

УДК:539.141;537.868

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОТОЧНОМ КБР
В СМЕСЯХ He + Ar, He + Xe****Ю.С. Акишев, Г.И. Апонин, М.Е. Грушин, В.Б. Каральник, И.В. Кочетов,
А.В. Петряков, Н.И. Трушкин***ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл.12
E-mail: trushkin@triniti.ru**Аннотация**

В этой статье представлены результаты экспериментальных исследований комбинированного барьерного разряда (КБР) в смесях инертных газов. Ток высокого режима КБР было вызвано наложением импульса высокого напряжения с коротким передним фронтом на стационарный синусоидальный разряд диэлектрического барьера. Показано, что наложение высоковольтного импульса на определенную фазу синусоидального напряжения может увеличить плотность плазмы разряда до $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Ключевые слова: плазма, генерация, плотность, газ, давление, комбинированный барьерный разряд

Введение

Разработка новых методов генерации пространственно однородной неравновесной низкотемпературной плазмы высокой плотности (на уровне $n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$) на большой площади при средних и повышенных давлениях газа ($P = 50\text{-}760$ Торр) представляет значительный интерес как для физики газового разряда, так и для многих практических приложений: создание плазменных экранов от радаров, разработка новых лазеров и высокоэффективных источников света, плазмохимия и т.д.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по измерению параметров плазмы в комбинированном барьерном разряде (КБР) в смесях He + Ar и He + Xe при давлении $P = 130$ Торр.

Комбинированный барьерный разряд формировался путем наложения на стационарный барьерный разряд (БР) высоковольтных (ВВ) импульсов напряжения с коротким передним фронтом $\tau_f \approx 10\text{-}30$ нс и длительностью на полувысоте ~ 10 мкс.

В КБР синусоидальное напряжение невысокой амплитуды создает однородную затравочную плазму, в то время как ВВ импульсы формируют плазму высокой концентрации.

Описание эксперимента

Исследования динамики развития КБР и измерения параметров плазмы проводились в плоской симметричной геометрии БР. В качестве диэлектрических барьеров использовались керамические пластины из окиси алюминия размером 60x60 мм и толщиной 1.5 мм, на которые были нанесены металлические электроды размером 40x40 мм. Межэлектродное расстояние равнялось 10.5 мм. Частота синусоидального напряжения стационарного БР варьировалась в пределах $f = 1\text{-}100$ кГц.

На стационарный БР накладывались ВВ импульсы отрицательной и положительной полярности с амплитудой 3-7 кВ, что существенно превышало амплитуду синусоидального напряжения. Момент наложения высоковольтного импульса был синхронизован с фазой синусоидального напряжения и варьировался в пределах его периода. Пространственно-временная динамика развития разряда исследовалась с помощью многокадрового электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ЛВ-03, кадры которого были синхронизованы с осциллограммами тока и напряжения разряда. Регистрация осциллограмм тока и напряжения КБР осуществлялась с помощью многоканального осциллографа Tektronix DPO – 2024.

Получаемые с помощью этого комплекта аппаратуры экспериментальные результаты позволяли рассчитывать временную динамику

плотности тока КБР. Динамика напряженности электрического поля в разряде определялась по отношению интенсивностей спектральных линий 1^- ($\lambda = 391.4$ нм) и 2^+ ($\lambda = 337.1$ нм) систем азота [1], который добавлялся в исходную газовую смесь в количестве 0.01–0.1%, и по отношению интенсивностей синглетных спектральных линий HeI ($\lambda = 667.8$ нм и $\lambda = 728.1$ нм) [2]. Температура нейтрального газа в разряде измерялась по неразрешенной вращательной структуре 2^+ системы азота (секвенция $\Delta = -2$). Спектр излучения стационарного барьерного разряда, усредненный по многим периодам напряжения, регистрировался с помощью оптоволоконного спектрометра "Avantes"

(AvaSpec-2048-FT-RM, спектральное разрешение $\sim 0.1-0.2$ нм, $\lambda = 235-800$ нм).

Динамические спектральные исследования плазмы проводились с помощью монохроматора МУМ, сигнал которого регистрировался ФЭУ-100 и поступал (совместно с сигналами тока и напряжения разряда) на осциллограф Tektronix DPO – 2024.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена фотография стационарного БР ($f = 10$ кГц), сделанная с помощью камеры Canon EOS 550 D при экспозиции 17 мс.

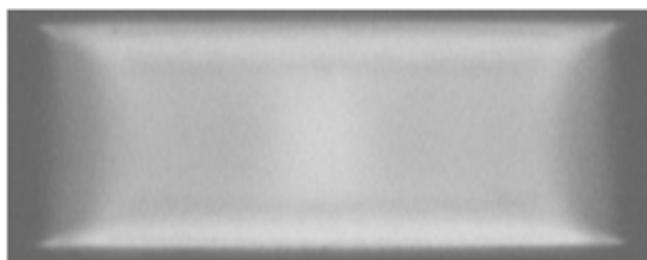


Рис. 1 – Фотография стационарного БР. Смесь He + Ag (5%), P = 130 Торр, f = 10 кГц

Видно, что стационарный БР достаточно однороден поперек тока. Соответствующая

осциллограмма тока и напряжения стационарного БР приведена на рис. 2.

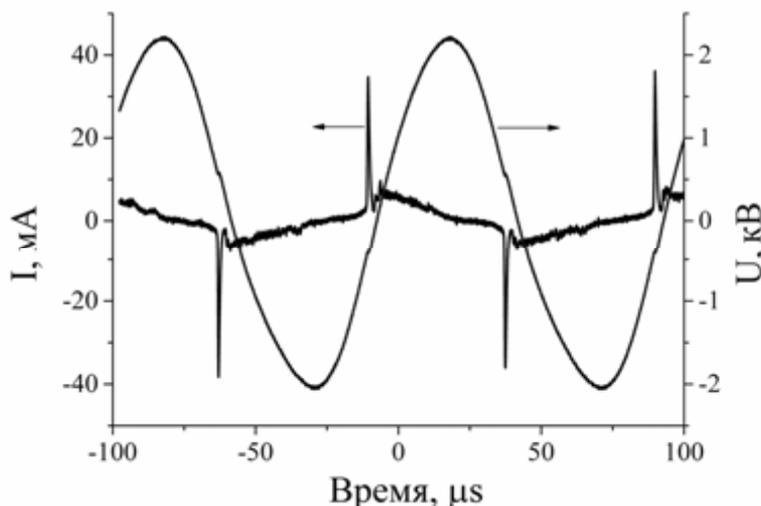


Рис. 2 – Осциллограмма тока и напряжения стационарного БР. Смесь He + Ag (5%), P = 130 Торр, f = 10 кГц

На рис. 3 приведена осциллограмма напряжения разряда в грубом масштабе времени, показывающая динамику напряжения при наложении на стационарный БР ВВ импульса напряжения. Детальные осциллограммы тока и напряжения разряда в указанных выше условиях представлены на рис. 4.

Исследования показали, что амплитуда импульса тока КБР существенно зависит от амплитуды ВВ импульса, фазы наложения ВВ импульса и от соотношения He:Ag и He:Xe в газовой смеси. Отметим, что Ag и Xe в этих газовых смесях выступают как легкоионизируемые добавки.

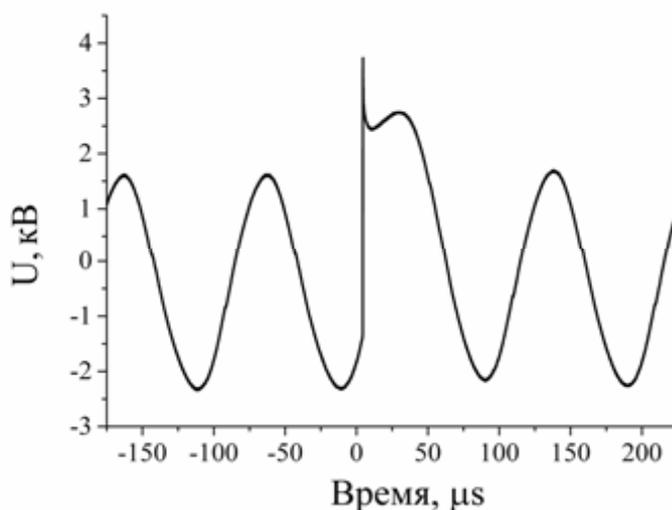
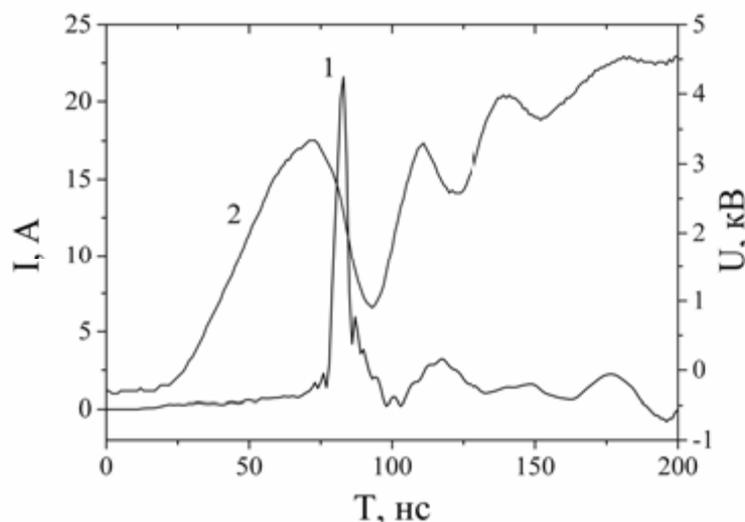


Рис. 3 – Осциллограмма напряжения КБР. Смесь He + Ar (5%), P = 130 Торр, f = 10 кГц, U_и = 4 кВ



(1) – ток, (2) – напряжение

Рис. 4 – Осциллограмма тока и напряжения КБР. Смесь He + Ar (5%), P = 130 Торр, f = 10 кГц, U_и = 4 кВ

На рис. 5, для примера, приведены зависимости амплитуды тока КБР и отношения интенсивностей спектральных линий $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм от амплитуды ВВ импульса для газовой смеси He:Ar (5%), а на рис. 6 – зависимость амплитуды тока КБР от процентного содержания аргона в газовой смеси He:Ar.

Видно, что зависимость амплитуды импульса тока КБР от содержания Ar носит немонотонный характер с максимумом при Ar/He:+Ar = (5–10)%. Аналогичная зависимость от концентрации легкоионизируемой до-

бавки (Xe) наблюдается и для газовой смеси He:Xe.

Эксперимент показал, что в любой газовой смеси максимальная амплитуда тока КБР получается, когда ВВ импульс напряжения накладывается не в максимуме тока БР, а перед ним.

Так, при частоте синусоидального напряжения f = 10 кГц максимальная амплитуда тока КБР получается, если ВВ импульс напряжения накладывается за 2–4 мкс до импульса тока БР.

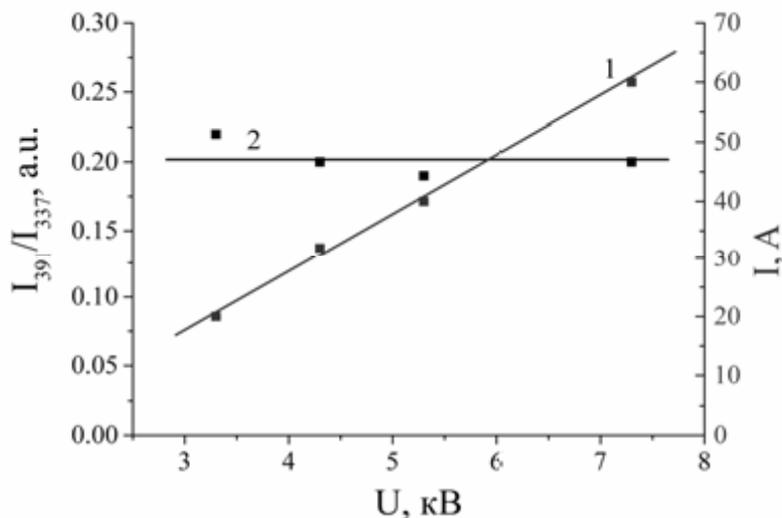


Рис. 5 – Зависимость амплитуды тока КБР (1) и отношения интенсивностей спектральных линий $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм (2) от амплитуды ВВ импульса. Смесь He + Ar (5%), P = 130 Torr

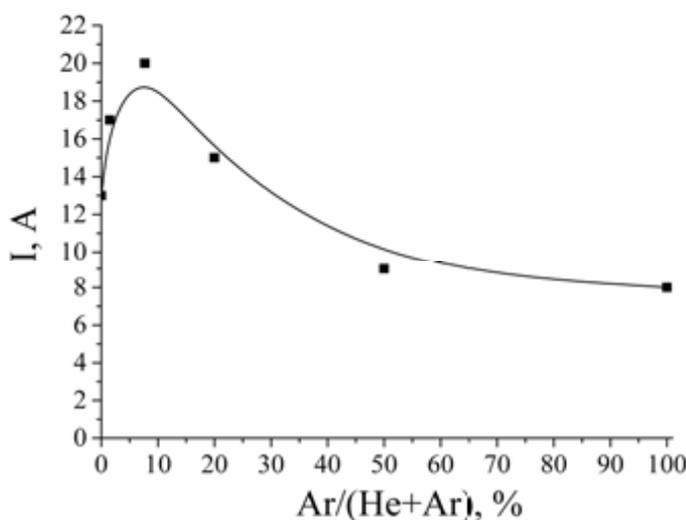


Рис. 6 – Зависимость амплитуды тока КБР от процентного содержания аргона в газовой смеси He:Ar. P = 130 Torr, $U_{и} = 3$ кВ

При оптимальной фазе наложения ВВ импульса амплитуда тока КБР в $(1-2) \cdot 10^3$ раз превышает амплитуду тока БР.

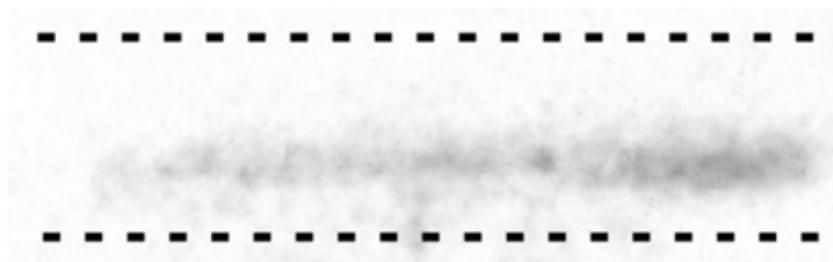
При наложении ВВ импульса в максимуме тока БР амплитуда импульса тока КБР уменьшается в 2–3 раза.

На рис. 7(а–е) приведены ЭОП фотографии, синхронизованные с осциллограммой тока и напряжения КБР (Рис. 7(ж)), демонстрирующие динамику развития КБР. На кадрах (а – е) пунктирные линии показывают положение электродов: анод находится снизу, катод – сверху.

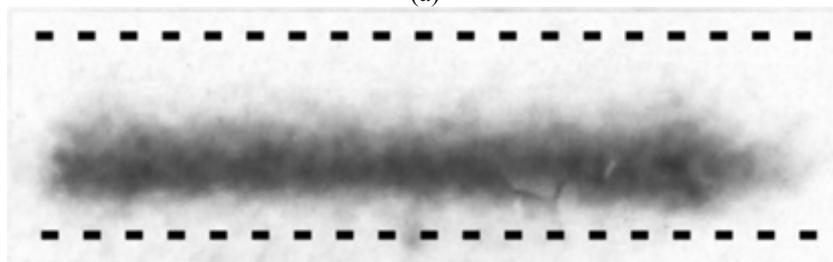
Рисунок 7(ж) – осциллограммы тока (1) и напряжения (2) КБР. Метки (а-е) на рис. 7(ж)

показывают моменты срабатывания ЭОП. Точка на нижнем электроде – опорная метка лазера.

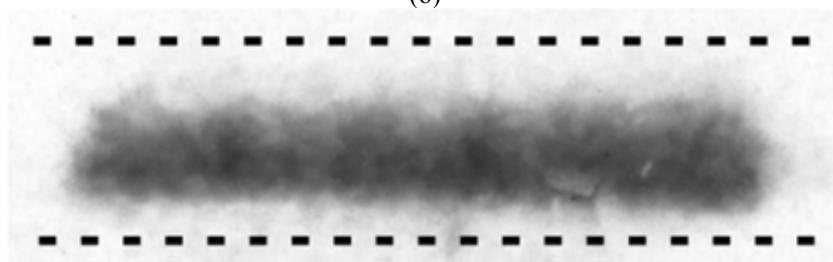
Анализ ЭОП-фотографий показал, что при наложении ВВ импульса примерно в середине межэлектродного промежутка формируется плоская волна ионизации (рис. 7(а)), которая начинает распространяться к обоим электродам, оставляя позади себя пространственно однородную плазму высокой концентрации ($n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$).



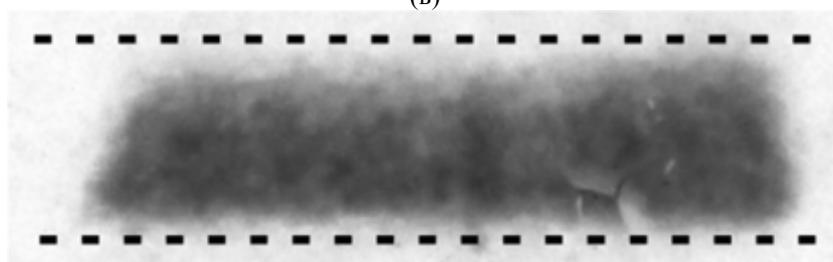
(а)



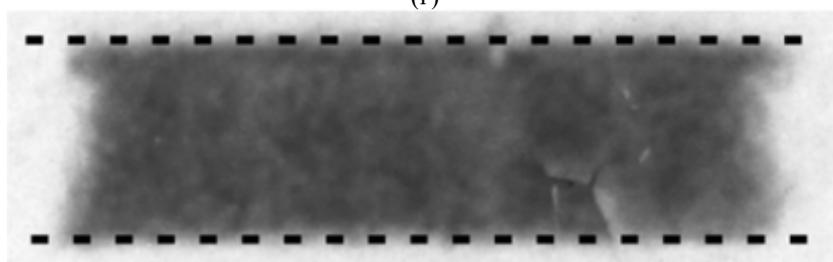
(б)



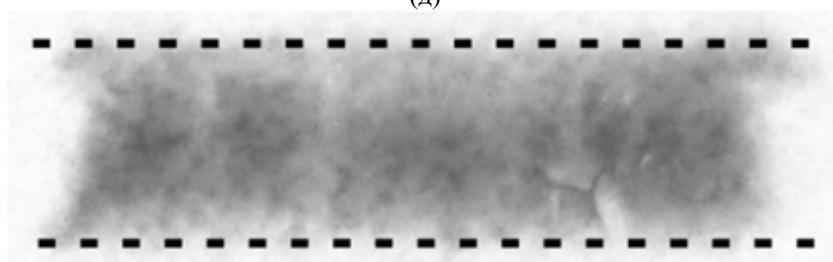
(в)



(г)



(д)



(е)

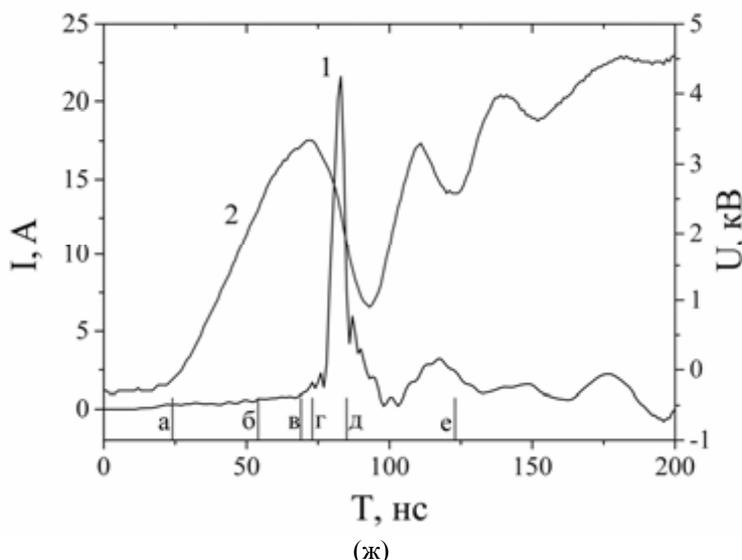


Рис. 7 – Динамика развития КБР. Кадры ЛВ – 03, $\tau_{\text{ксп}} = 100$ нс. Смесь He:Ar (5%), давление $P = 130$ Торр, амплитуда ВВ импульса $U_{\text{и}} = 3$ кВ

Скорость распространения волны ионизации увеличивается с ростом амплитуды ВВ импульса: $V \approx 8 \cdot 10^6$ см/с при $U = 3$ кВ и $V \approx 2.5 \cdot 10^7$ см/с при $U = 7$ кВ.

На рис. 8 приведена обобщенная осциллограмма, демонстрирующая временную дина-

мику тока, напряжения, интенсивностей спектральных линий азота $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм и напряженности электрического поля в процессе развития КБР.

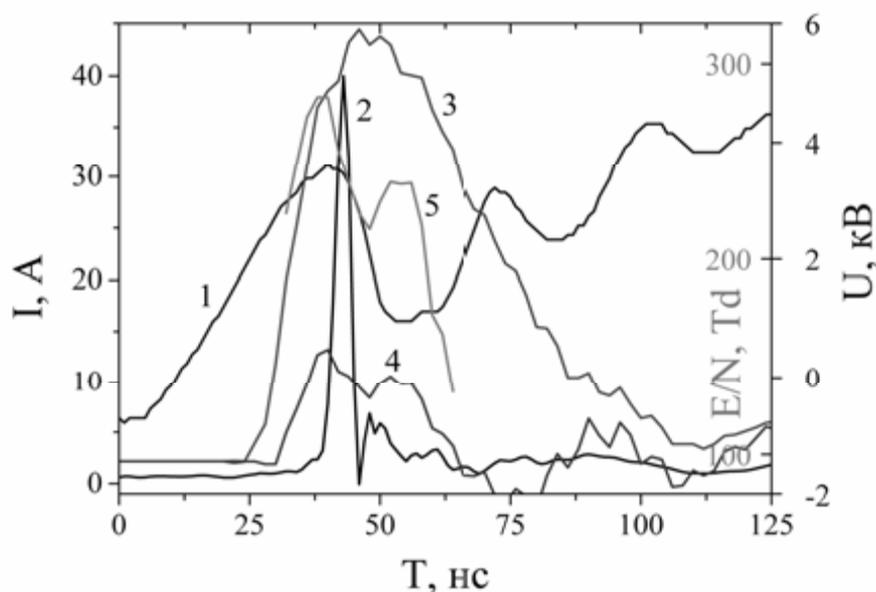
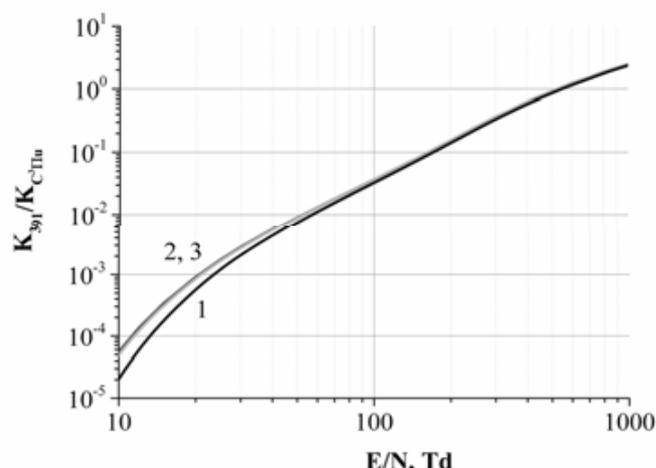


Рис. 8 – Динамика напряжения (1), тока (2) КБР, интенсивностей спектральных линий азота (3,4), и напряженности электрического поля (5). Смесь He + Ar (5%), $P = 130$ Торр, $U_{\text{и}} = 5$ кВ

На рис. 9 представлены результаты численного моделирования отношения интенсивностей спектральных линий азота $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм в зависимости от напряженности электрического поля для газовой смеси

He:Ar (5%) при различном содержании азота. Видно, что при высоких $E/N \geq 80$ Тд добавки азота в количестве 0.01-1% не влияют на отношение интенсивностей этих линий.

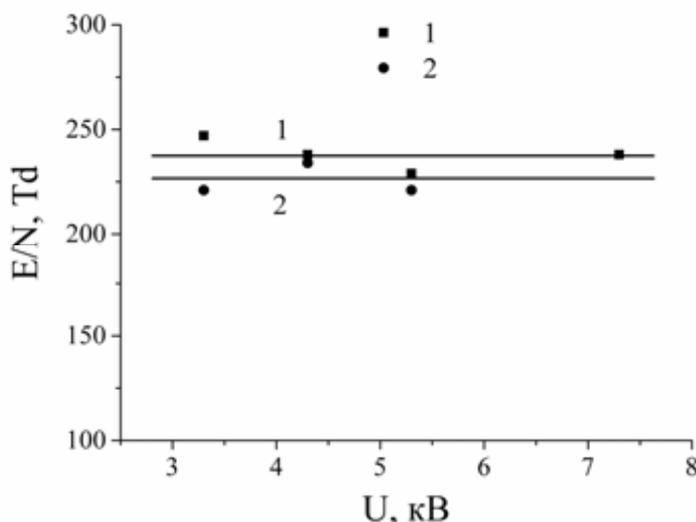


Смесь He:Ar (5%), P = 130 Торр, (1) – N₂(1%), (2) – N₂(0.1%), (3) – N₂(0.01%)

Рис. 9 – Отношение интенсивностей линий азота λ = 391.4 нм и λ = 337.1 нм. Численный расчет.

Следует отметить, что результаты определения напряженности электрического поля в КБР по отношению интенсивностей линий азота достаточно хорошо согласуются с результатами измерения поля, полученными по отношению интенсивностей спектральных линий гелия. На рис. 10 приведены полученные в

эксперименте зависимости максимальной напряженности электрического поля в КБР от амплитуды ВВ импульса для двух газовых смесей. Видно, что максимальная напряженность электрического поля в КБР слабо зависит от амплитуды ВВ импульса.



1 – смесь He: Ar (5%), 2 – смесь He: Хе (2%), P = 130 Торр

Рис. 10 – Зависимость максимальной напряженности электрического поля в КБР от амплитуды ВВ импульса

На рис. 11 приведен пример полученного в эксперименте и модельного спектров азота (2⁺ система, секвенция Δ = -2) в стационарном БР, которые были использованы для определе-

ния температуры газа [3]. Вращательная (по-ступательная) температура оказалась равной T_r = 400 К, колебательная – T_v = 3000 К.

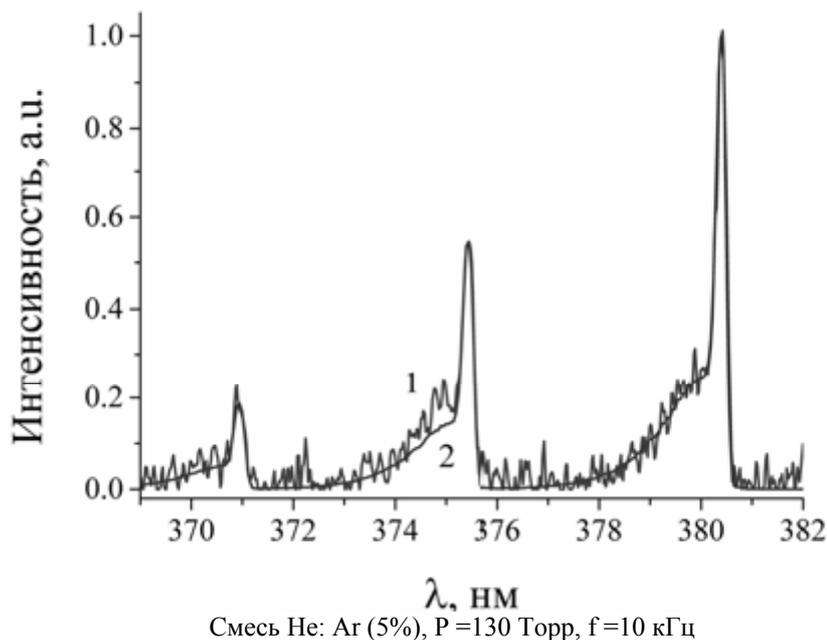


Рис. 11 – Экспериментальный (1) и модельный (2) спектр азота в стационарном БР

На рис. 12 изображен модельный спектр азота и несколько экспериментальных точек для определенных длин волн, полученные в КБР. Сравнение рисунков 11 и 12 показывает,

что колебательные температуры в стационарном БР и КБР совпадают, в то время как вращательная температура в КБР получилась выше (600 К), чем в стационарном БР.

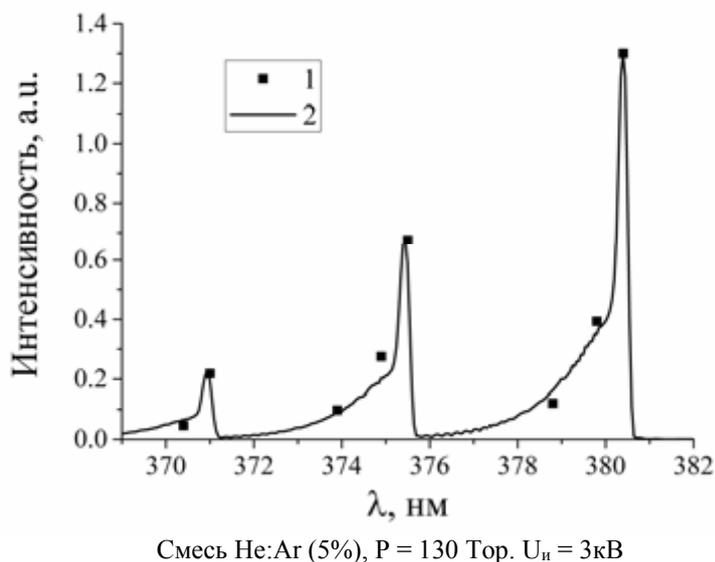


Рис.12 – Экспериментальный (1) и модельный (2) спектр азота (2⁺ система, секвенция Δ = -2) в КБР

Измеренные величины плотности тока и приведенной напряженности электрического поля в КБР позволили определить плотность плазмы в разряде. В зависимости от экспериментальных условий, плотность плазмы варьируется в пределах $n_e = 3 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №12-02-01198).

Литература

1. Paris S., Aints M., Laan M. And Valk F. // J. Phys, D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 1179.

2. Ivkovic S., Stefenovic G., Obradovic B., Cvetanovic N. and Kuraica M. J. // Phys, D: Appl. Phys. 2014. V. 47. 055204 (10PP).

3. Laux C., Spence T., Kruger C. and Zare R. // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V.12. P. 125.

MEASUREMENT OF PLASMA PARAMETERS IN A HIGH-CURRENT CBD IN MIXTURES OF HE + AR, HE + XE

**Yu.S. Akishev, G.I. Aponin, M.E. Grushin, V.B. Karalnik,
I.V. Kochetov, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin**

SSC, 142190, Moscow, Troitsk, Pushkov str., 12

E-mail: trushkin@triniti.ru

Abstract

The results of experimental studies of the combined barrier discharge (CBD) in the mixtures of inert gases are presented in this paper. The high-current regime of CBD was induced by superposition of a high-voltage pulse with a short leading edge on the stationary sinusoidal dielectric barrier discharge. It is shown that the superposition of high-voltage pulse in a certain phase of the sinusoidal voltage can increase the density of the discharge plasma up to $n_e = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

Keywords: plasma, generation, density, gas, pressure, combined barrier discharge

HE + AR, HE + XE ҚОСПАЛАРЫНДА КҮШТІ ТОК КРБ ПЛАЗМАНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ӨЛШЕУ

**Ю.С. Акишев, Г.И. Апонин, М.Е. Грушин, В.Б. Каральник, И.В. Кочетов,
А.В. Петряков, Н.И. Трушкин**

МФО, 142190, Мәскеу, Троицк, Пушковых к., 12

E-mail: trushkin@triniti.ru

Аннотация

Бұл мақалада инертті газ қоспаларындағы комбинирленген разряд барьерін тәжірибелік зерттеу нәтижелері көрсетілген. Стационарлы синусойдалы диэлектрикалық разряд барьеріне қысқаша алдыңғы фронттымен жоғары вольтты импульс суперпозициясы жоғары ағымы КРБ режимімен индуцирленді. Жоғары вольтты импульсті белгілі бір синусойдалы кернеу фазасына салу плазма разрядының тығыздығын $n_e = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ дейін жоғарылату мүмкіндігі көрсетілген.

Түйінді сөздер: плазма, ұрпақ, тығыздық, газ, қысым, аралас тосқауыл разряд