус электронной пушки, 5 — откачка до давления $10^{-5}-10^{-6}$ Торр, 6 — цилиндрическая стенка камеры из стекла, 7 — выходной фланец рабочей камеры с выводами, 8 — элемент крепления камеры к электронной пушке, 9 — цилиндр Фарадея, 10 — к схеме измерения тока и генератору напряжения

Зависимость тока на коллектор от ускоряющего напряжения электронной пушки U_b

$I_b = 1$ мА, расстояние фольга-коллектор 15 мм, давление газа 750 Торр



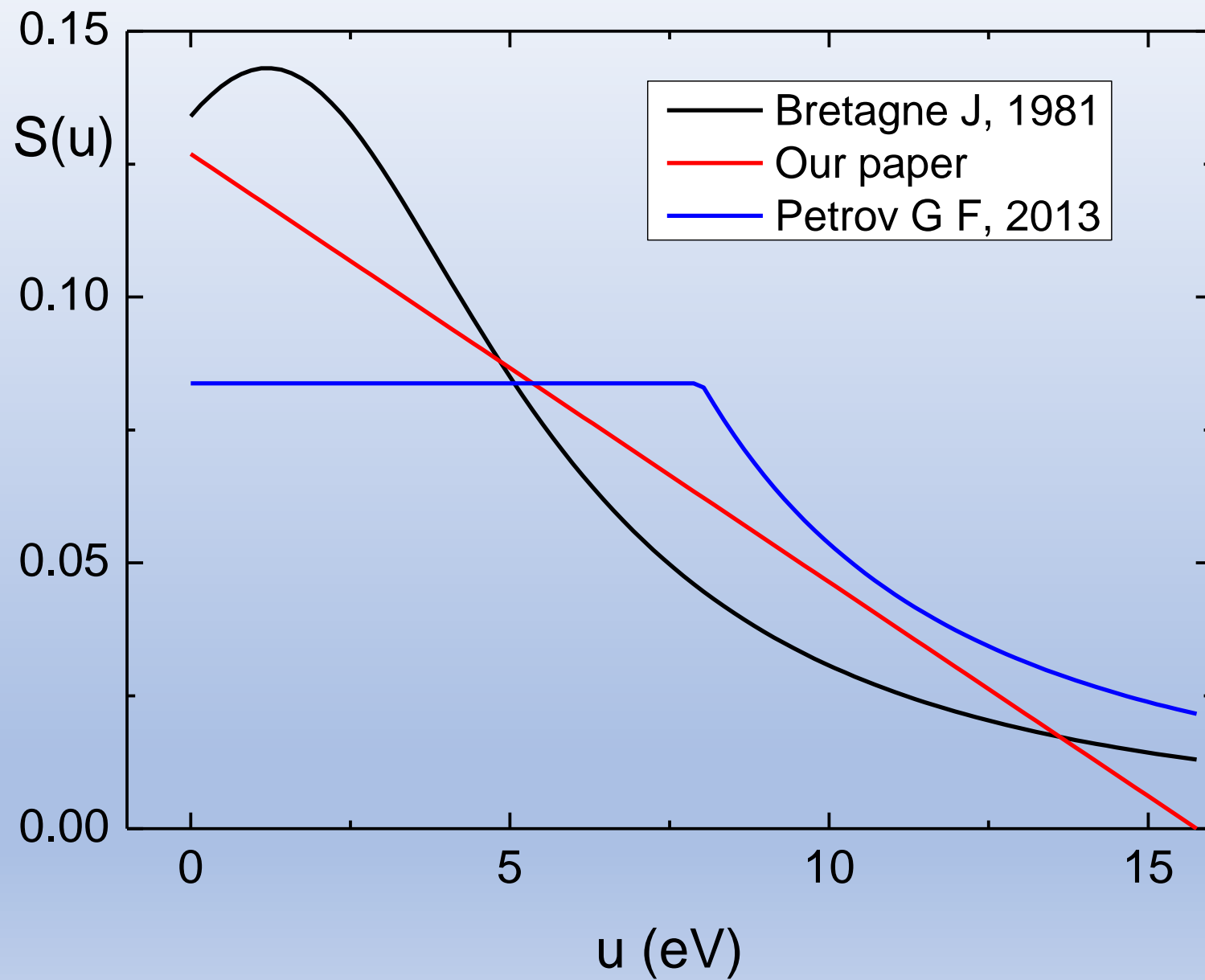
Ионизация газа пучком быстрых электронов



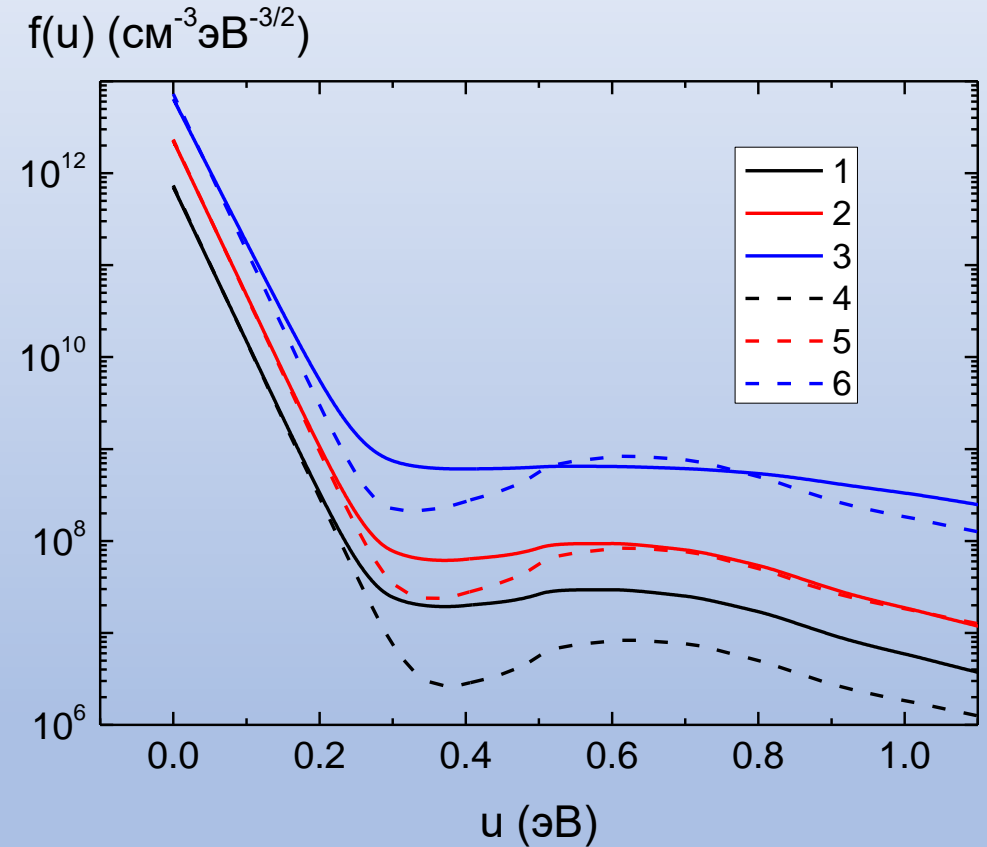
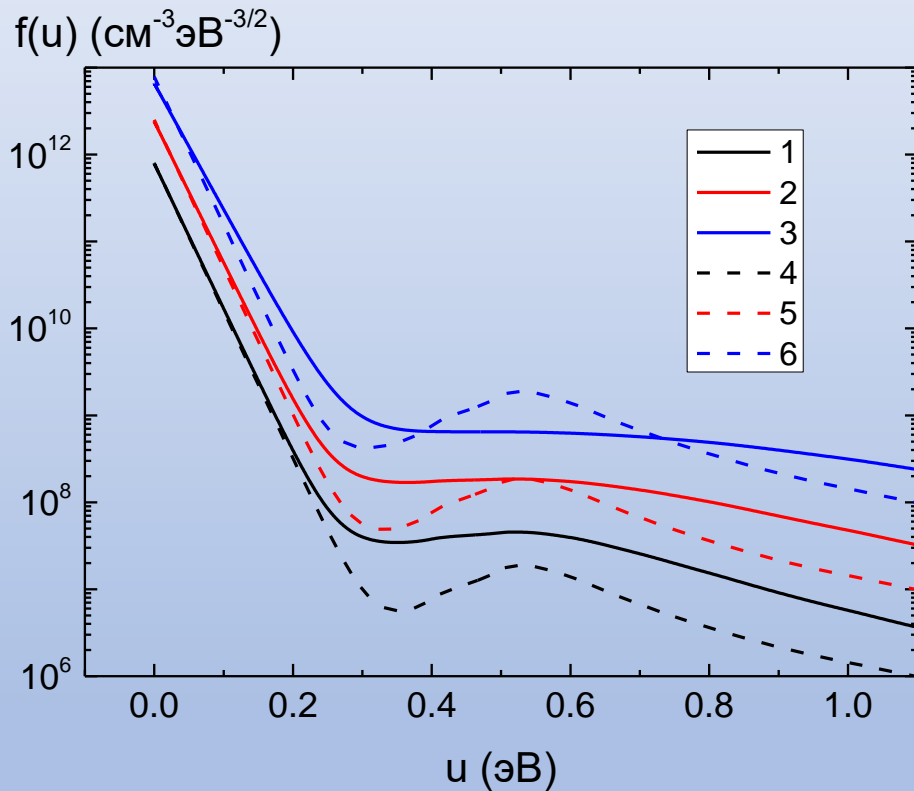
ФРЭ по энергии

$$\begin{aligned} Q_{\text{ion}} S(u) &= Q_{\text{ion}} (a - bu) = St_m n_e f(u) + St_{\text{rec}} n_e f(u) + St_{ee} n_e f(u) \equiv \\ &\equiv -\frac{2m_e}{M} \frac{\partial}{\partial u} \left\{ v_m(u) n_e u^{3/2} \left[f(u) + T \frac{\partial f}{\partial u} \right] \right\} + \\ &+ \sqrt{\frac{2}{m_e}} n_e n_i \sigma_0 f - 2n_e \frac{\partial}{\partial u} \left\{ u^{3/2} v_{ee}(u) \left[A_1(u) f + A_2(u) \frac{\partial f}{\partial u} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$S(u) = a - bu, \quad a = \frac{2}{E_0} \left(2 - \frac{3\varepsilon_{\text{av}}}{E_0} \right), \quad b = \frac{6}{E_0^2} \left(1 - \frac{2\varepsilon_{\text{av}}}{E_0} \right)$$

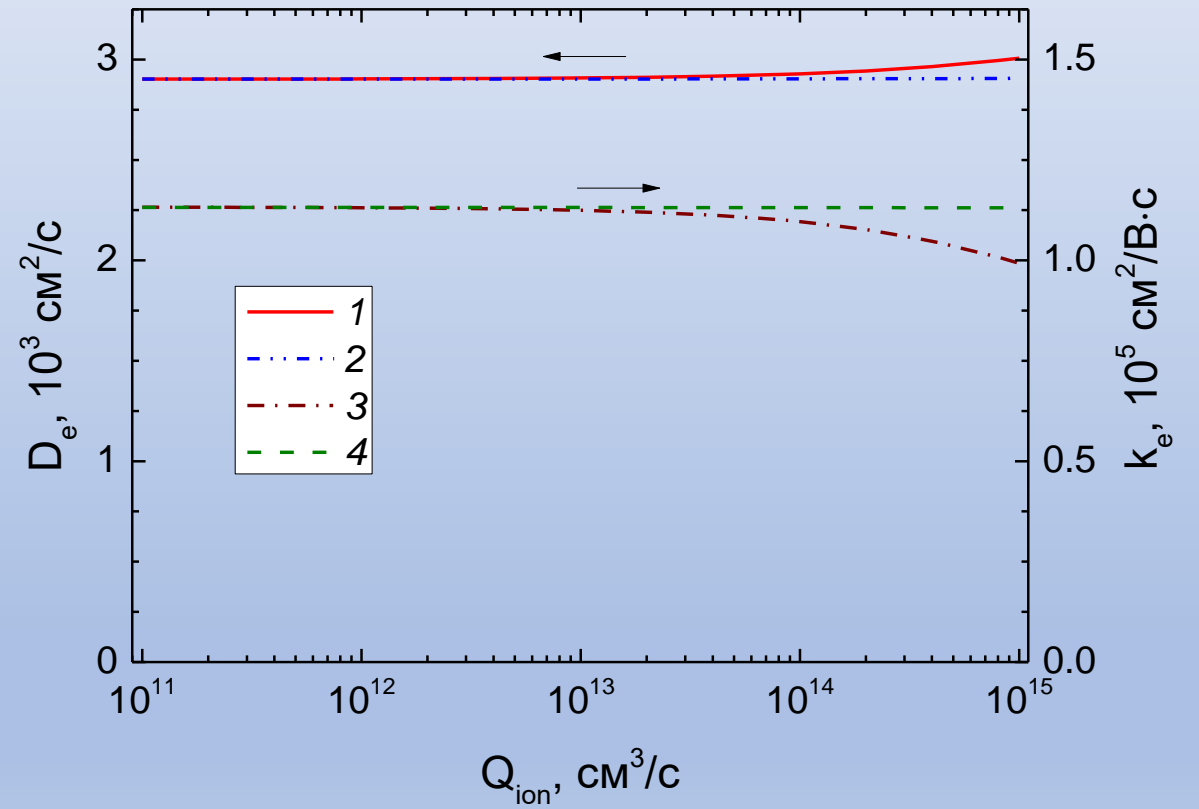
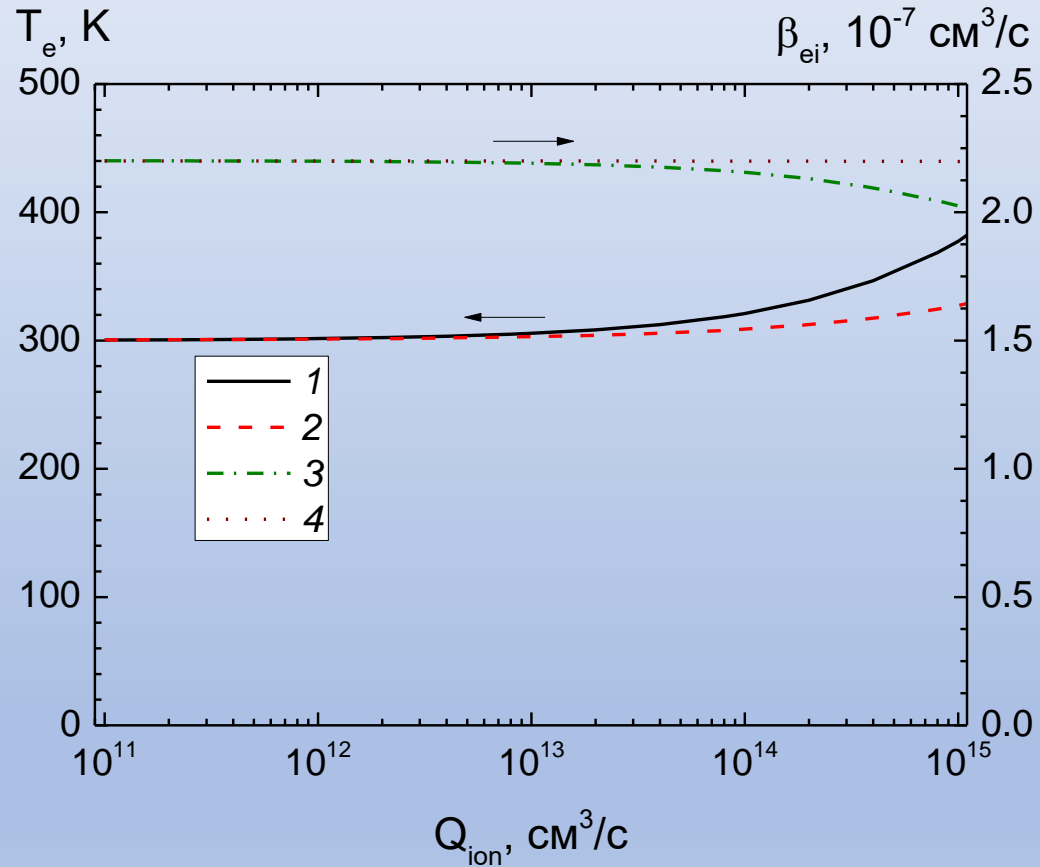


ФРЭ по энергии в криптоне и ксеноне при давлении 1 бар



$Q_{\text{ion}} = 10^{13}$ (кривые 1,4), 10^{14} (кривые 2,5) и $10^{15} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ (кривые 3,5) в криптоне и ксеноне.
Кривые 1-3 - аналитические решения, 4-6 – численное решение уравнения Больцмана.

Коэффициенты переноса в неоне



Кривые 1, 3 – численное решение уравнения Больцмана, 2,4 – аналитическое решение

Граничные условия

$$\frac{1}{4} n_e v_{th,e} \Big|_{r=a} = \left(\frac{1}{2} D_e \frac{\partial n_e}{\partial r} - \gamma k_i n_i E_n + k_e n_e E_p \right) \Big|_{r=a},$$

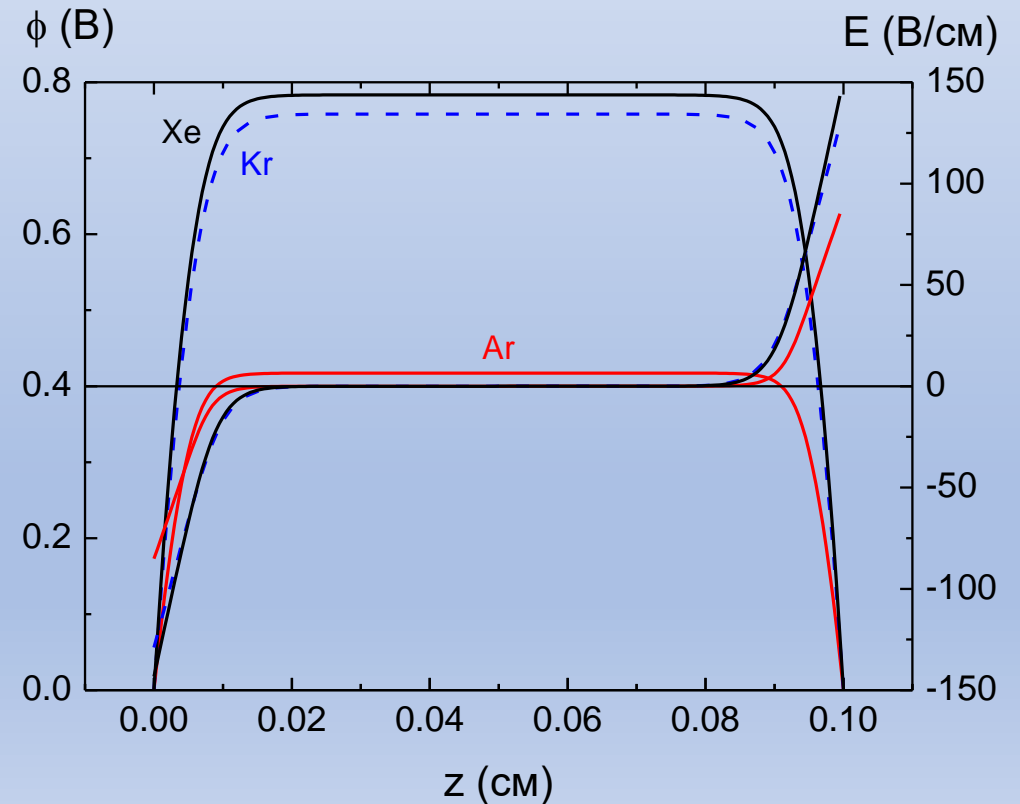
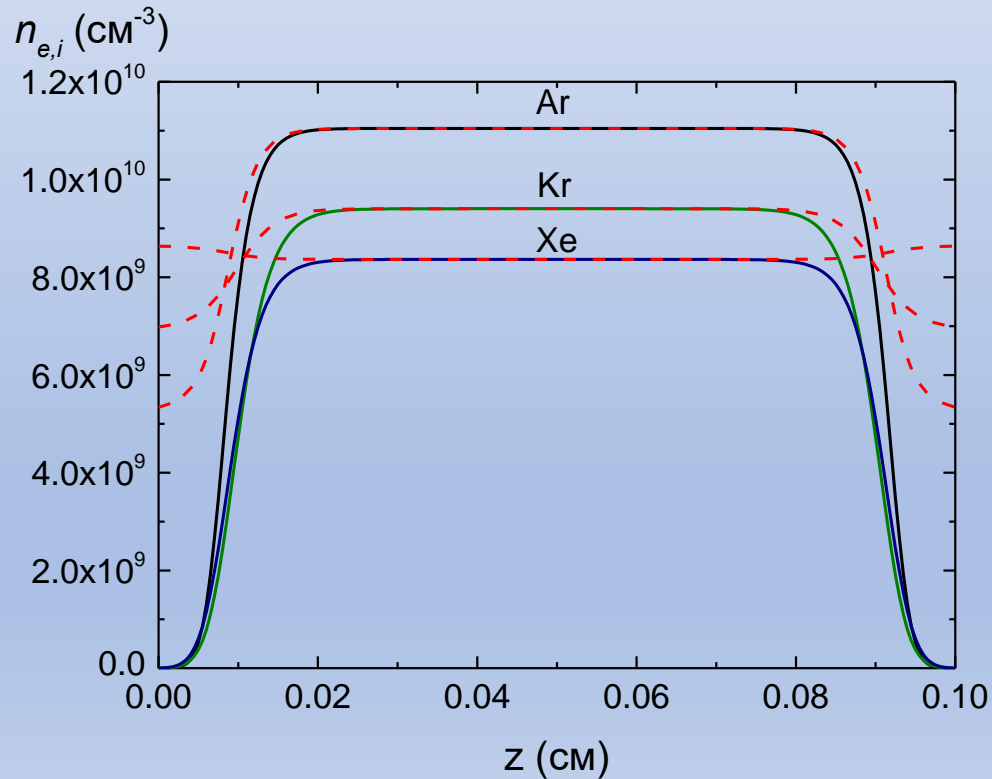
$$\frac{1}{4} n_e v_{th,e} \Big|_{r=L+a} = \left(\frac{1}{2} D_e \frac{\partial n_e}{\partial r} - \gamma k_i n_i E_n + k_e n_e E_p \right) \Big|_{r=L+a},$$

$$n_i(r) \Big|_{r=w} = 0, \quad w = \begin{cases} a, & U_d < 0, \\ L+a & U_d > 0; \end{cases}$$

$$\phi \Big|_{r=a} = 0, \quad \phi \Big|_{r=L+a} = U_d.$$

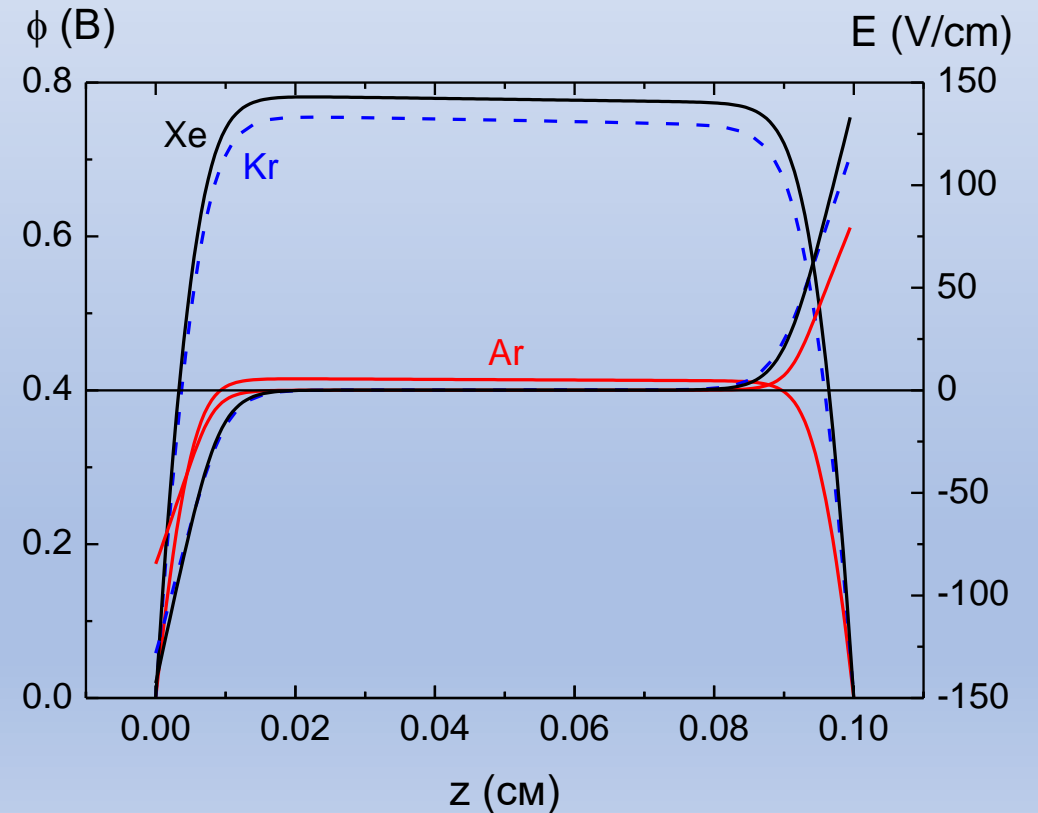
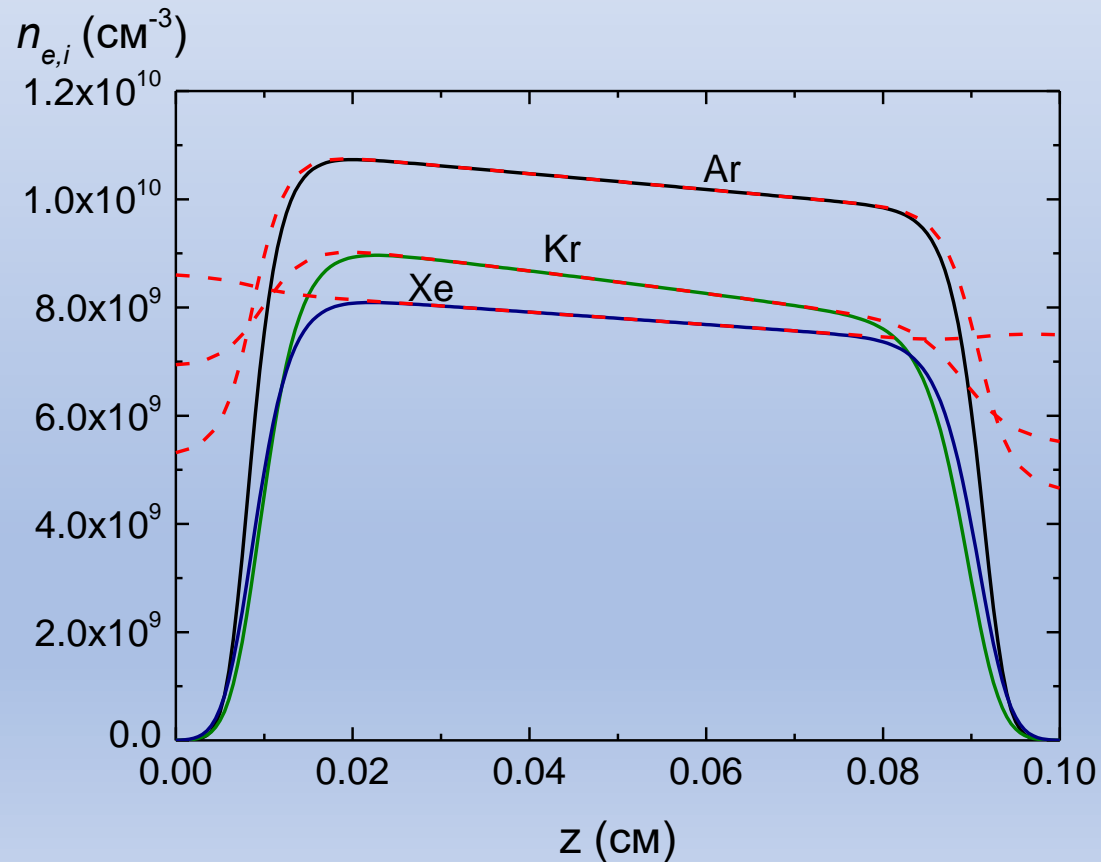
Распределение концентрации электронов и ионов, напряжённости и потенциала электрического поля

$L = 0.1$ см, однородная ионизации газа со скоростью $Q_{\text{ion}} = 10^{14}$ см⁻³с⁻¹

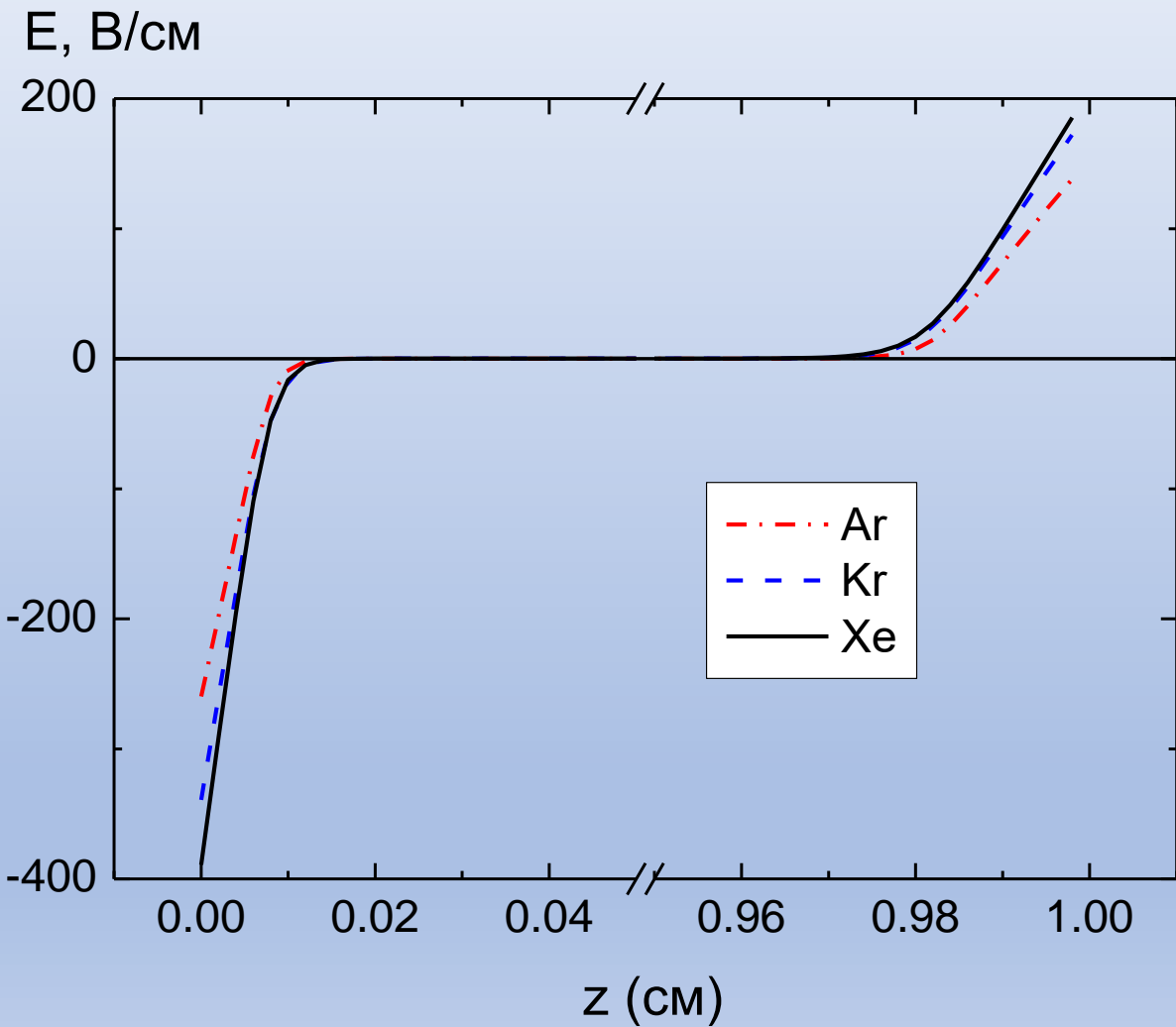
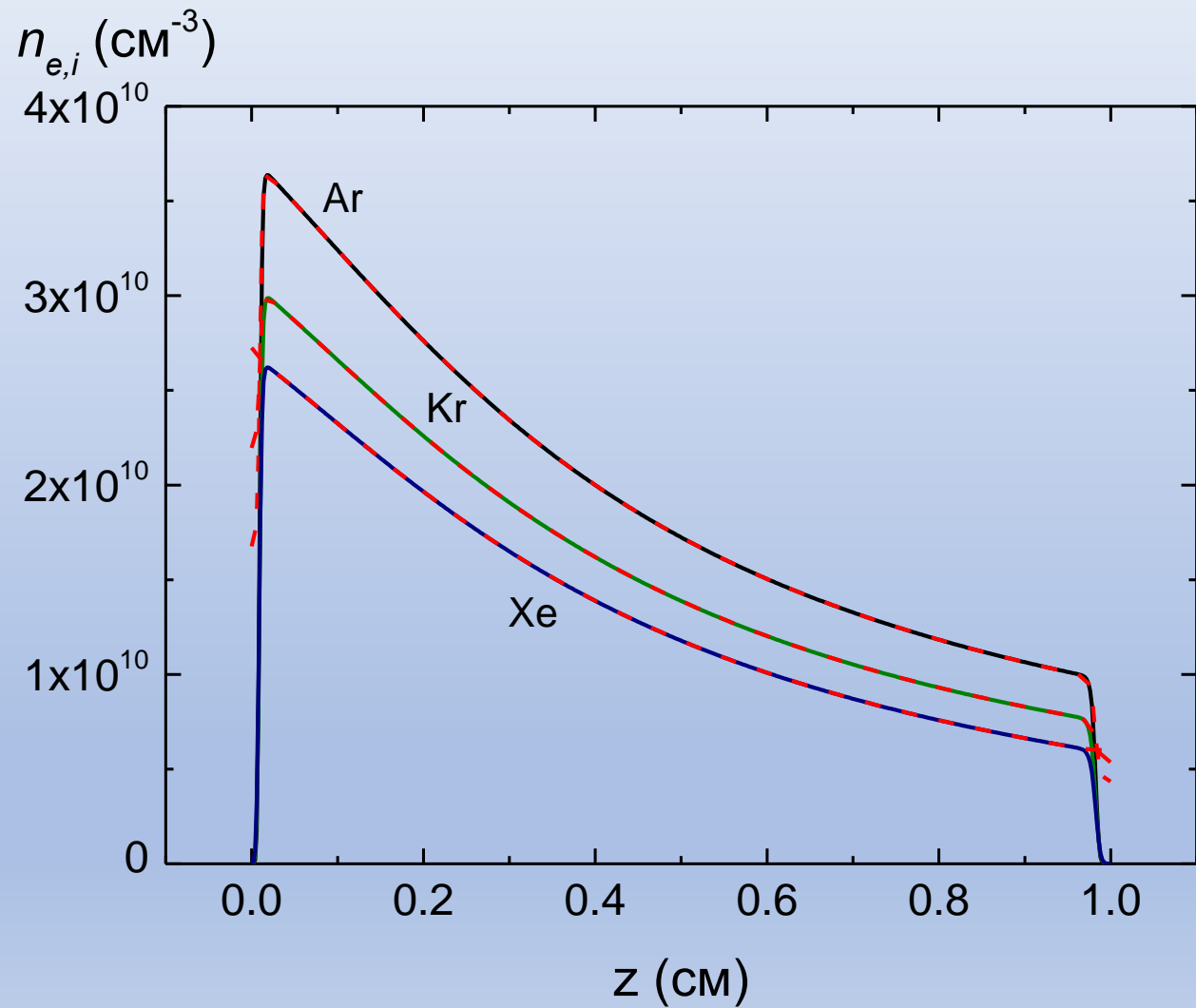


Распределение концентрации электронов и ионов, напряжённости и потенциала электрического поля

$L = 0.1$ см, неоднородная ионизации газа со скоростью $Q_{\text{ion}} = 10^{14}$ см⁻³с⁻¹ у катода при $z = 0$



$L = 1 \text{ CM}$



Плотность тока «короткого замыкания» (в нА/см²)

| Газ | Аргон | Криптон | Ксенон | |
|--|-----------|---------|--------|--------|
| Q_{ion} (см ⁻³ с ⁻¹) | 10^{13} | -0.772 | -0.958 | -0.784 |
| | 10^{14} | -2.51 | -5.16 | -4.67 |
| | 10^{15} | 3.50 | -19.9 | -22.3 |

$L = 0.1$ см

| Газ | Аргон | Криптон | Ксенон | |
|--|-----------|---------|--------|--------|
| Q_{ion} (см ⁻³ с ⁻¹) | 10^{13} | 2.19 | 0.214 | -0.064 |
| | 10^{14} | 26.5 | 11.9 | 6.57 |
| | 10^{15} | 258 | 153 | 99.1 |

$L = 0.5$ см

| Газ | Аргон | Криптон | Ксенон | |
|--|-----------|---------|--------|------|
| Q_{ion} (см ⁻³ с ⁻¹) | 10^{13} | 3.10 | 1.75 | 1.02 |
| | 10^{14} | 24.3 | 17.9 | 11.5 |
| | 10^{15} | 195 | 151 | 105 |

$L = 1$ см

Выводы

- Из-за неоднородной ионизации газа в рабочем объёме в инертных газах наблюдается эффект смены знака электрического поля в плазме
- и протекания тока короткого замыкания между электродами без приложенного внешнего напряжения.
- Данный эффект может быть использован для преобразования энергии бета-частиц в электричество.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785)

Спасибо за внимание

