

## Динамика плазмы двухчастотного емкостного разряда в смеси Ar/Xe

М.А. Богданова,<sup>1,\*</sup> Д.Г. Волошин,<sup>2,†</sup> А.В. Глозов,<sup>1</sup> Д.В. Лопаев,<sup>2</sup> Н.Н. Сысоев,<sup>1</sup> Д.Р. Шибанов<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 30.11.2023; после доработки 05.12.2023; подписана в печать 09.12.2023)

Исследована пространственно-временная динамика плазмы симметричного двухчастотного 81 МГц/1.76 МГц емкостного разряда под действием поля низкой частоты 1.76 МГц. С помощью метода фазово-разрешенной оптической эмиссионной спектроскопии получена динамика интенсивности излучения аргона и ксенона в плазме. Выполнены измерения функции распределения электронов по энергии в центре разряда с помощью зонда Ленгмюра и измерения плотности электронов с помощью СВЧ-зонда. Основным результатом является динамика отношений интенсивности выделенных линий аргона и ксенона в зависимости от разных условий: при давлениях 40, 200 и 400 мТорр, амплитуде напряжения НЧ 100, 200 и 400 В, вложенной мощности на 81 МГц 3 Вт и 15 Вт. Исследована динамика высокоэнергичных электронов на основе двухтемпературной аппроксимации функции распределения электронов по энергии.

PACS: 52.25.-b, 52.70.-m, 52.70.Kz. УДК: 533.9.07, 533.9.082.5.

Ключевые слова: плазма, емкостный разряд, спектроскопия, зонд Ленгмюра, СВЧ-зонд.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2410601](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2410601)

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире повсеместно используются устройства на основе микро- и нанотехнологий, начиная с промышленных установок, медицинского оборудования и транспорта и заканчивая предметами личного пользования. Во многом это определяется достижениями в области микроэлектроники. Большинство технологий производства микро- и наноструктур основаны на процессах взаимодействия высокочастотной (ВЧ) низкотемпературной плазмы низкого давления с поверхностью.

Одним из методов создания такой плазмы является использование реакторов с многочастотным ВЧ емкостным разрядом, когда плазма создается двумя и более частотами. Это способствует созданию плазмы большей плотности и более гибкому управлению её параметрами: потоком радикалов, а также потоком и энергетическим спектром ионов. Достижение необходимых характеристик технологического процесса в плазменных реакторах (например, анизотропии, селективности и пространственной однородности травления) требует детального понимания самих многочастотных разрядов, а именно эффектов, возникающих при использовании нескольких частот в плазме.

Известно, что возбуждение плазмы на нескольких частотах дает возможность разделить управление параметрами разряда [1]. Плотность плазмы

управляется вкладываемой мощностью на высокой частоте. При этом можно получить высокую плотность плазмы при приложении малого напряжения. В то же время, прикладывая дополнительно ВЧ-поле значительно более низкой частоты (НЧ, единицы и доли мегагерц) с большим напряжением, можно обеспечить управление напряжением на плазменном слое и тем самым энергией заряженных частиц, приходящих на обрабатываемую поверхность. В действительности нет полного разделения частот, и поэтому возникают различные эффекты их взаимодействия, например так называемый эффект связывания частот. Причины возникновения связывания частот могут быть различны. Одной из них является отклик ионов на изменение поля на низкой частоте.

В данной работе исследуется симметричный двухчастотный емкостной разряд с частотами 1.76 МГц и 81 МГц в смеси аргона с ксеноном. Частота 1.76 МГц достаточно низкая, чтобы ионы аргона откликались на неё, а отклик ионов ксенона заметно меньше. Движение ионов может повлиять на нагрев плазмы, функцию распределения ионов по энергии и структуру слоев.

В данной работе использовался метод наблюдения пространственно-временной динамики излучения специально выбранных состояний аргона и ксенона. Динамика ионов нелинейно воздействует на динамику поля в плазме и ФРЭЭ и тем самым на скорости возбуждения изучающих состояний атомов. Таким образом, наблюдая пространственно-временную динамику излучения и делая анализ этой динамики на основе самосогласо-

\* E-mail: [bogdanova.marya@mail.ru](mailto:bogdanova.marya@mail.ru)† E-mail: [dvoloshin@mics.msu.ru](mailto:dvoloshin@mics.msu.ru)

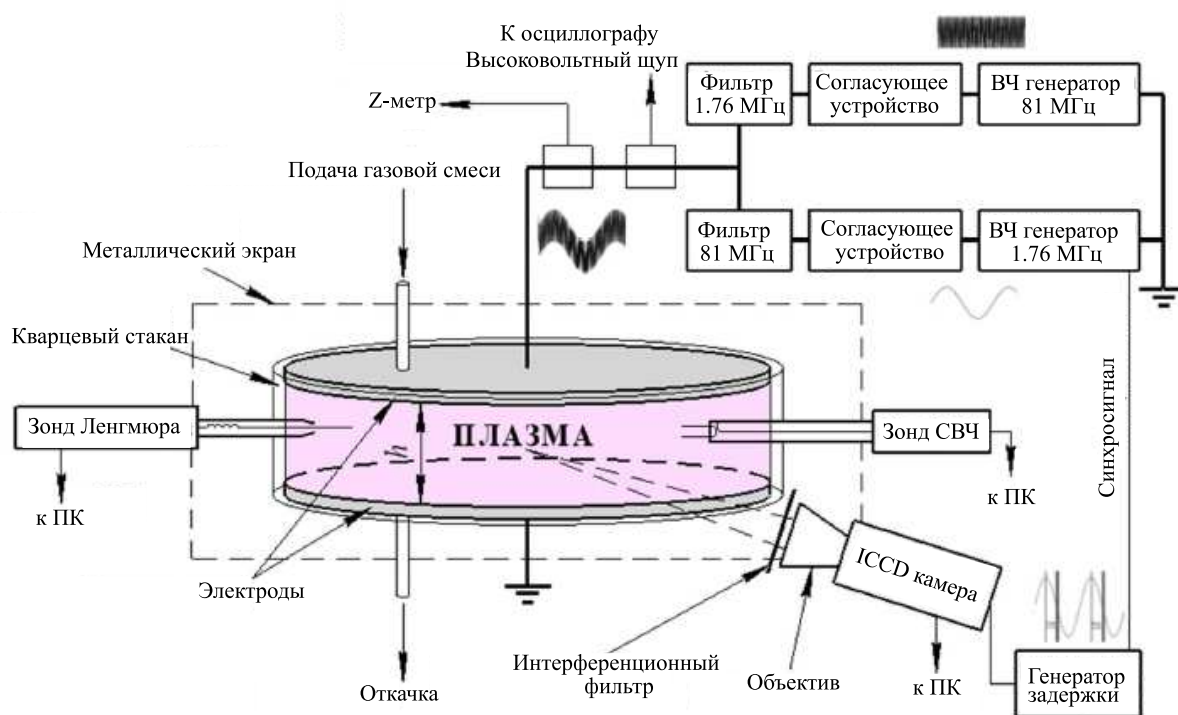


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ванной разрядной модели, можно изучать ионные динамические эффекты.

Изучение подобных эффектов затруднено из-за высокой скорости процессов (десятки и сотни наносекунд). Одним из возможных способов увидеть изменение разряда на временах порядка десятков наносекунд является метод фазово-разрешенной оптической эмиссионной спектроскопии (ФРОЭС). Суть метода заключается в том, что оптическая система делает измерение в определенные моменты на периоде низкой частоты. Накапливая данные с разным сдвигом по фазе в рамках периода НЧ, можно получить динамику интенсивности излучения в пространстве между электродами за период низкой частоты, что является фазовым разрешением.

Опубликованные исследования на тему ФРОЭС по большей части направлены на изучение пространственно-временной интенсивности излучения. Например, изучались эффект  $\gamma$ -электронов [2], влияние сдвига фазы между разными частотами [3] на структуру разряда и т.д. По сравнению с другими работами в данной работе исследуется пространственно-временная динамика отношения интенсивностей излучения атомами аргона (Ar) и ксенона (Xe), по аналогии с методом актинометрии [4, 5]. Так же, как и в методе актинометрии, справедливо соотношение

$$\frac{[Xe]}{[Ar]} = C_{Ar}^{Xe} \frac{I_{Xe}}{I_{Ar}},$$

где  $[Xe]$ ,  $[Ar]$ ,  $I_{Xe}$ ,  $I_{Ar}$  — концентрации и интенсивности свечения аргона и ксенона соответственно;  $C_{Ar}^{Xe}$  — при низком давлении ( $< 1$  Торр) — коэффициент, зависящий от функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ,  $F(E)$ ) и спектральной чувствительности оборудования.

Так как разница энергии возбуждения излучающих состояний аргона и ксенона порядка температуры электронов, а сами энергии близки к порогу ионизации, то наблюдение динамики отношения интенсивности излучения позволяет судить о пространственно-временной динамике хвоста ФРЭЭ в области потенциала ионизации, то есть о влиянии динамики ионов на ионизацию газа.

Целью данной работы является изучение пространственно-временной динамики функции распределения электронов по энергии в симметричном ВЧЕ-разряде.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИКИ

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Основными функциональными частями являются реактор с системой подачи и откачки газа, система генерации двухчастотного ВЧ-напряжения и набор используемых диагностик: зонды Ленгмюра и СВЧ, ПЗС-камера со стробируемым усилителем яркости.

В данном эксперименте использовался симмет-

ричный ВЧ-разряд, когда площади электродов равны. Это важно, чтобы избежать нелинейности плазменных слоев и генерации высоких гармоник также, как и постоянного автосмещения, приводящего к сильной неоднородности плазмы. Расстояние между электродами равно  $h = 18$  мм, а диаметр —  $D = 192$  мм, что должно обеспечить высокую симметричность разряда. Нижний электрод, как и внешний металлический экран, заземлены, а на верхний электрод подается высокочастотное напряжение 1.76 МГц и 81 МГц. Полость реактора по периметру ограничена кварцевым стаканом, что позволяет выполнять регистрацию оптического излучения. Газовая смесь подается сверху через систему расходомеров, а откачка осуществляется снизу турбомолекулярным насосом, что обеспечивает высокий постоянный проток и чистоту состава газа.

На боковой стенке камеры располагаются два вывода под инвазивные диагностики, а именно зонд Ленгмюра и сверхвысокочастотный (СВЧ) зонд. Измерения зондом Ленгмюра выполняются в центре разряда, в области квазинейтральной плазмы. СВЧ-зонд был смещен ближе к нижнему электроду, так что его область чувствительности затрагивала и приэлектродный слой, если он становился большим за счет подачи высокого напряжения низкой ВЧ-частоты.

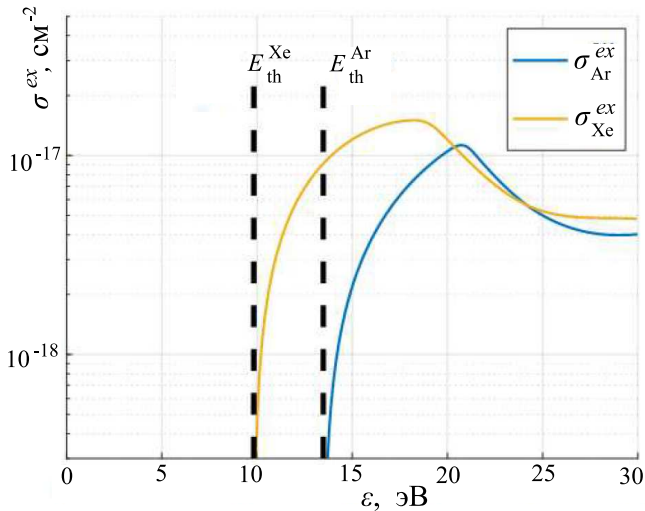


Рис. 2. Сечения возбуждения Ar и Xe вблизи порога возбуждения  $E_{th}$

Исследовалась смесь аргона (Ar) и ксенона (Xe) в соотношении  $[\text{Ar}]:[\text{Xe}] = 45:7$ . Соотношение газов подобрано так, чтобы интенсивности излучения  $I_{\text{Ar}}$  и  $I_{\text{Xe}}$  регистрируемых спектральных линий были близки. Ar и Xe — инертные газы, у которых порог возбуждения  $E_{th}$  отличается на энергию порядка  $T_e$ , где  $T_e$  — температура электронов в высокоэнергетичной области (в области хвоста) функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) [6, 7]. Характеристики выбранных оптических линий представлены в табл. 1, где также указаны  $\sigma_{max}^{ex}$  — величина максимума сечения и  $E_{max}$  — энергия максимума сечения.

На рис. 2 показаны сечения возбуждения выбранных уровней аргона и ксенона вблизи их порогов  $E_{th}$ .

Разряд исследовался при давлениях 40, 200 и 400 мТорр, чтобы получить принципиально отличающиеся формы ФРЭЭ: «би-максвелловскую», максвелловскую и схожую с дровестейновской. Основные режимы, исследуемые в данной работе, определяются комбинацией параметров: на частоте 1.76 МГц менялась амплитуда напряжения — 100 В, 200 В и 400 В, на частоте 81 МГц менялась вложенная мощность — 3 Вт и 15 Вт, также менялось давление газовой смеси — 40, 200 и 400 мТорр.

Для диагностики плазмы использовались СВЧ-зонд [10, 11], зонд Ленгмюра [12] и оптическая эмиссионная спектроскопия как усредненная по времени, так и разрешенная по периоду низкой частоты.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для измерения плотности электронов  $n_e$  использовался СВЧ-зонд (hairpin probe) [13, 14]. На рис. 3, а показана зависимость средней плотности плазмы от давления при разном напряжении на частоте 1.76 МГц. Были проведены измерения динамики плотности плазмы в центре разряда при подаче низкой частоты. На рис. 3, б приведен пример подобных измерений для давления 40 мТорр и при подаче 200 В на 1.76 МГц. Как видно из рис. 3, б, плотность электронов  $n_e$ , осциллирует с НЧ около среднего значения ( $9 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ ) с модуляцией порядка 15%. Период низкой частоты 1.76 МГц равен 568 нс. В течение одного периода  $n_e$  на рис. 3, б имеет только один максимум. В случае измерений в квазинейтральной области в центре разряда в течение одного периода низкой частоты плотность плазмы имела бы 2 максимума (хотя относительная величина такой модуляции может быть крайне мала в рассматриваемых условиях). На рис. 3, б модуляция  $n_e$  происходит один раз за период низкой частоты вследствие проникновения приэлектродного ВЧ-слоя в область СВЧ-зонда, так как параметры разряда на рис. 3, б соответствуют значительным размерам слоя — малая мощность на высокой частоте, малое давление газа и большое напряжение на низкой частоте.

Показанные на рис. 3, б изменения  $n_e$  по периоду низкой частоты являются примером значительной модуляции  $n_e$  среди рассматриваемых режимов. При этом, как будет показано далее, относительные изменения  $n_e$  даже в этом случае меньше относительных изменений интенсивности излучения исследуемых спектров аргона и ксенона, а также отношений линий Ar и Xe. Можно сделать вывод, что под действием НЧ меняется прежде всего форма ФРЭЭ, особенно её «хвост» (для краткости далее так будет обозначаться высокотемпературная часть ФРЭЭ с соответствующей температурой  $T_{tail}$ ), влияющая на скорость возбуждения излучающих состояний Ar и Xe. При этом интегрально ФРЭЭ,

Таблица 1. Характеристики исследуемые линии Ag [8] и Xe [9]

Газ	Переход	$\lambda$ , нм	$E_{th}$ , эВ	$\sigma_{max}^{ex}$ , $\text{см}^{-2} \times 10^{-19}$	$E_{max}$ , эВ
Ag	3p54p $\rightarrow$ 3p54s	750.3	13.48	111	20.8
Xe	5p56p $\rightarrow$ 5p56s	823.1	9.83	150	18.4

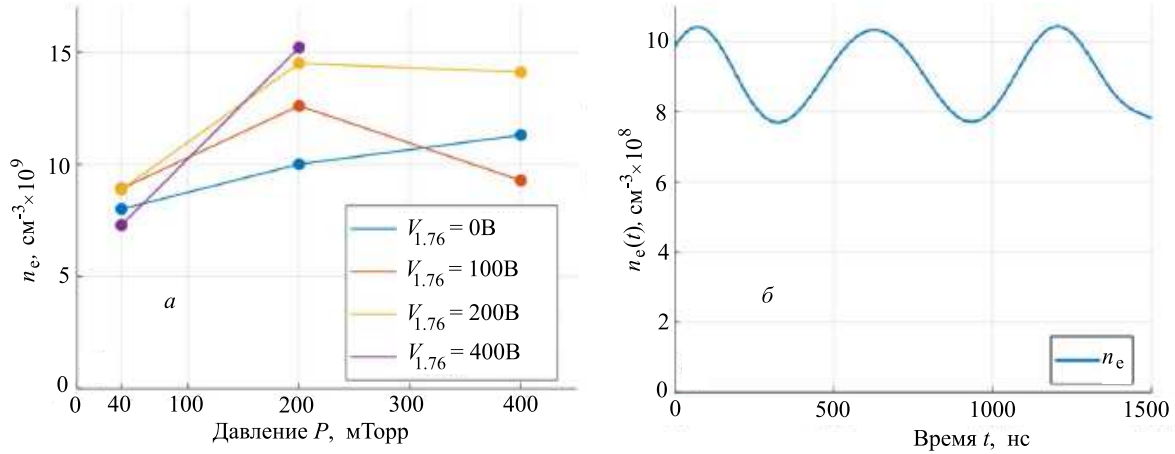


Рис. 3. Зависимость плотности электронов от давления при разной амплитуде напряжения на частоте 1.76 МГц (а); динамика плотности электронов при давлении 40 мТорр, 3 Вт мощности на 81 МГц, 200 В амплитуды напряжения на 1.76 МГц (б)

как видно из рис. 3, б, меняется не сильно. Чем выше давление, тем меньше по амплитуде осцилляции плотности электронов в области квазинейтральной плазмы. При приложении достаточно высокого НЧ-напряжения появлялись широкие плазменные слои около электродов. При этом ближе к слоям интенсивность излучения и ее осцилляция сильно возрастала. При низком давлении (40 мТорр) это возрастание наблюдалось и в центре, где осцилляция плотности плазмы были очень малы. По этой причине в дальнейшем анализе результатов предполагалось, что под действием НЧ-поля меняется прежде всего форма ФРЭЭ в области её хвоста, т.е. температура в хвосте,  $T_e^{tail}$ .

Функция распределения электронов по энергии была получена из второй производной вольт-амперной характеристики, измеренной зондом Ленгмюра [15]. Были получены три принципиально отличающиеся формы ФРЭЭ: би-максвелловская при 40 мТорр, максвелловская при 200 мТорр и схожая с дровестейновской при 400 мТорр. Данные ФРЭЭ показаны на рис. 4.

Учитывая вышесказанное о малых осцилляциях  $n_e$ , и преобладающей осцилляции хвоста ФРЭЭ, для наглядности анализа и интерпретации полученных результатов аппроксимация ФРЭЭ выполнялась двумя функциями Максвелла так, чтобы основное тело ФРЭЭ, представленное функцией Максвелла с температурой  $T_e^{body}$ , оставалось неизменным до точки перегиба при энергии  $\epsilon_{пер}$ , в то время как при энергии электрона больше  $\epsilon_{пер}$ , ФРЭЭ с другой температурой хвоста  $T_e^{tail}$  осцил-

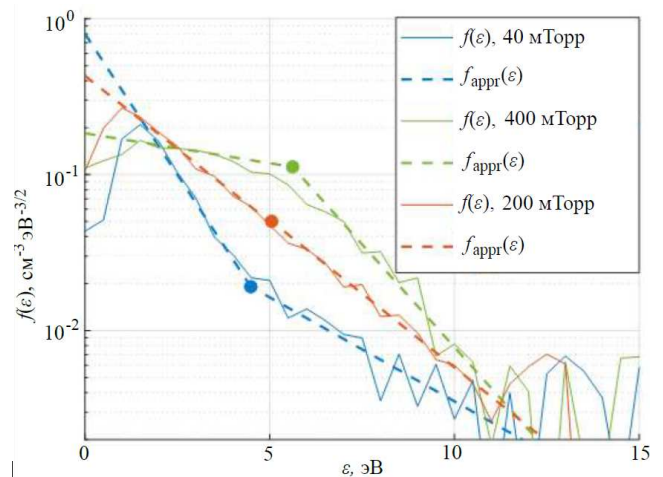


Рис. 4. ФРЭЭ и её аппроксимация при разном давлении, 15 Вт мощности на 81 МГц и 0 Вт на 1.76 МГц

лировала бы с НЧ. Тогда в дальнейшем можно проследить, как меняется температура хвоста  $T_e^{tail}$  во времени и пространстве. Точка перегиба  $\epsilon_{пер}$  определялась по измеренной ФРЭЭ так, чтобы аппроксимация максимально описывала её форму (см. рис. 4). При низком давлении, в случае «би-Максвелловской» ФРЭЭ, такая форма ФВРЭЭ является следствием нелокальности электронной кинетики в ВЧЕ разряде [1], когда более холодные электроны тела ФРЭЭ заперты в квазинейтральной центральной части разряда, а более горячие электроны хвоста, достигающие плазменных при-

электродных слоев, как раз и испытывают действие НЧ. Аппроксимированная ФРЭЭ имеет следующий вид:

$$f_{appr}(\varepsilon) = \begin{cases} A_{body} \times \exp\left(\frac{-\varepsilon}{T_e^{body}}\right), & \text{где } \varepsilon < \varepsilon_{пер} \\ A_{tail} \times \exp\left(\frac{-\varepsilon}{T_e^{tail}}\right), & \text{где } \varepsilon > \varepsilon_{пер} \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_{body}$  и  $A_{tail}$  — коэффициенты нормировки такие, чтобы  $\int_0^\infty f(\varepsilon)\sqrt{\varepsilon}d\varepsilon = 1$ .

Используя данное приближение, была определена средняя температура электронов в хвосте  $T_e^{tail}$  и в основном теле  $T_e^{body}$  ФРЭЭ при вложенной мощности на 81 МГц 15 Вт (см. табл. 2).

Большое значение  $T_e^{body} = 11.3$  эВ при 400 мТорр связано с используемой двухтемпературной аппроксимацией для ФРЭЭ. При 400 мТорр форма ФРЭЭ не максвелловская, а дрювстейновская с высоким значением  $T_e^{body}$  до энергии чуть больше 5 эВ, а далее до ионизационного порога с очень низкой  $T_e^{tail} = 1.6$  эВ. Такая ФРЭЭ, близкая к классической форме ФРЭЭ Дрювстейна, характерна для высокого давления благородного газа.

Таблица 2. Температура электронов в зависимости от давления

	40 мТорр	200 мТорр	400 мТорр
$T_e^{body}$	1.2 эВ	2.2 эВ	11.3 эВ
$T_e^{tail}$	3.3 эВ	2.3 эВ	1.6 эВ

Порог возбуждения  $E_{th}$  атомов Ar и Xe находится на хвосте ФРЭЭ, следовательно, пространственно-временную динамику хвоста ФРЭЭ (температуры  $T_e^{tail}$ ) можно изучить, наблюдая динамику отношения интенсивностей излучения  $I_{Ar}$  и  $I_{Xe}$ . Время жизни исследуемых возбужденных состояний Ar и Xe сильно меньше периода НЧ, так что разрешение по фазе динамики отношения интенсивностей позволяет наблюдать пространственно-временную динамику возбуждения Ar и Xe и соответственно  $T_e^{tail}$ , в межэлектродном пространстве внутри периода НЧ. А так как порог ионизации близок к порогу возбуждения исследуемых линий, можно сказать, что будет наблюдаться и пространственно-временная динамика ионизации.

Предполагалось, что основное тело функции неподвижно, а температура хвоста ФРЭЭ периодически меняется под действием приложенного напряжения НЧ.

Из отношения интенсивностей спектроскопических сигналов можно записать следующее соотношение:

$$\frac{[Xe]}{[Ar]} = C_{Ar}^{Xe} \frac{I_{Xe}}{I_{Ar}},$$

где  $[Xe]$ ,  $[Ar]$ ,  $I_{Xe}$ ,  $I_{Ar}$  — концентрации и интенсивности свечения исследуемого Xe и Ar соответственно,  $C_{Ar}^{Xe}$  — коэффициент, зависящий от функции

распределения электронов по энергии (ФРЭЭ,  $F()$ ) и спектральной чувствительности оборудования [6].  
Причем

$$C_{Ar}^{Xe} = \Lambda_{Ar}^{Xe} \frac{k_{ex}^{Ar}}{k_{ex}^{Xe}} \sim \frac{k_{ex}^{Ar}}{k_{ex}^{Xe}},$$

где  $k_{ex}^{Xe}$  и  $k_{ex}^{Ar}$  — константы скорости возбуждения электронным ударом Xe и Ar соответственно,  $\Lambda_{Ar}^{Xe}$  — относительная спектральная чувствительность оборудования на линиях излучения Xe и Ar, определяется параметрами оптической системы и во времени не меняется,  $\Lambda_{Ar}^{Xe}(t) = const$ .

Константы скорости возбуждения определяются следующим образом:

$$k_{ex}^X = \left(\frac{2e}{m_e}\right)^{1/2} \int_{E_{th}}^\infty \sigma_{ex}^X(\varepsilon) f(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon,$$

где  $\int_0^\infty f(\varepsilon)\sqrt{\varepsilon}d\varepsilon = 1$ ,  $\sigma_{ex}^X(\varepsilon)$  — сечение возбуждения  $[X]$  с энергией электронов  $\varepsilon$ ,  $f(\varepsilon)$  — функция вероятности распределения электронов по энергии и связана с ФРЭЭ соотношением  $f(\varepsilon) = \frac{F(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}}$ ,  $m_e$  — масса электрона,  $e$  — заряд электрона,  $E_{th}$  — порог возбуждения.

Из вышесказанного следует отметить, что:

$$\frac{I_{Ar}}{I_{Xe}} \sim \frac{k_{ex}^{Ar}}{k_{ex}^{Xe}}.$$

Были рассчитаны отношения констант скорости возбуждения  $\frac{k_{ex}^{Ar}}{k_{ex}^{Xe}}$  для каждой формы ФРЭЭ как функции  $T_e^{tail}$ . Оказалось, что фактически это одна и та же зависимость. Она представлена на рис. 5. Точки на рис. 5 показывают отношения констант скорости возбуждения при средней по времени температуре  $T_e^{tail}$ , измеренной зондом Ленгмюра. Таким образом, выполнялась нормировка зависимости  $\frac{k_{ex}^{Ar}}{k_{ex}^{Xe}}$  по температуре.

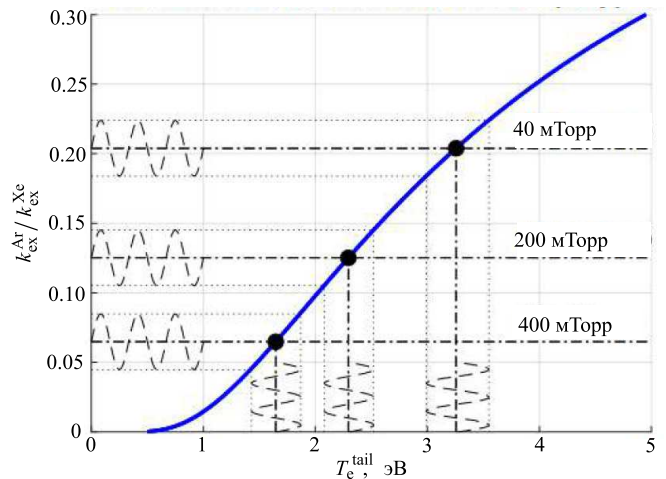


Рис. 5. Связь отношения констант скорости возбуждения от  $T_e^{tail}$

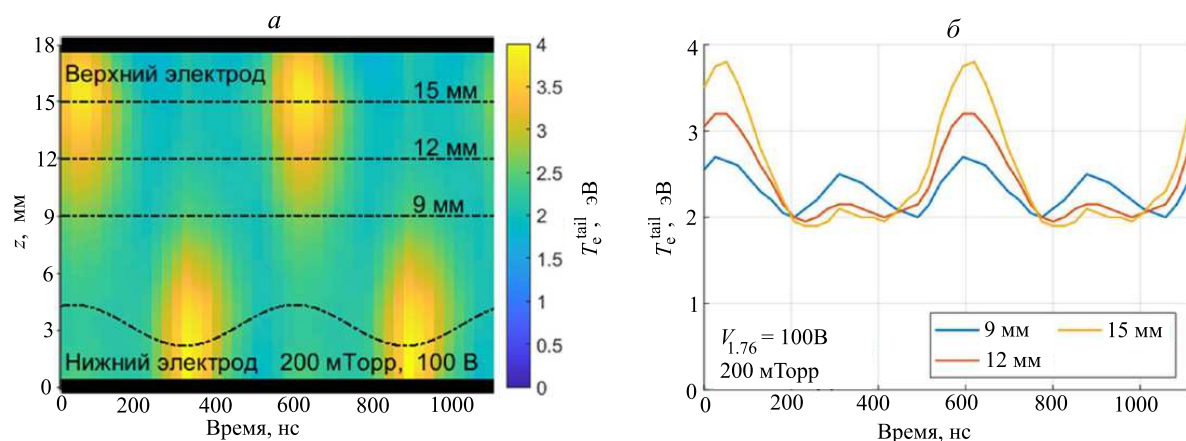


Рис. 6. Пространственно-временное представление изменения температуры  $T_e^{tail}$  при давлении 200 мТорр, напряжении НЧ 100 В, мощности 3 Вт на частоте 81 МГц

При использовании графика перевода отношения констант скорости возбуждения в температуру  $T_e^{tail}$  (рис. 5) была получена динамика высокоэнергетичной части ФРЭЭ, показанная на рис. 6. Использованный метод не позволяет посмотреть на то, что происходит у поверхности электродов, так как в данной области сильно снижается концентрация электронов.

Из рис. 6 видно, что пространственно-временная динамика динамики  $T_e^{tail}$  (а также и отношения интенсивностей излучения аргона и ксенона) сильно зависит от приложенного НЧ-напряжения, причем в данном разряде осцилляция отношения интенсивностей несимметрична. Выделяются участки возрастания отношения интенсивности в определённую фазу НЧ, а в остальное время отношения близки к константе, это значит, что происходит сильное изменение профиля ФРЭЭ и атомы аргона получают возможность интенсивно возбуждаться. Возможными причинами, помимо прочего, могут быть эффекты, связанные с движением ионов под действием низкой частоты.

ФРОЭС как метод диагностики не позволяет выполнять количественный анализ достаточно точно, но дает хорошие возможности качественного наблюдения происходящих в плазме процессов во времени и пространстве.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был реализован метод фазово-разрешенной оптической эмиссионной спектроско-

пии диагностики плазмы. Он позволил наблюдать пространственно-временную динамику интенсивности излучения аргона и ксенона в плазме на выделенных спектральных линиях. Были также выполнены зондовые измерения: зондом Ленгмюра и СВЧ-зондом, для определения плотности электронов  $n_e$  и ФРЭЭ в центре разряда.

Проведено качественное рассмотрение пространственно-временной динамики плазмы симметричного двухчастотного (81 МГц + 1.76 МГц) высокочастотного емкостного разряда под действием поля низкой частоты (1.76 МГц). Основным результатом является динамика отношений интенсивности выделенных линий аргона и ксенона в зависимости от разных условий: при давлениях 40, 200 и 400 мТорр, амплитуде напряжения НЧ 100, 200 и 400 В, вложенной мощности на 81 МГц 3 Вт и 15 Вт. Так как наблюдаемые линии находятся в хвосте ФРЭЭ, то проведено качественное рассмотрение динамики  $T_e^{tail}$  на основе двухтемпературной аппроксимации ФРЭЭ.

Для дальнейшего анализа полученных результатов будет использован более строгий подход, основанный на сравнении с результатами моделирования в рамках кинетической самосогласованной модели симметричного двухчастотного ВЧ-разряда.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23А-Ш06-06 и гранта Президента РФ № МК-4610.2022.1.2.

- [1] Lieberman M., Lichtenberg A. Principles of plasma discharges and materials processing. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] Schulze J., Schungel E., Donko Z., Luggenholcher D.D. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 124016. (2010).
- [3] Gans T., O'Connell D., Schulz-von der Gathen V., Waskoenig J. // *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 034010. (2010).
- [4] Schulze J., Gans T., O'Connell D., Czarnetzki U. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 7008. (2007).
- [5] Lopaev D.V., Volynets A.V., Zyryanov S.M., Zotov A.I. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 075202. (2017).
- [6] Czerwiec T., Graves D.B. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, 2827. (2004).

- [7] *Tsurubuchi, S., Miyazaki T., Mot K.* // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **29**, 1785. (1996).
- [8] *Chilton E.J., Boffard J.B., Schapp R.S.* // *Phys. Rev. A.* **57**, 267. (1998).
- [9] *Fons J.T., Lin C.C.* // *Phys. Rev. A.* **58**, 4603. (1998).
- [10] *Heald M.A., Wharton C.B.* Plasma diagnostics with microwaves, John Wiley & Sons Inc., 1965.
- [11] *Ford K.A.* Pulsing Plasmas to Expand the Diagnostic Capabilities of Microwave Probes and Optical Emission, North Carolina State University ProQuest Dissertations Publishing, 2020.
- [12] *Mott-Smith H.M., Langmuir I.* // *Phys. Rev.* **28**, 727. (1926).
- [13] *Sirse N.* Resonance hairpin probe for electronegative plasma diagnostics. The school of physical sciences Dublin City University, 2013.
- [14] *Curley G.* The dynamics of the charged particles in a dual frequency capacitively coupled dielectric etch reactor. Ecole Polytechnique X, 2008.
- [15] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992.

## Dynamics of plasma in a dual-frequency capacitive discharge in an Ar/Xe mixture

M.A. Bogdanova<sup>1,a</sup>, D.G. Voloshin<sup>2,b</sup>, A.V. Glotov<sup>1</sup>, D.V. Lopaev<sup>2</sup>, N.N. Sysoev<sup>1</sup>, D.R. Shibanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)*

*Moscow 119191, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>bogdanova.marya@mail.ru, <sup>b</sup>dvoloshin@mics.msu.su*

The spatiotemporal dynamics of the plasma of a symmetrical dual-frequency 81 MHz/1.76 MHz capacitive discharge under the influence of a low-frequency field of 1.76 MHz has been studied. Using the method of phase-resolved optical emission spectroscopy, the dynamics of the radiation intensity of argon and xenon in plasma was obtained. The electron energy distribution function at the center of the discharge was measured using a Langmuir probe and the electron density was measured using a microwave probe. The main result is the dynamics of the intensity ratios of the selected argon and xenon lines depending on different conditions: at pressures of 40, 200 and 400 mTorr, LF voltage amplitude of 100, 200 and 400 V, input power at 81 MHz of 3 W and 15 W. The dynamics of high-energy electrons is studied based on a two-temperature approximation of the electron energy distribution function.

PACS: 52.25.-b, 52.70.-m, 52.70.Kz.

*Keywords:* plasma, capacitive discharge, spectroscopy, Langmuir probe, microwave probe.

*Received 30 November 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2024. **79**, No. 1. Pp. 75–81.

### Сведения об авторах

1. Богданова Мария Андреевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-40-64, e-mail: [bogdanova.marya@mail.ru](mailto:bogdanova.marya@mail.ru).
2. Волошин Дмитрий Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, вед науч сотрудник; тел.: (495) 939-41-02, e-mail: [dvoloshin@mics.msu.su](mailto:dvoloshin@mics.msu.su).
3. Глотов Александр Вячеславович — аспирант; тел.: (495) 939-40-64, e-mail: [alnonim@mail.ru](mailto:alnonim@mail.ru).
4. Лopaев Дмитрий Викторович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-64, e-mail: [lopaev@dnph.phys.msu.ru](mailto:lopaev@dnph.phys.msu.ru).
5. Сысоев Николай Николаевич — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, профессор; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: [nn.sysoev@physics.msu.ru](mailto:nn.sysoev@physics.msu.ru).
6. Шибанов Даниил Романович — аспирант; тел.: (495) 939-40-64, e-mail: [danshibanov@gmail.com](mailto:danshibanov@gmail.com).