

Международная школа-конференция
молодых учёных и специалистов

Современные проблемы физики

Минск, 4–6 ноября 2020

Плазменные параметры вблизи полого катода

Андреев С.Н., Бернацкий А.В., Очкин В.Н.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

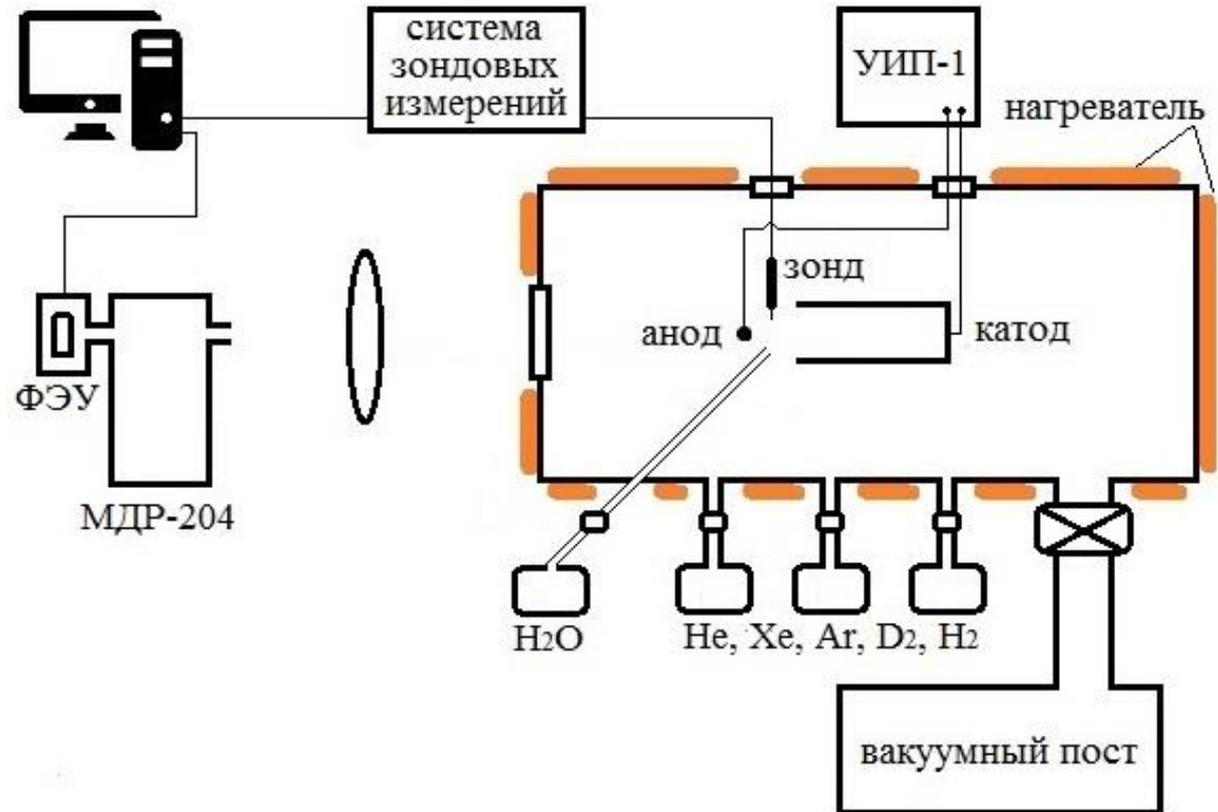
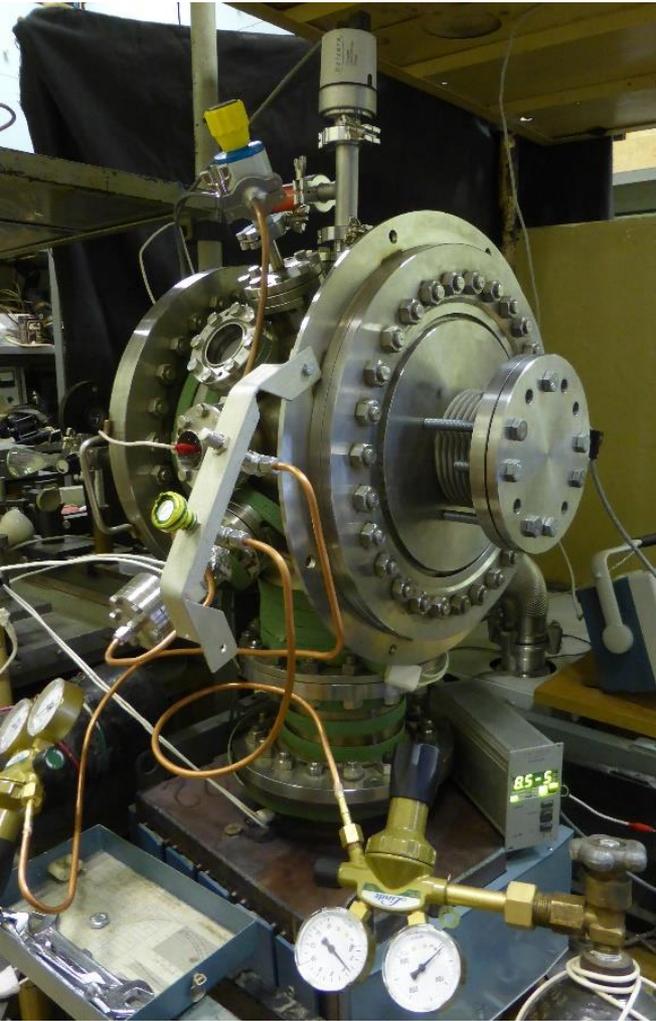
04.11.2020

Зондовые измерения давно известны в диагностике плазмы. При идеологической простоте, однако, получение плазменных параметров из вольт-амперной характеристики (ВАХ) на практике является непростой задачей. Ее оптимальное решение постоянно обсуждается в монографиях, обзорах, оригинальных работах и др. Проблема в том, что для установления ФРЭЭ необходимо провести двойное дифференцирование ВАХ, которая, в реальном эксперименте, может быть получена с большой ошибкой. Среди опубликованных на сегодня наилучших данных можно отметить результаты работ, где в отдельных случаях удается достичь динамического диапазона ФРЭЭ на уровне 3 порядков, однако подробности процедур и методов не описываются.

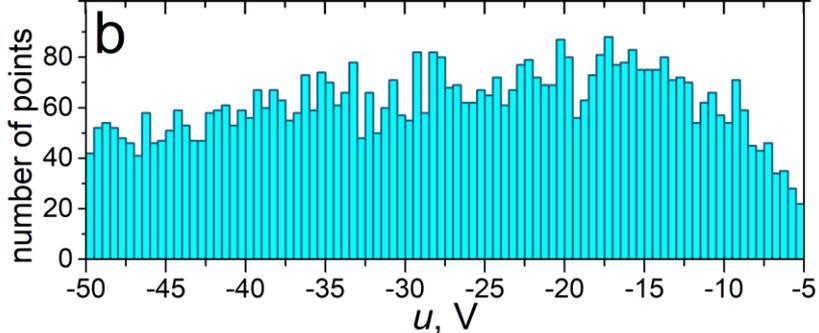
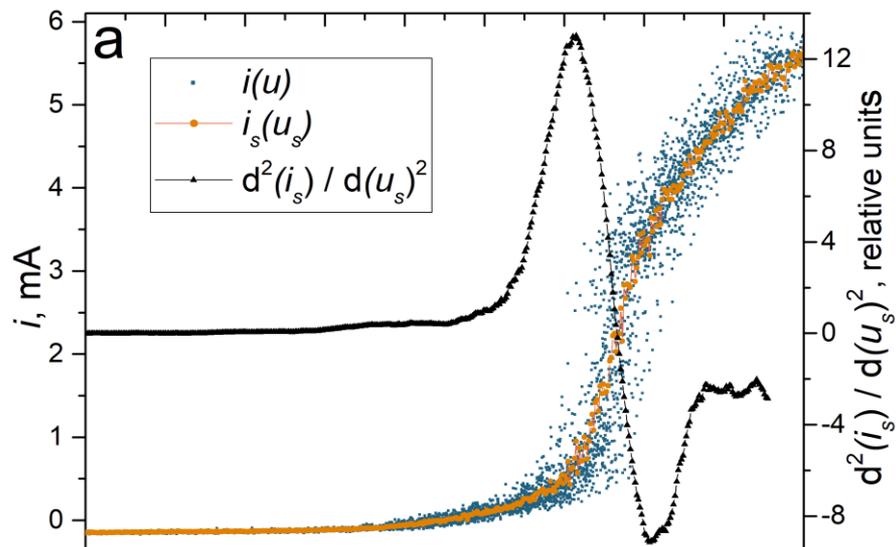
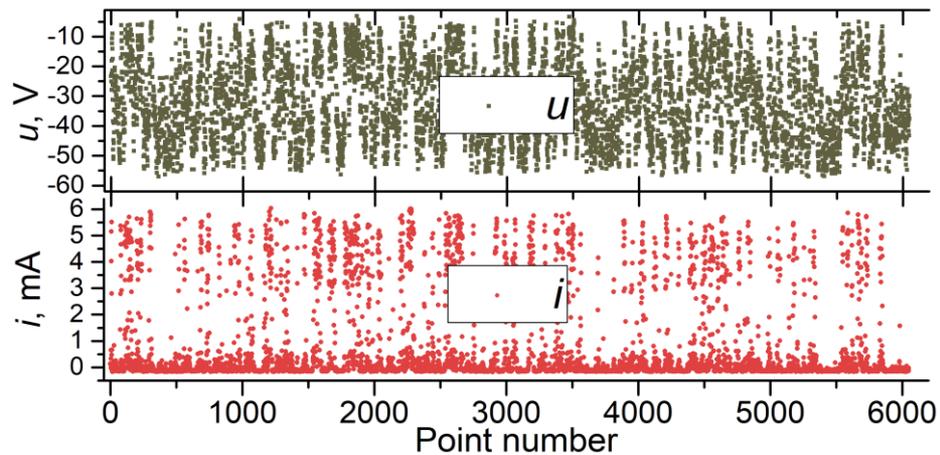
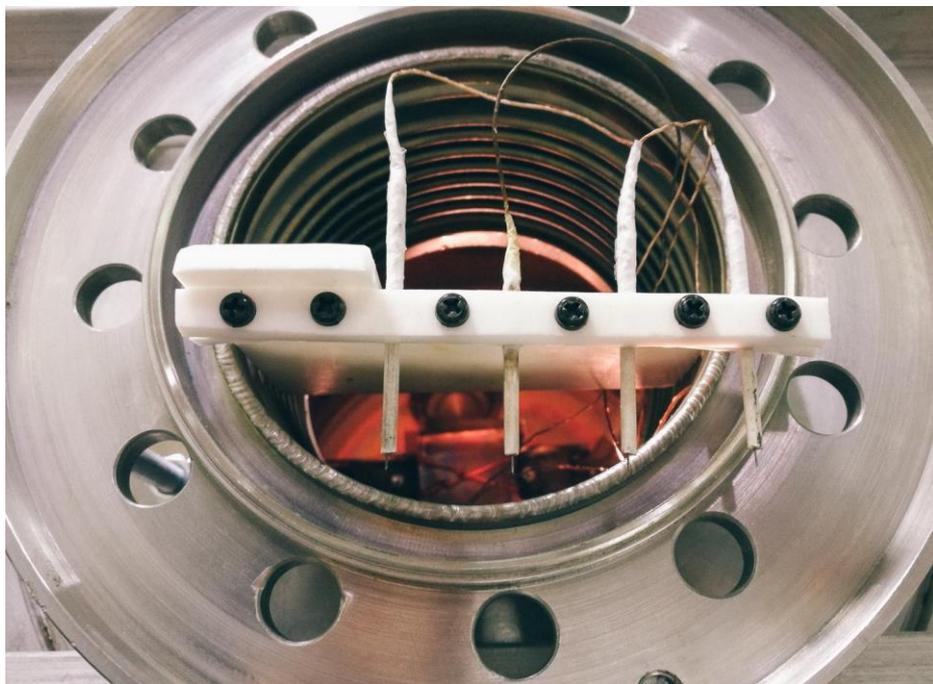
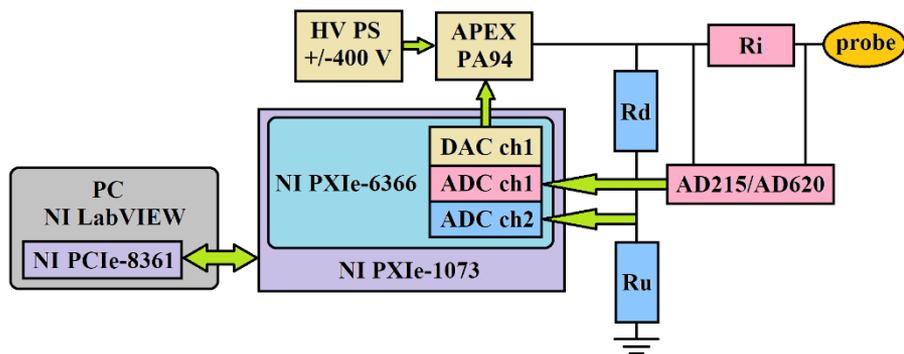
В последние годы нами разработан новый подход [1-3] формирования ВАХ на одиночном зонде Ленгмюра. Созданная зондовая система формирует ВАХ зондовой цепи, при подаче на зонд напряжения в виде шумового сигнала. Подавая на зонд сигнал, представляющий собой белый шум, удастся значительно уменьшить ошибки в определении ФРЭЭ по сравнению с традиционным периодическим сигналом (например, пилообразным или синусоидальным) [1, 3]. Если необходимо измерить определенную область ФРЭЭ с повышенной точностью, то возможно использовать комбинированные сигналы. Формировать ВАХ периодическим сигналом с малым количеством точек, а в область ВАХ, соответствующую интересующей области ФРЭЭ, подавать шумовой сигнал [1]. Можно, также, формировать ВАХ, используя шумовой сигнал с неравномерным распределением количества точек [2]. В [2] показано, что перераспределением количества точек, в хвост ФРЭЭ, удастся увеличить диапазон измерения ФРЭЭ как минимум на 5 эВ (при средней энергии электронов ~5.5 эВ). Предложенные подходы позволяют достичь 3-4 порядков динамического диапазона ФРЭЭ при сильно зашумленной ВАХ.

1. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin // Vacuum. 2020, V. 180, 109616 (9pp).
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>
2. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2020, V. 47, No. 10, P. 317-319. <https://doi.org/10.3103/10.3103/S1068335620100024>
3. S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin // Plasma Chemistry and Plasma Processing.
<https://doi.org/10.1007/s11090-020-10137-4>

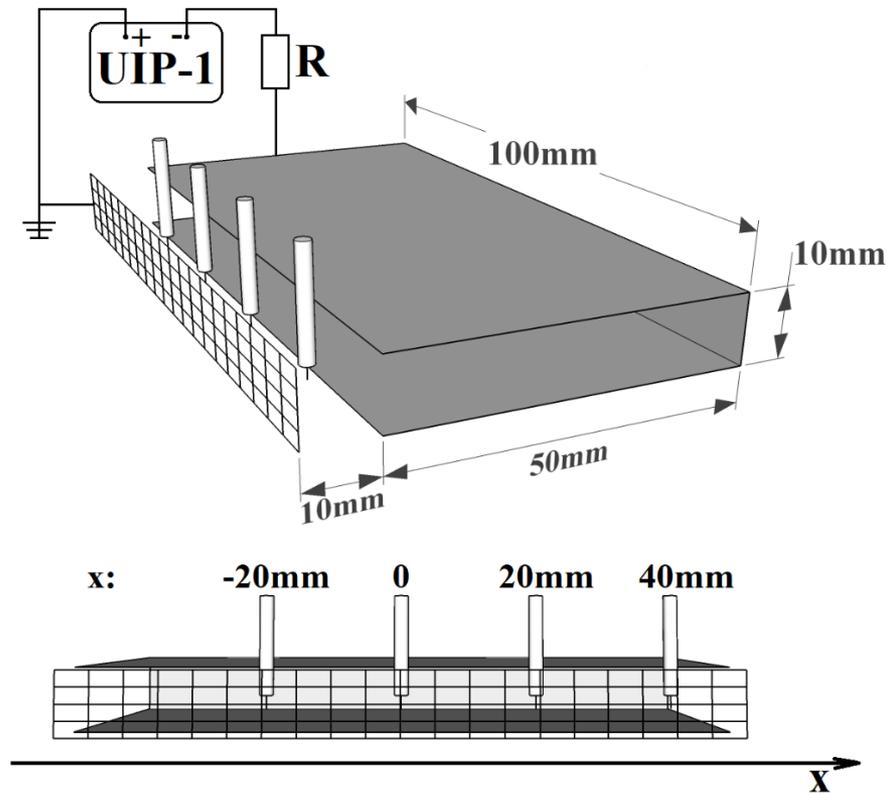
Экспериментальная установка Течь



Система зондовых измерений [1-3]



- расстояние от анода до открытой стороны катода – 10 мм
- зонды расположены вдоль открытой стороны катода



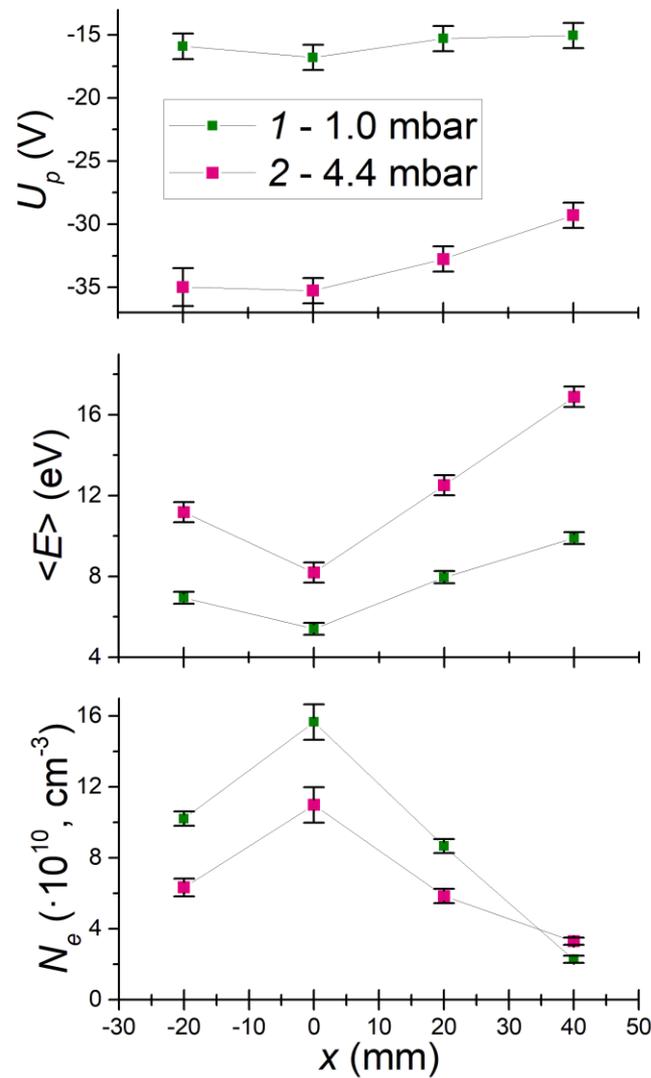
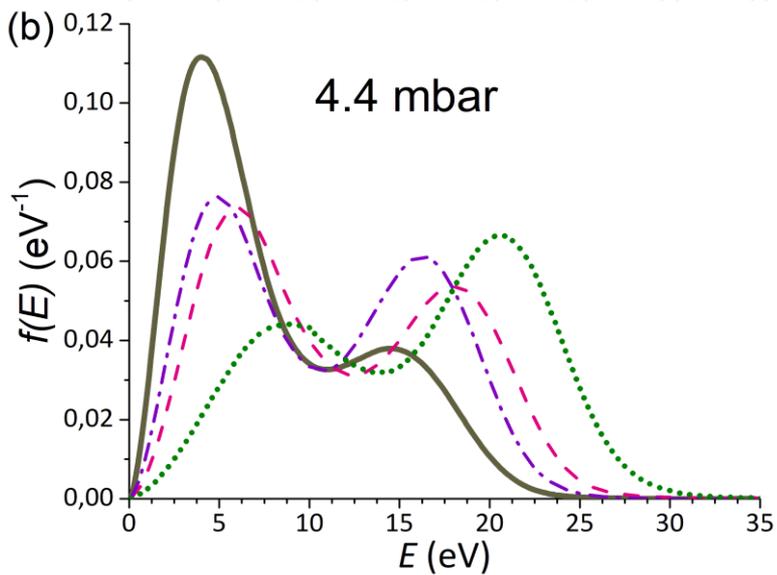
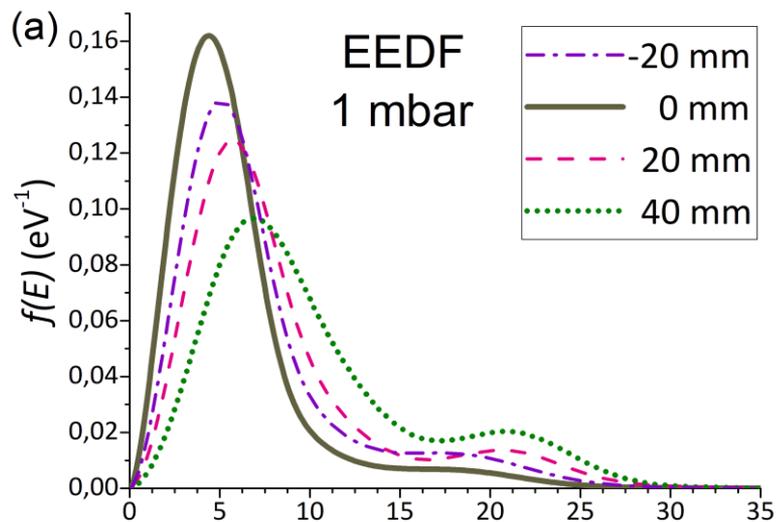
S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin.

The Langmuir probe measurements in a low-pressure discharge supported by hollow cathode using the combined periodic and noise sweep signals
 Vacuum. 2020, V. 180, 109616 (9pp). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>

Journal of Physics: Conference Series. 2019, V. 1370, 012011 (5pp)
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012011>

Разряд в He

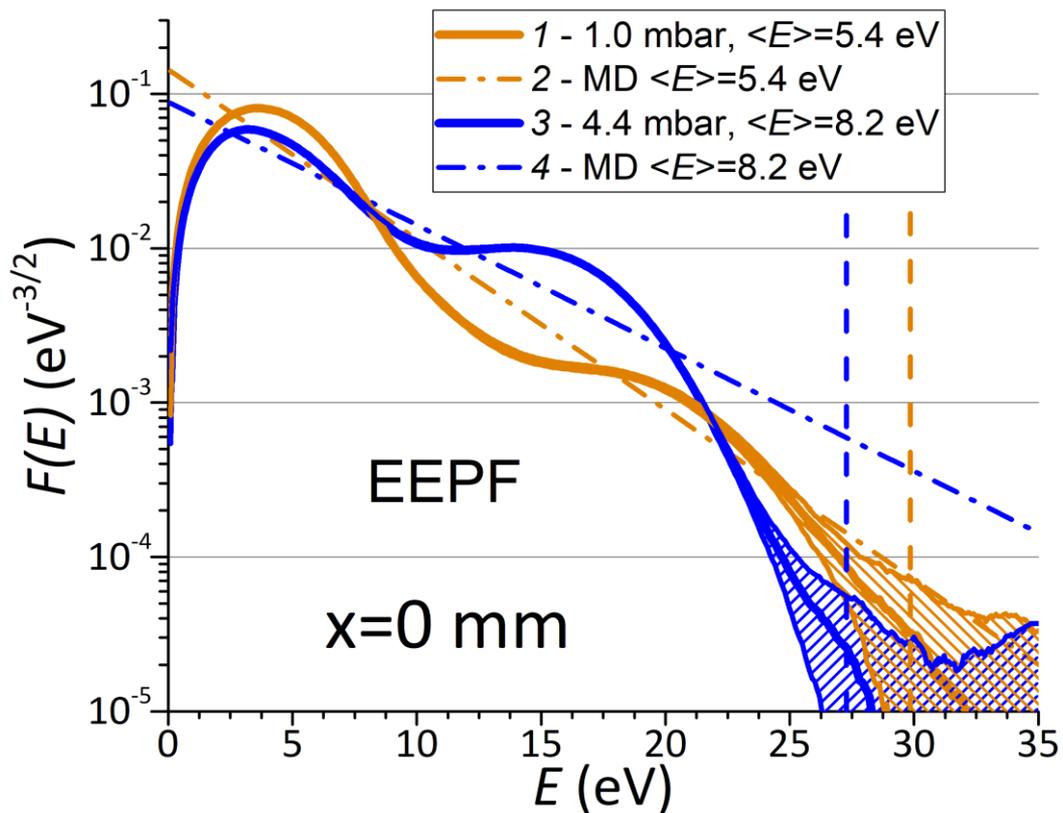
$I_d=218$ мА, U_d : (a) – 276 В; (b) – 261 В



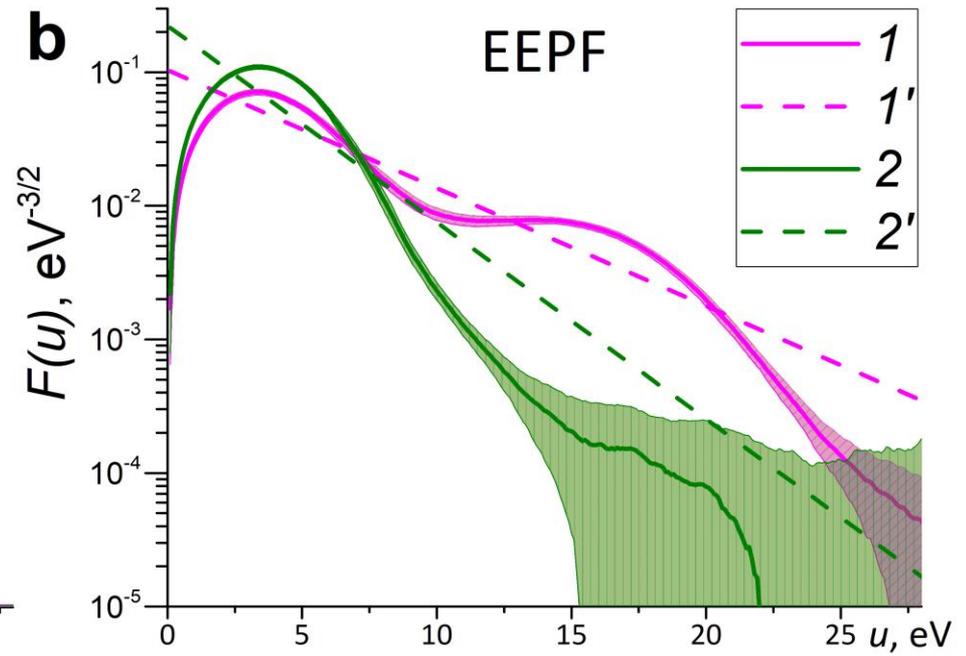
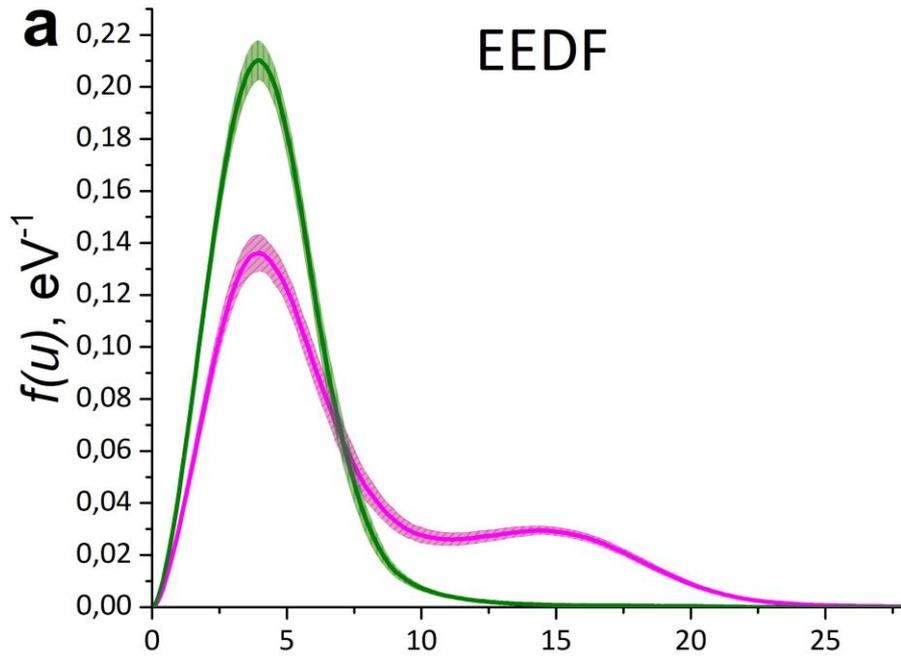
Разряд в He

$I_d=218$ mA, U_d : (1) – 276 В; (3) – 261 В

$$F(E) = E^{-1/2} \cdot f(E)$$



$p=2.9$ мбар, $Ud=283$ В



1 – разряд в He;

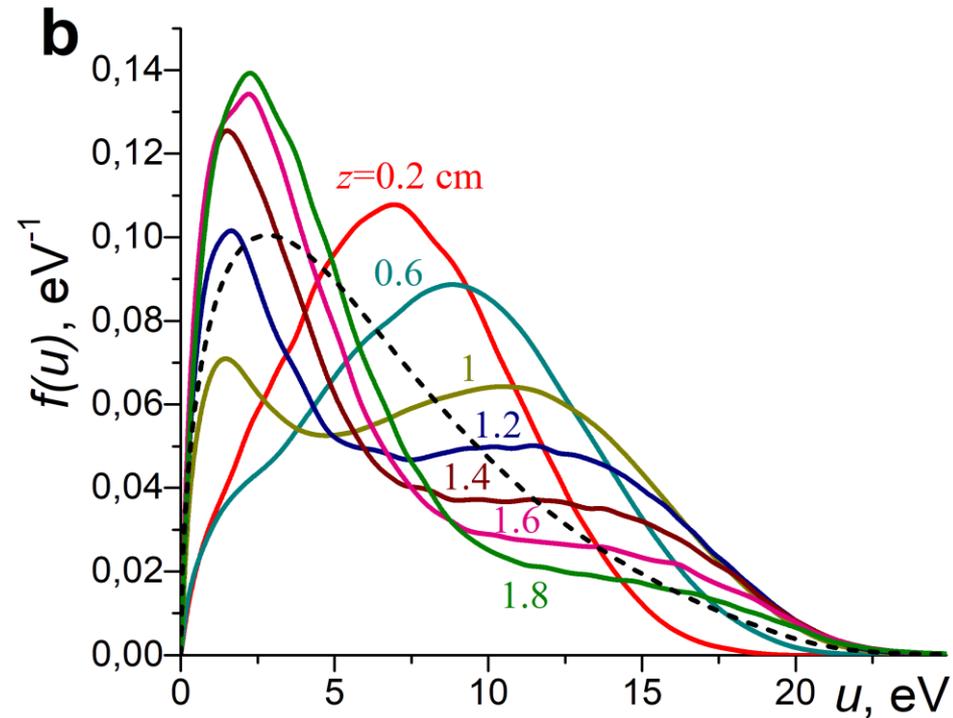
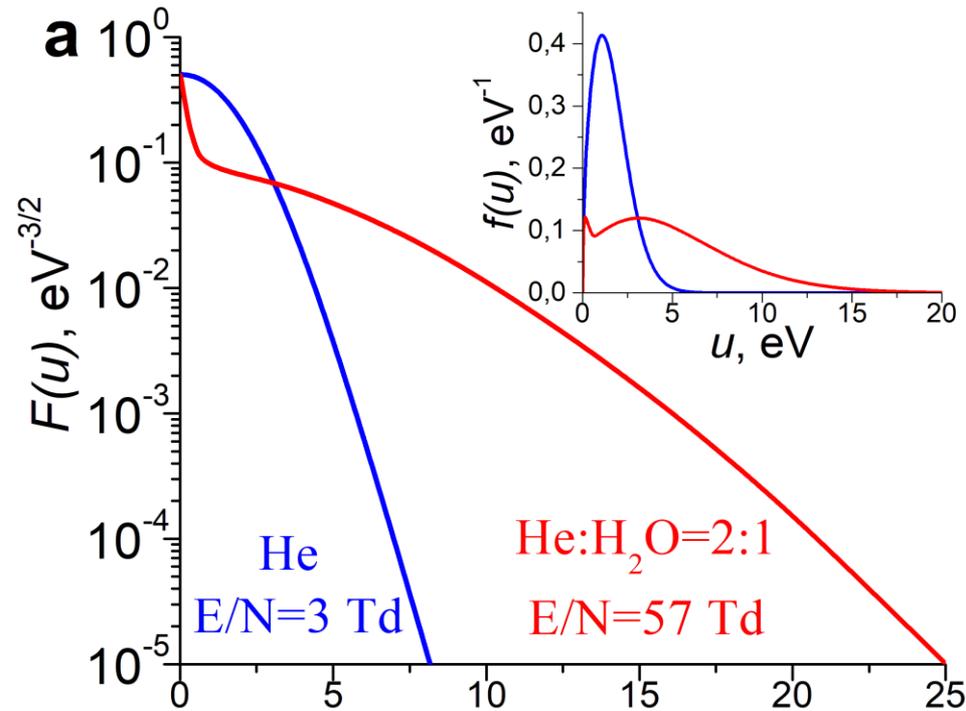
2 – разряд в He + H₂O (2:1);

1', 2' – Распределение Максвелла для средних энергий, соответствующих 1 и 2.

Результаты расчетов:

a – ФРЭЭ в He и смеси He:H₂O=2:1, рассчитанные для значений E/N , полученных в эксперименте, в рамках локального уравнения Больцмана;

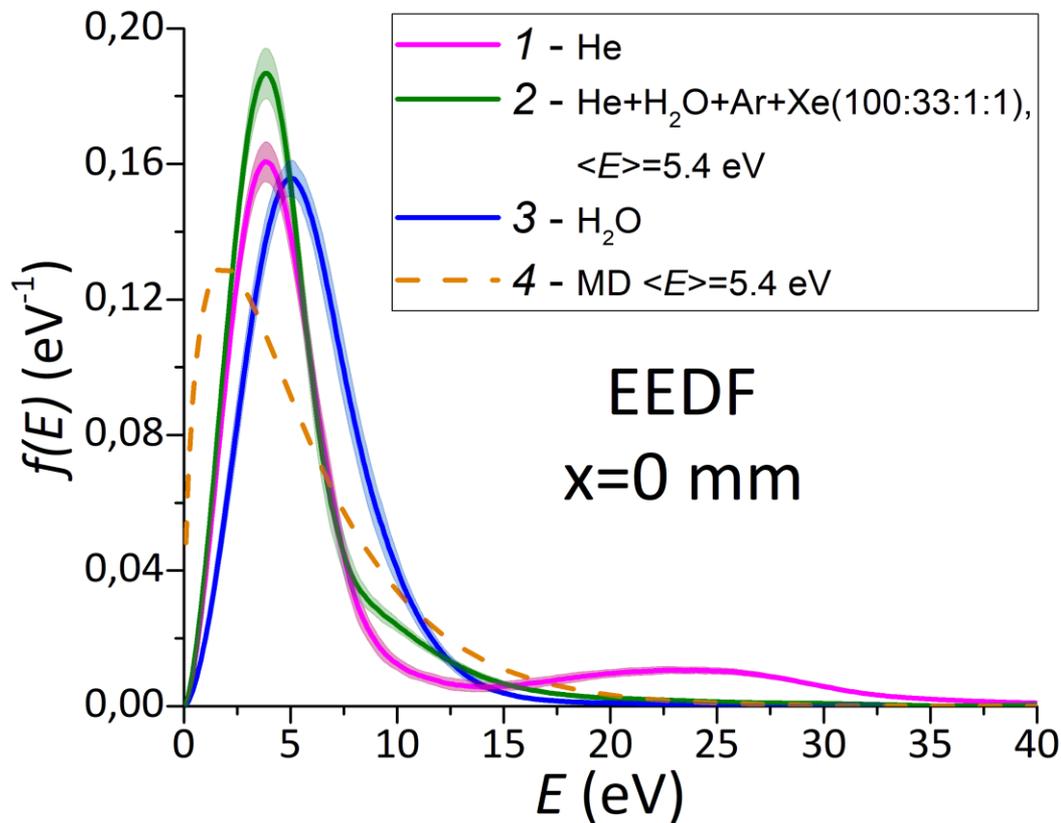
b – Изменение ФРЭЭ с расстоянием на отрезке $z \in [0.2, 1.8]$ см. Числа у кривых указывают расстояние от источника электронов, на котором рассчитывалась ФРЭЭ. Штриховая линия – установившаяся ФРЭЭ. He, $P = 2.9$ мбар, $T = 300$ К, $E = 10$ В/см.



S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, N.A. Dyatko, V.N. Ochkin

Electron parameters in a hollow cathode discharge plasma in He and He:H₂O mixture

Journal of Physics: Conference Series. 2020 (принято, в печати)



$p=1$ мбар, $Ud=301$ В

$$N_X = N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \frac{k_A}{k_X}$$

X (emitting state)	$k_X \cdot 10^{-11}, \text{cm}^3/\text{s}$		A (emitting state)	$k_A \cdot 10^{-11}, \text{cm}^3/\text{s}$		k_A/k_X	
	EEDF	Maxwell		EEDF	Maxwell	EEDF	Maxwell
H ₂ O (OH(A ² Σ))	22	30	Xe ((² P _{3/2} ⁰)6p)	6.8	9.5	0.311	0.312
H ((² S _{1/2})3s)	1.7	2.0	Ar ((² P _{3/2} ⁰)4p)	1.7	2.1	0.104	0.102
O (⁵ P _{1,2,3})	4.2	6.0	Xe ((² P _{3/2} ⁰)6p)	6.8	9.5	1.62	1.56

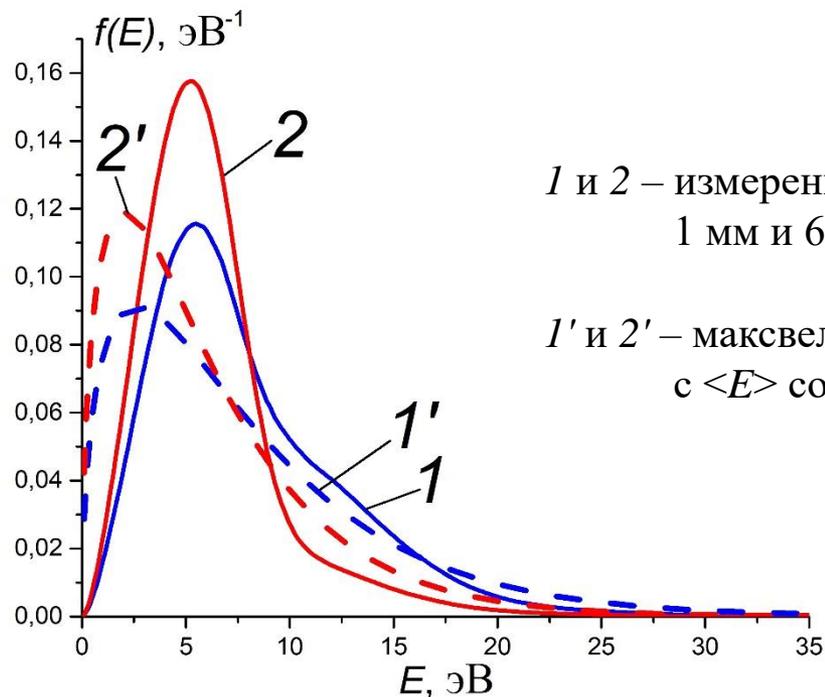
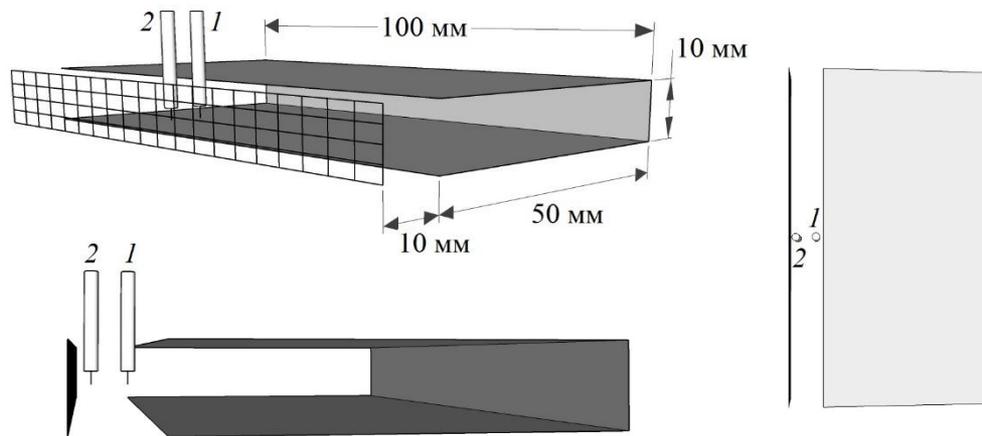
S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin.

The Langmuir probe measurements in a low-pressure discharge supported by hollow cathode using the combined periodic and noise sweep signals

Vacuum. 2020, V. 180, 109616 (9pp). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>

ТЕЗИСЫ

разряд в He, $p=1$ мбар
 $I_d=420$ мА, $U_d=340$ В



1 и 2 – измеренные ФРЭЭ на расстояниях
1 мм и 6 мм от катода.

$1'$ и $2'$ – максвелловские ФРЭЭ,
с $\langle E \rangle$ соответствующей экспериментальным 1 и 2 .

С.Н. Андреев, А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин

Плазменные параметры вблизи полого прямоугольного катода

Журнал прикладной спектроскопии. 2020 (направлено, на рецензии)

В ряде расчетно-теоретических работ было показано, что пространственная релаксация нелокальной ФРЭЭ в инертных газах (в частности, в гелии) в электрическом поле может иметь существенно нелокальный характер. При этом может формироваться ФРЭЭ с двумя максимумами. Результаты полученные в данной работе наглядно демонстрируют этот эффект. Электрон, двигаясь от катода к аноду, ускоряется полем. Достигая энергии >19.8 эВ (в случае разряда в He) он может принять участие в возбуждении электронных состояний, т.е. отдать энергию, равную энергии возбуждения первого возбужденного электронного уровня. Затем, под действием поля, его энергия снова будет увеличиваться. Таким образом, на разном расстоянии от катода ФРЭЭ будут иметь разный вид, в т.ч. разное количество максимумов. Очевидно, что на большом расстоянии от катода ФРЭЭ примет окончательный вид и перестанет трансформироваться при дальнейшем отдалении от катода.

Заключение

На ограниченном промежутке плазмы разряда, поддерживаемого полым катодом, экспериментально изучена пространственная трансформация вида энергетического распределения электронов. Использовался оригинальный метод одиночных зондов с формированием ВАХ одновременно напряжениями различной формы. Распределения существенно не максвелловские, с избытком быстрых электронов, уменьшающимся ближе к аноду, что говорит о нелокальности формирования электронного спектра.

Спасибо за внимание