



Russian Academy of Sciences
Institute of Electrophysics
Physical Electronics Laboratory

Численное исследование генерации убегающих электронов в резко неоднородном поле в околопороговых условиях

Докладчик:

Ю.И. Мамонтов,
аспирант 3 года
обучения

Соавторы:

Н.М. Зубарев,
Н.С. Семенюк,
И.В. Уйманов,
А.В. Козырев

Научный

руководитель:

И.В. Уйманов,
доцент, к.ф.-м.н.

22-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург, 2021

Содержание:

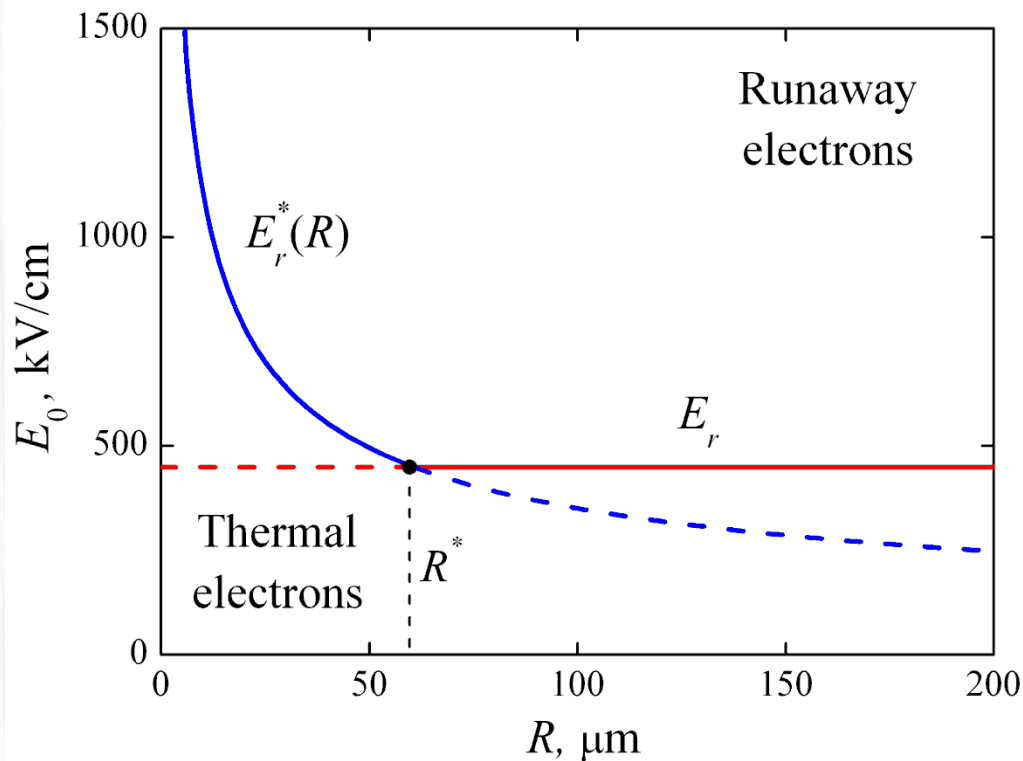
- 1. Предпосылки к работе – слайды 3-6;**
- 2. Исследование порога убегания электронов в неоднородном поле – слайды 7-10;**
- 3. Анизотропия генерации убегающих электронов в неоднородном поле – слайды 11-14;**
- 4. Заключение – слайды 15-17.**



IEP UB RAS

ПРЕДПОСЫЛКИ К РАБОТЕ

Применимость классического критерия убегания



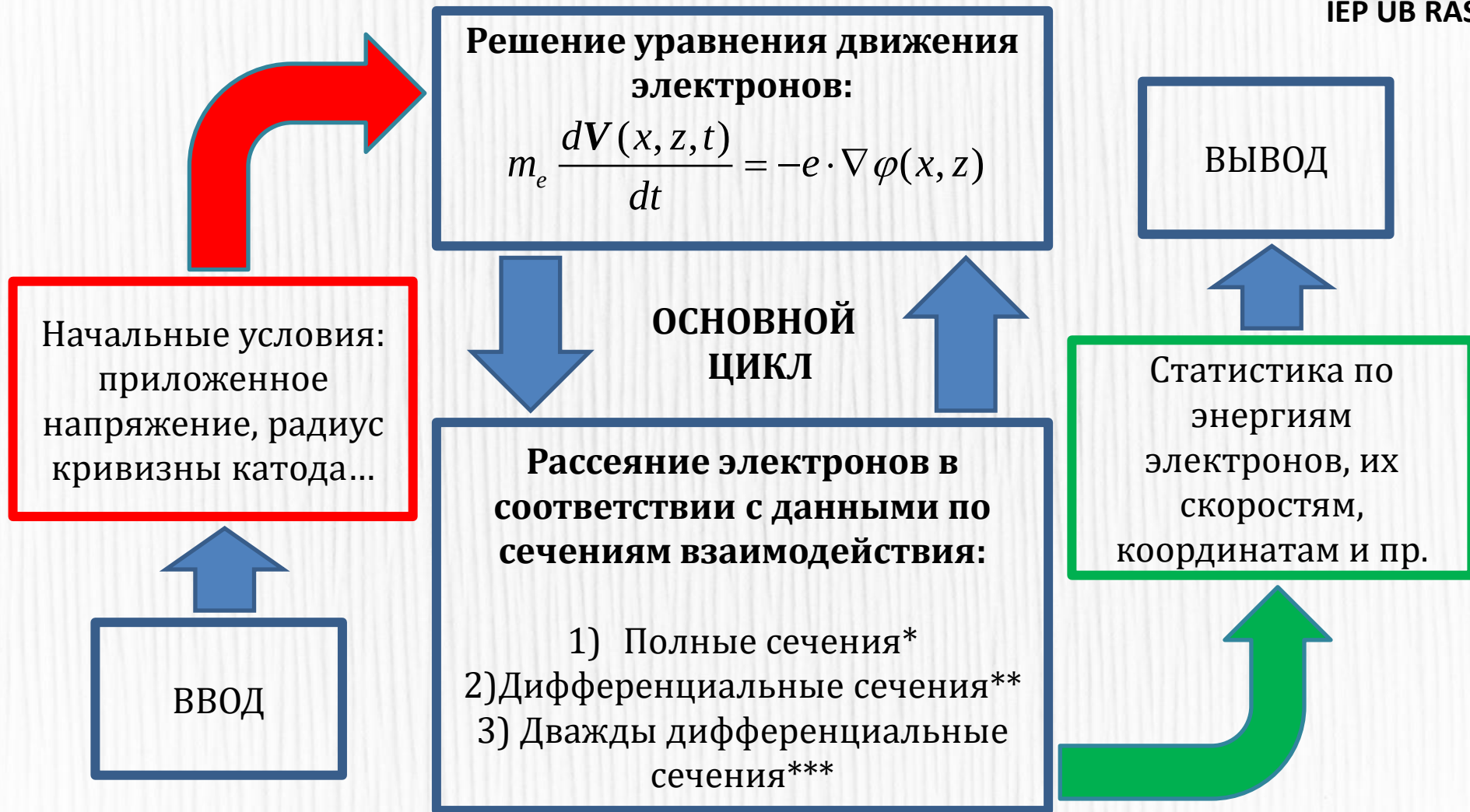
Сравнение двух критериев убегания электронов в азоте давлением 1 атм: классического ($E_0 \geq E_r$) и дополнительного ($E_0 \geq E_r^*$) [1,2].

- Явление убегания электронов может оказывать существенное влияние на динамику формирования газовых разрядов
- Критерии генерации убегающих электронов в азоте в резко неоднородном поле ранее были исследованы аналитически [1,2]
- «Классический» критерий убегания электронов может не выполняться для катодов малого радиуса кривизны

[1] N.M. Zubarev, G.A. Mesyats, M.I. Yalandin // JETP Lett., vol. 105, no. 8, pp. 537-541, 2017.

[2] N.M. Zubarev et. al. // J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 51, no. 28, 284003, 2018.

Описание алгоритма Монте-Карло



* Itikawa Y. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 2006. - Vol. 35, No. 1. - P. 31.

** Phelps A.V., Pitchford L.C. // Phys. Rev. A, 1985. - Vol. 31, No. 5. - P. 2932.

*** Opal C.B., Peterson W.K., Beaty E.C. // J. Chem. Phys. - Vol. 55, No. 8. - P. 4100.

Цели работы:

- 1) Проверка аналитической модели, предложенной в [1,2].**
- 2) Исследование анизотропии процесса убегания электронов.**
- 3) Оценка неупругих потерь энергии убегающими электронами в околопороговых условиях**

[1] N.M. Zubarev, G.A. Mesyats, M.I. Yalandin // JETP Lett., vol. 105, no. 8, pp. 537-541, 2017.

[2] N.M. Zubarev et. al. // J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 51, no. 28, 284003, 2018.



IEP UB RAS

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Рассматриваемая разрядная система

- Распределение потенциала:

$$\varphi(x, z) - \varphi_c = a(\sqrt{g(x, z) / 2} - \sqrt{R / 2})$$

- Функция $g(x, z)$:

$$g(x, z) = z + R / 2 + \sqrt{(z + R / 2)^2 + x^2}$$

- Параметр a :

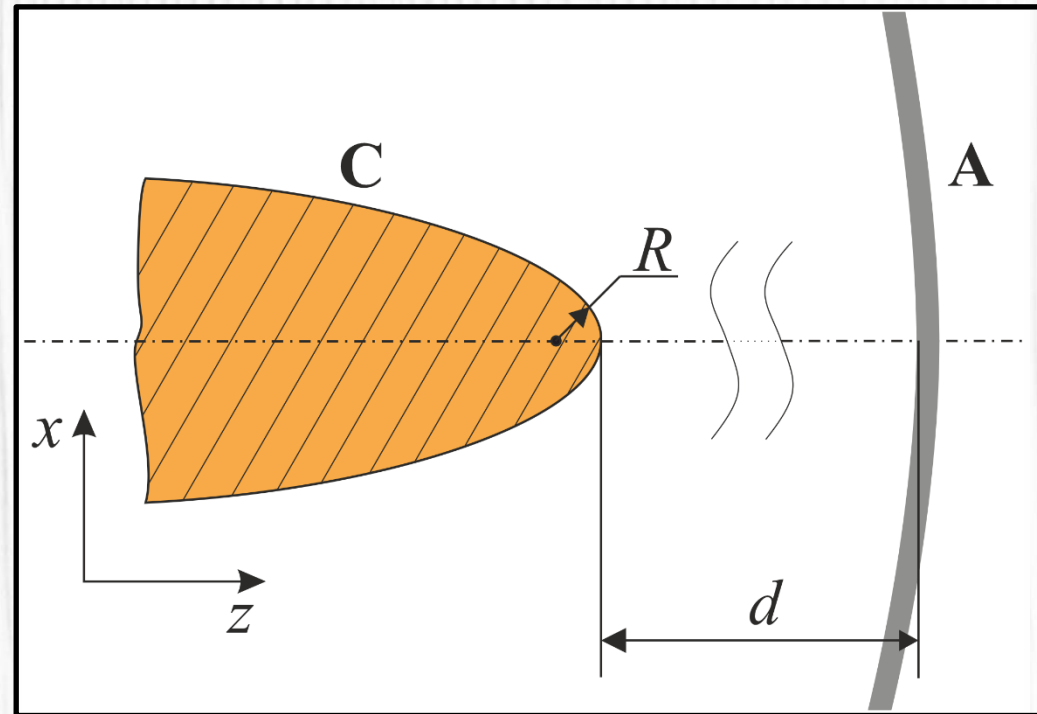
$$a = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{\sqrt{g(0, d) / 2} - \sqrt{R / 2}}$$

- Распределение электрического поля вдоль оси Oz :

$$E(z) = - \frac{E_0}{\sqrt{1 + 2z / R}}$$

- Напряженность поля вблизи вершины катода:

$$E_0 = \frac{a}{\sqrt{2R}}$$



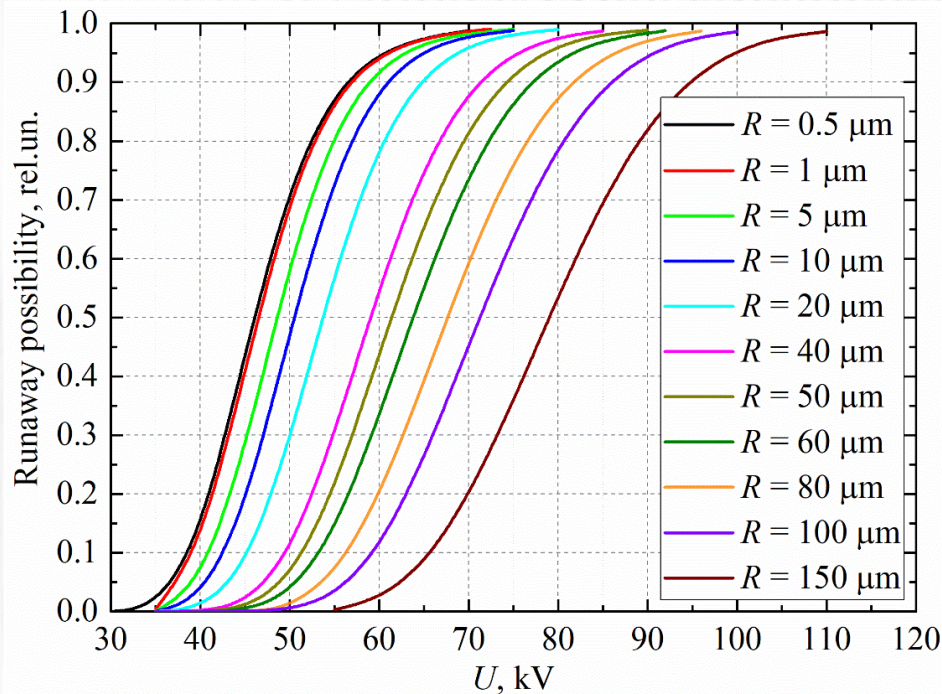
Схематическое изображение рассматриваемой разрядной системы. Электроды представляют собой конфокальные параболы.



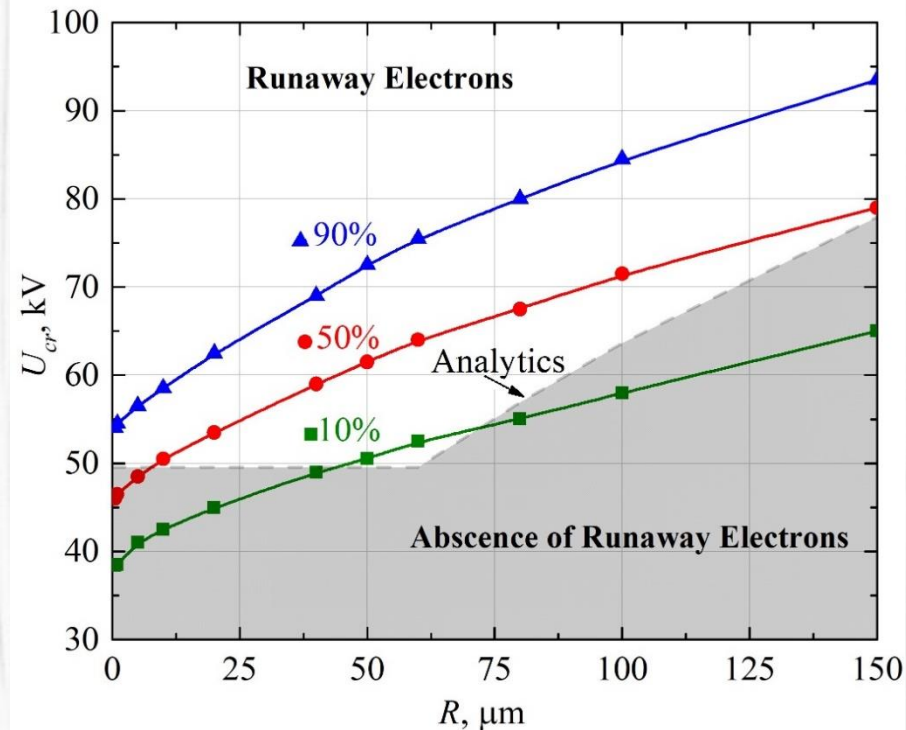
Численный эксперимент (одноэлектронное приближение)

- ✓ Моделирование движения электронов в азоте давлением 1 атм в стационарном поле, $d = 1 \text{ cm}$
- ✓ Количество моделируемых электронов $\sim$ 100 000
- ✓ Начальная координата электронов (0, 0) (вершина катода)
- ✓ Начальные скорости электронов – порядка средней тепловой скорости при температуре 300 K
- ✓ Радиус кривизны катода варьируется от 0.5 мкм до 150 мкм
- ✓ Напряжение варьируется от 30 кВ до 150 кВ
- ✓ Моделируемый временной отрезок – 200 пс

Определение порога убегания в неоднородном поле



Зависимости вероятностей перехода
электронов в режим убегания от
приложенного напряжения для
различных радиусов кривизны катода



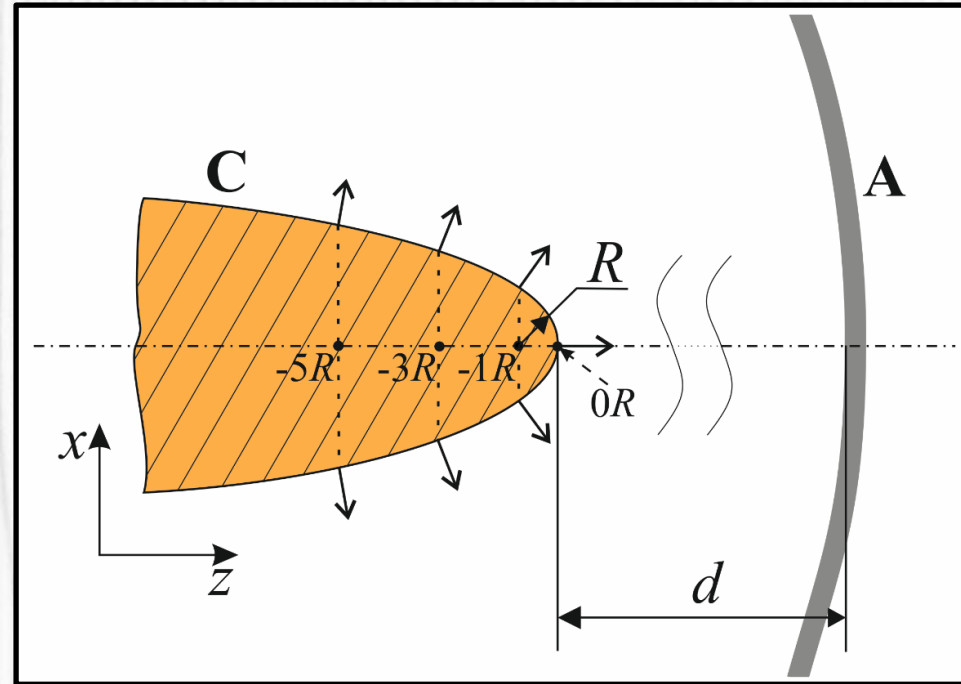
Оценка величины критического
напряжения для различных
радиусов кривизны катода

АНИЗОТРОПИЯ ГЕНЕРАЦИИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ



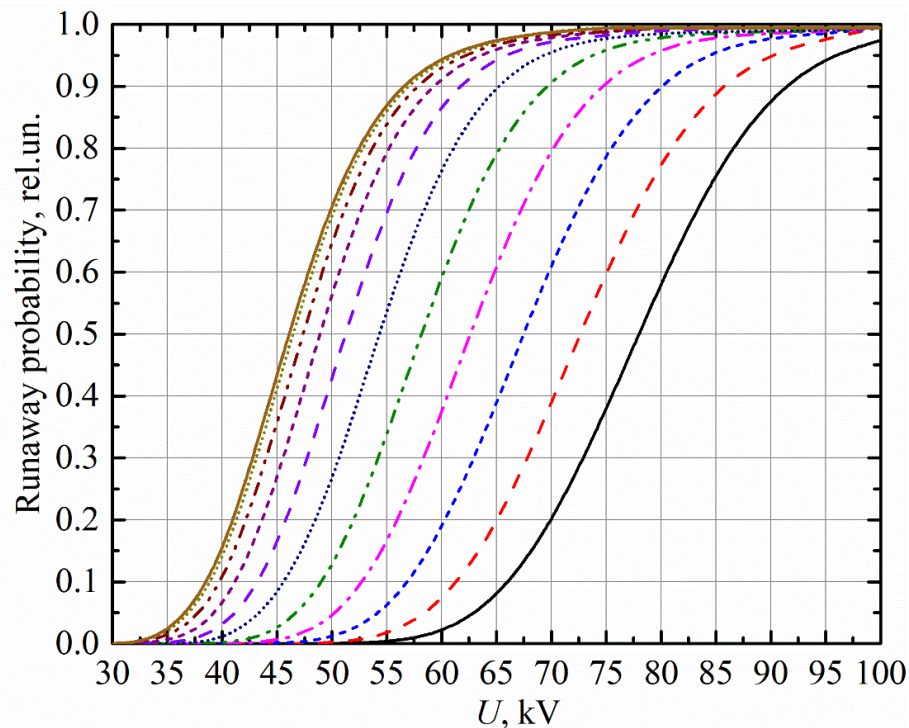
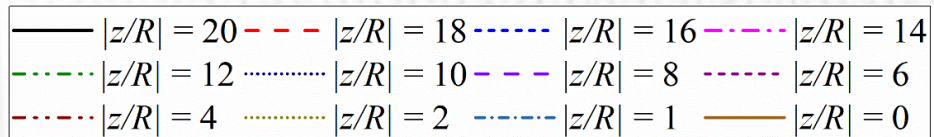
Модификация численного эксперимента

- ✓ Начальная координата электронов – задается безразмерной величиной $|z/R|$
- ✓ Начальные скорости электронов – порядка средней тепловой скорости при температуре 300 K
- ✓ Радиус кривизны катода – 0.5 мкм
- ✓ Напряжение варьируется от 30 кВ до 100 кВ



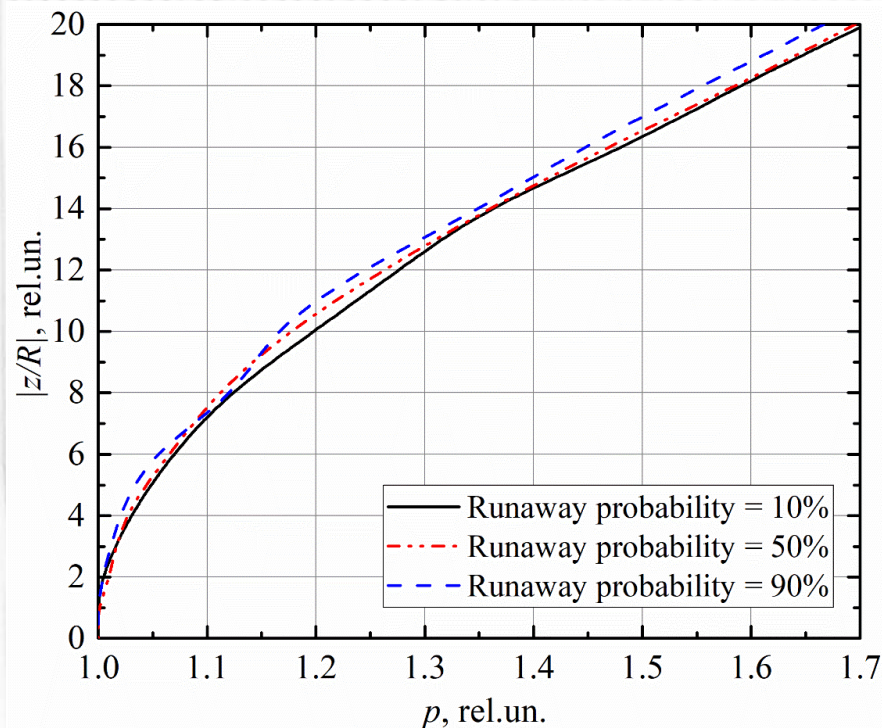
Схематическое изображение рассматриваемой разрядной системы с указанием координат точек эмиссии электронов

Оценка порогов убегания для различных значений $|z/R|$



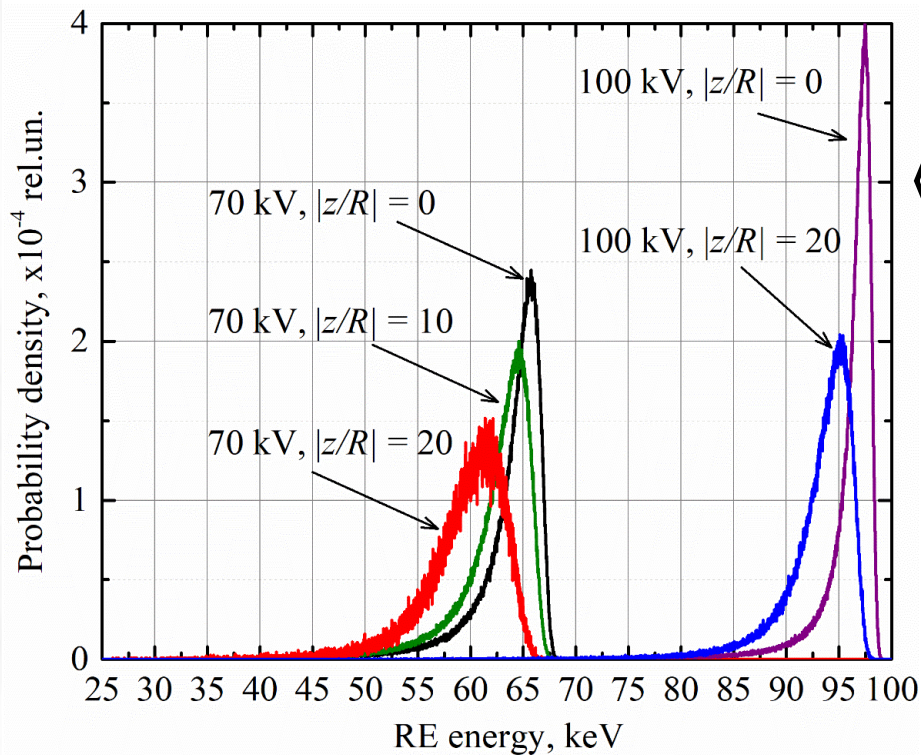
Зависимости вероятности перехода электронов в режим убегания в неоднородном поле от приложенного напряжения U для различных $|z/R|$

$$p = U_{cr}(|z/R|) / U_{cr}(|z/R| = 0)$$



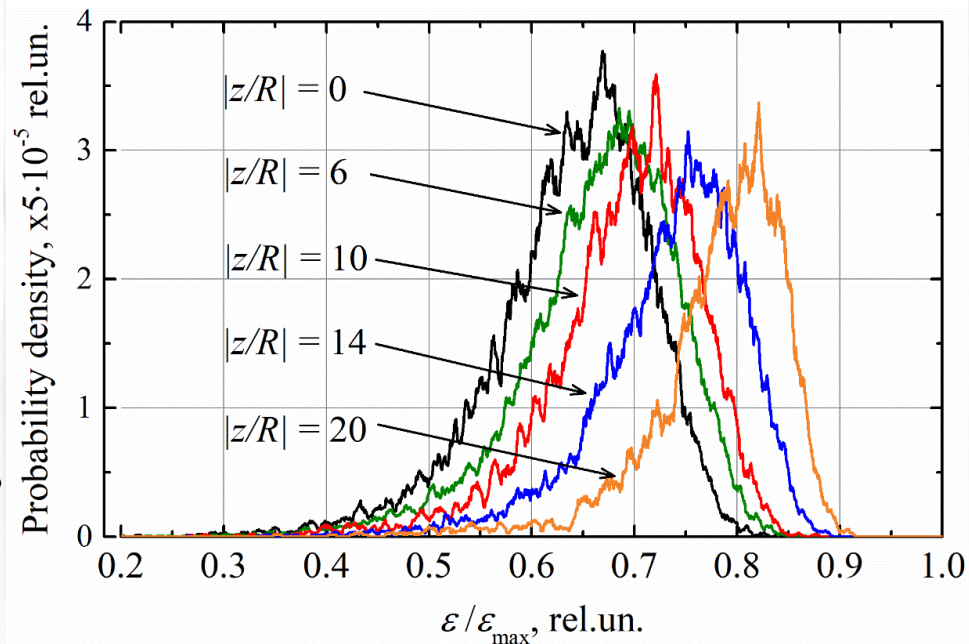
Зависимость безразмерной координаты эмиссии электрона $|z/R|$ от безразмерного напряжения p

Оценка потерь энергии убегающими электронами



Энергетические спектры убегающих электронов на аноде для различных значений напряжения U и координаты точки эмиссии электронов $|z/R|$

Энергетические спектры убегающих электронов вблизи порогов убегания для различных $|z/R|$ (вероятность убегания $\lesssim 1\%$)





IEP UB RAS

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы:

Наличие некоторого конечного значения U_{cr} для катодов малого радиуса кривизны R подтверждает ранее предложенный критерий для генерации убегающих электронов в резко неоднородном поле.

Даже для катодов очень малого радиуса кривизны необходимо прикладывать некоторое конечное напряжение, чтобы предотвратить торможение убегающих электронов на периферии разрядного промежутка в области относительно слабого поля.

При напряжениях, превышающих пороговое для убегания напряжение, могут «активироваться» различные области катода, что может приводить к размыванию энергетического спектра убегающих электронов за счет повышенных неупругих потерь энергии

Вблизи порога убегания неупругие потери энергии существенно превышают потери энергии в области напряжений, которая соответствует интенсивной генерации убегающих электронов.

Результаты опубликованы в:

- Y.I. Mamontov, I.V. Uimanov, A.V. Kozyrev, N.M. Zubarev, and N.S. Semeniuk, "Influence of inhomogeneous electric field geometry factors on runaway electrons generation conditions," Proc. 7th Int. Congress on Energy Flux. and Rad. Effects (EFRE), Tomsk, Russia, pp. 140–146, 2020.
- Y.I. Mamontov, N.M. Zubarev, and I.V. Uimanov, "Anisotropy of the runaway electron generation process in strongly inhomogeneous electric fields," IEEE TPS: Special Issue on High-current Discharge Plasmas, IN PRINT, article No: TPS13702.R1.





Russian Academy of Sciences
Institute of Electrophysics
Physical Electronics Laboratory

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Ю.И. Мамонтов, аспирант 3 года обучения,
mamontov.ura.1994@yandex.ru,
+7 909 004 83 77

22-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург, 2021