

УДК: 539.141

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ
В СИЛЬНОТОЧНОМ ДБР 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**

Представлены результаты экспериментальных исследований комбинированного барьерного разряда (КБР) в смесях инертных газов. КБР был сформирован путем наложения высоковольтного импульса напряжения с коротким передним фронтом на стационарный синусоидальный разряд диэлектрического барьера. Показано, что суперпозиция высоковольтного импульса в определенном этапе синусоидального напряжения может увеличить плотность плазмы разряда до $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Ключевые слова: плазма, разряд, инертный газ, импульс, барьер

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 ($P = 50 - 760 \text{ Тор}$) 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 $P = 130 \text{ Тор}$. Комбинированный барьерный разряд формировался путем наложения на стационарный барьерный разряд (БР) высоковольтных (ВВ) импульсов напряжения с коротким передним фронтом $\tau_f \approx 10-30 \text{ нс}$ и длительностью на полувысоте $\sim 10 \text{ мкс}$. 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 $60 \times 60 \text{ мм}$ и толщиной 1.5 мм , на которые были нанесены металлические электроды размером $40 \times 40 \text{ мм}$. Межэлектродное расстояние равнялось 10.5 мм . Частота синусоидального напряжения стационарного БР варьировалась в пределах $f = 1 - 100 \text{ кГц}$.

На стационарный БР накладывались ВВ импульсы отрицательной и положительной полярности с амплитудой $3-7 \text{ кВ}$, 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^- ($\lambda = 391.4 \text{ нм}$) и 2^+ ($\lambda = 337.1 \text{ нм}$) 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

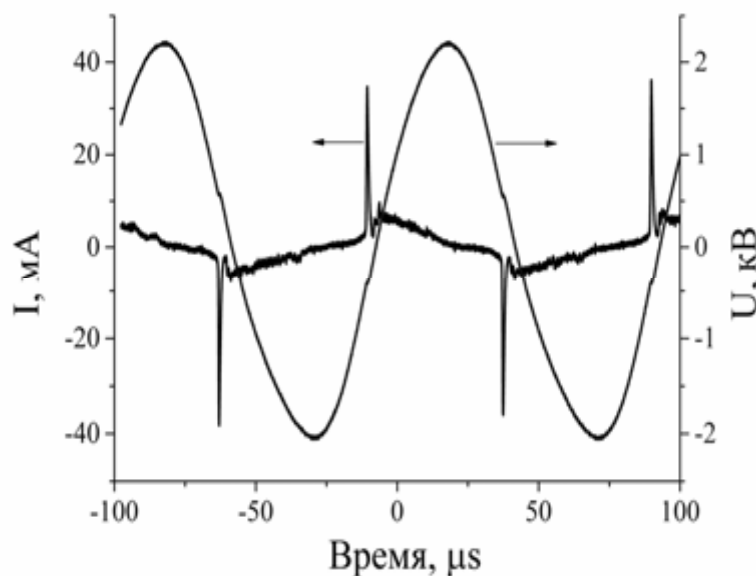
На рис. 1 представлена фотография стационарного БР ($f = 10$ кГц), сделанная с помощью камеры Canon EOS 550 D при экспозиции 17 мс.

Видно, что стационарный БР достаточно однороден поперек тока. Соответствующая осциллограмма тока и напряжения стационарного БР приведена на рис. 2.



Смесь He + Ar (5%), $P = 130$ Тор, $f = 10$ кГц

Рис.1 – Фотография стационарного БР

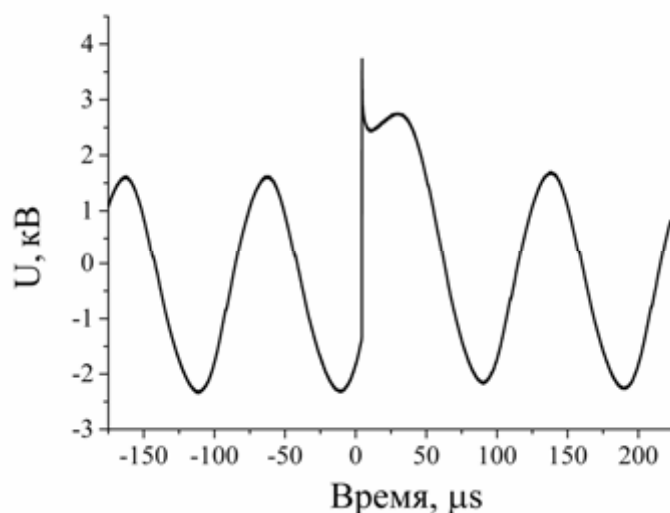


Смесь He + Ar (5%), $P = 130$ Тор, $f = 10$ кГц

Рис.2 – Осциллограмма тока и напряжения стационарного БР

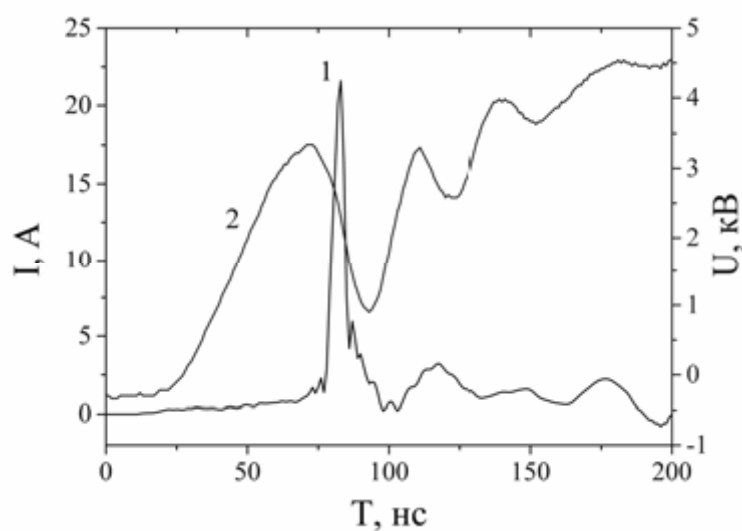
На рис.3 приведена осциллограмма напряжения разряда в грубом масштабе времени, показывающая динамику напряжения при наложении на стационарный БР ВВ импульса напряжения.

Детальные осциллограммы тока и напряжения разряда в указанных выше условиях представлены на рис. 4.



Смесь He + Ar (5%), P = 130 Тор, f = 10 кГц, U_и = 4 кВ

Рис.3 – Осциллограмма напряжения КБР



(1) — ток, (2) — напряжение.

(2) Смесь He + Ar (5%), P = 130 Тор, f = 10 кГц, U_и = 4 кВ

Рис.4 – Осциллограмма тока и напряжения КБР

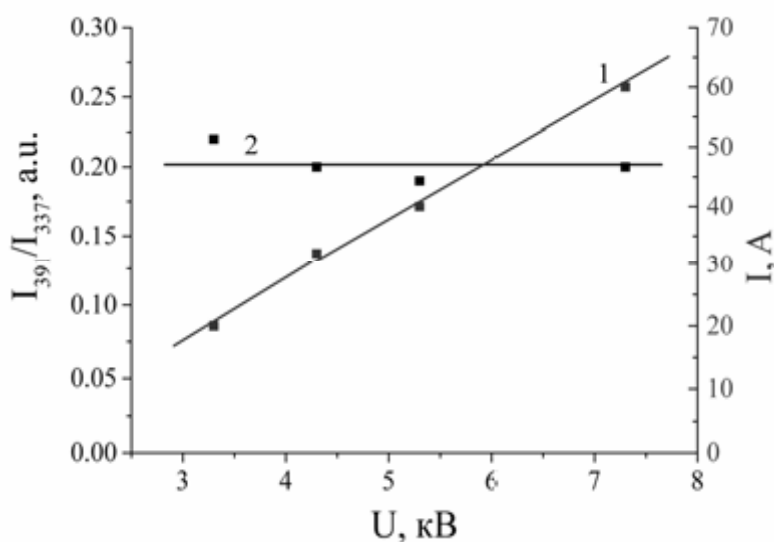
Исследования показали, что амплитуда импульса тока КБР существенно зависит от амплитуды ВВ импульса, фазы наложения ВВ

импульса и от соотношения He:Ar и He:Xe в газовой смеси. Отметим, что Ar и Xe в этих

газовых смесях выступают как легкоионизуемые добавки.

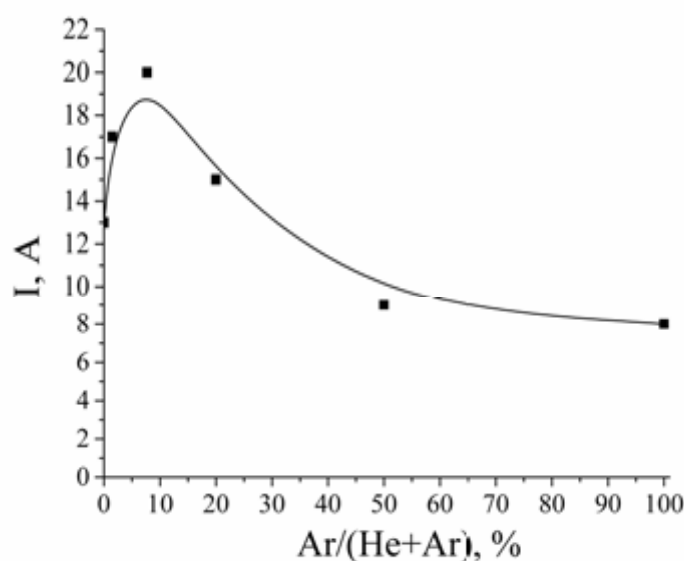
На рис.5, для примера, приведены зависимости амплитуды тока КБР и отношения интенсивностей спектральных линий $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм от амплитуды ВВ импульса для газовой смеси He:Ar (5%), а на рис.6 – зависимость амплитуды тока КБР от процентного содержания аргона в газовой смеси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

Видно, что зависимость амплитуды импульса тока КБР от содержания Ar носит немонотонный характер с максимумом при $\text{Ar/He:Ar} = (5 - 10)\%$. Аналогичная зависимость от концентрации легкоионизуемой добавки (Xe) наблюдается и для газовой смеси He:Xe.



Смесь He + Ar (5%), $P = 130$ Тор

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

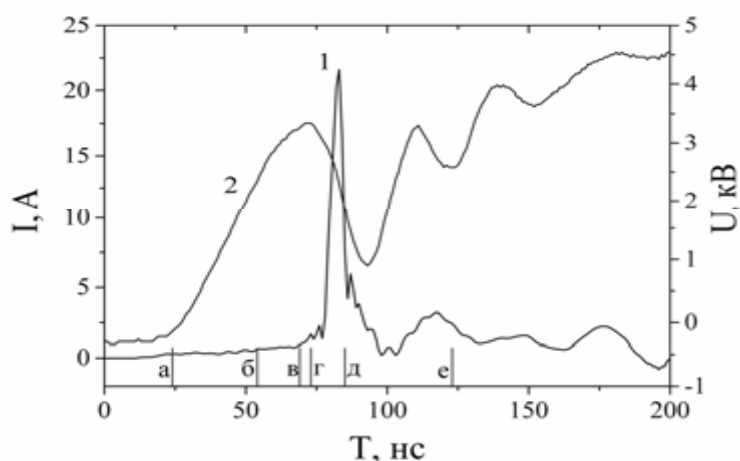


$P = 130$ Тор, $U_{\text{и}} = 3$ кВ

Рис.6 – Зависимость амплитуды тока КБР от процентного содержания аргона в газовой смеси He:Ar



Кадры ЛВ – 03, $\tau_{\text{эксп}} = 100\text{нс}$.



Смесь He:Ar (5%), давление $P = 130$ Тор, амплитуда ВВ импульса $U_n = 3$ кВ

Рис.7 – Динамика развития КБР

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.

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. Рис.7ж - осциллограммы тока (1) и напряжения (2) КБР. Метки (а-е) на рис. 7ж 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.7а), которая начинает распространяться к обоим электродам, оставляя позади себя пространственно однородную плазму высокой концентрации (n_e

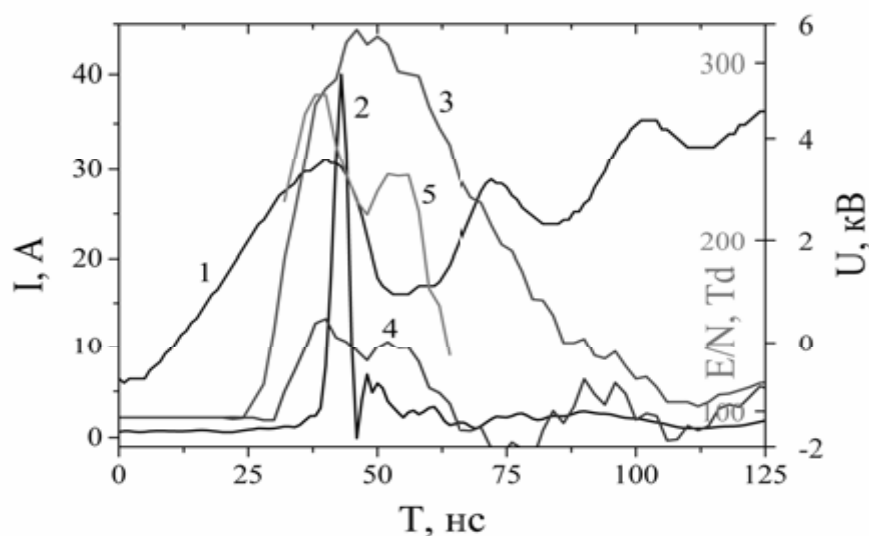
$\approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Скорость распространения волны ионизации увеличивается с ростом амплитуды ВВ импульса: $V \approx 8 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ при $U = 3$ кВ и $V \approx 2.5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ при $U = 7$ кВ.

На рис.8 приведена обобщенная осциллограмма, демонстрирующая временную динамику тока, напряжения, интенсивностей спектральных линий азота $\lambda = 391.4 \text{ нм}$ и $\lambda = 337.1 \text{ нм}$ и напряженности электрического поля в процессе развития КБР.

На рис. 9 представлены результаты численного моделирования отношения интенсивностей спектральных линий азота $\lambda = 391.4 \text{ нм}$ и $\lambda = 337.1 \text{ нм}$ в зависимости от напряженности электрического поля для газовой смеси He:Ar (5%) при различном содержании азота. Видно, что при высоких $E/N \geq 80 \text{ Тд}$ добавки азота в количестве 0.01 - 1% не влияют на отношение интенсивностей этих линий.

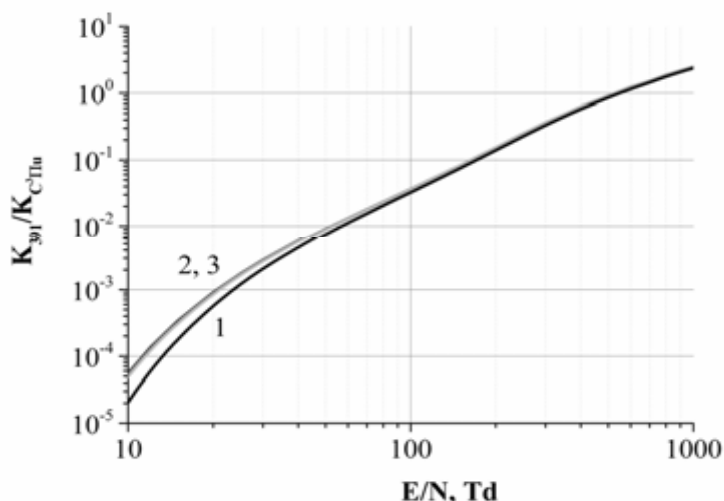
Следует отметить, что результаты определения напряженности электрического поля в КБР по отношению интенсивностей линий азота достаточно хорошо согласуются с результатами измерения поля, полученными по отношению интенсивностей спектральных линий гелия.

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.



Смесь He + Ar (5%), P = 130 Тор, $U_{и} = 5$ кВ

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 Тор, (1) – $N_2(1\%)$, (2) – $N_2(0.1\%)$, (3) – $N_2(0.01\%)$

Рис.9 – Отношение интенсивностей линий азота $\lambda = 391.4$ нм и $\lambda = 337.1$ нм. Численный расчет.

На рис.11 приведен пример полученного в эксперименте и модельного спектров азота (2^+ система, секвенция $\Delta = -2$) в стационарном БР, которые были использованы для определения температуры газа [3].

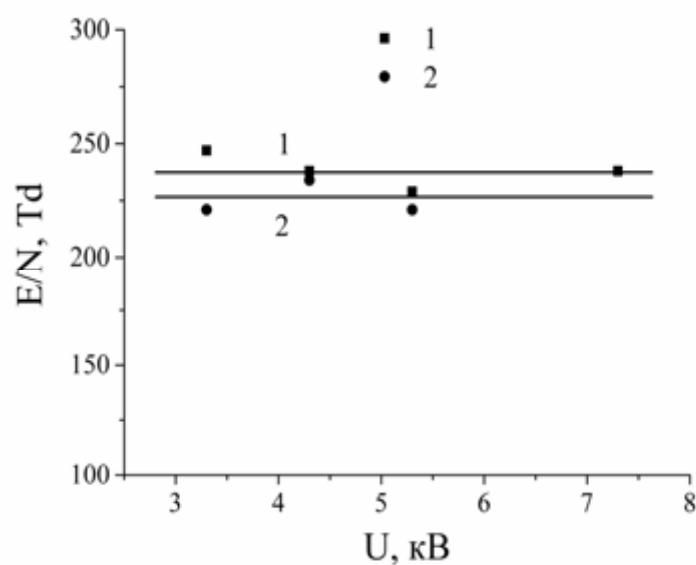
Вращательная (поступательная) температура оказалась равной $T_r = 400$ К, колебательная - $T_v = 3000$ К.

На рис.12 изображен модельный спектр азота и несколько экспериментальных точек

для определенных длин волн, полученные в КБР.

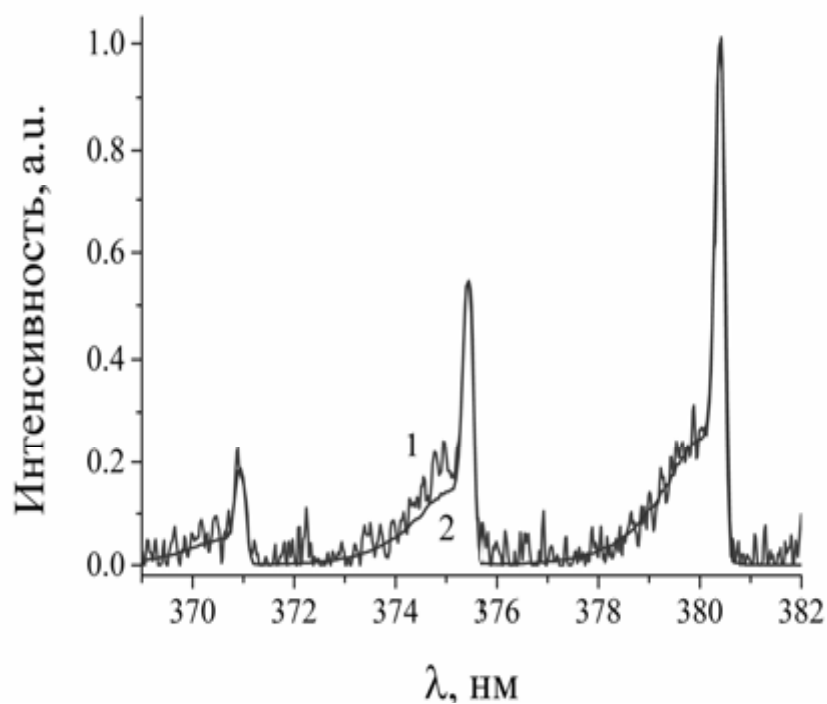
Сравнение Рис. 11 и Рис.12 показывает, что колебательные температуры в стационарном БР и КБР совпадают, в то время как вращательная температура в КБР получилась выше (600 К), чем в стационарном БР.

Измеренные величины плотности тока и приведенной напряженности электрического поля в КБР позволили определить плотность плазмы в разряде.



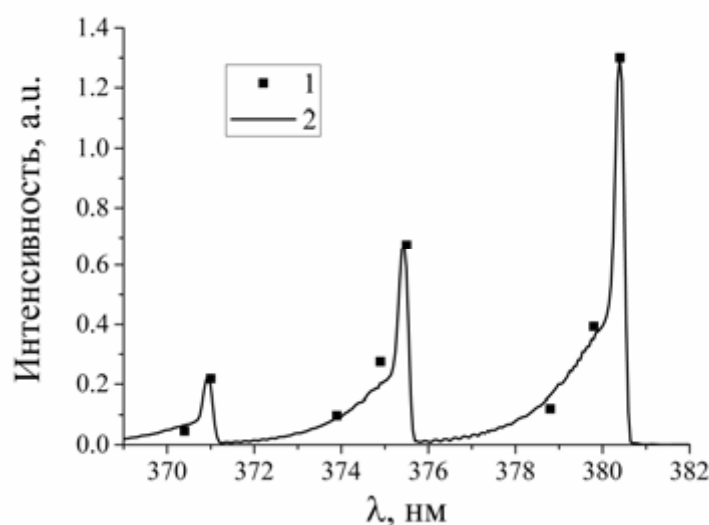
1 – смесь He: Ag (5%), 2 – смесь He: Xe (2%), P = 130 Тор

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



Смесь He: Ag (5%), P = 130 Тор, f = 10 кГц

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



Смесь He:Ar (5%), P = 130 Тор, U_н = 3кВ

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

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., Stefanovic 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 DBD 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

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190, г.Москва, г.Троицк, ул. Пушкиных, вл.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 $n_e = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

He + Ar, He + Xe ҚОСПАСЫНЫҢ ЖОҒАРҒЫ ДӘЛДІКПЕН ДБР КӨМЕГІМЕН ПЛАЗМА ШАМАСЫН АНЫҚТАУ

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

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190, Москва қ., Троицк қ., Пушкиных көш., 12,

e-mail: trushkin@triniti.ru

Аннотация

Инертті газдардар қоспасында комбинирленген барьерлі разрядта (КБР) эксперименттік нәтижелер жұмыста көрсетілген. КБР диэлектрлі ауқымда синусоидалды разрядта қысқа алдыңғы аумақта жоғары кернеу арқылы жасалынған. Импульсті жоғары кернеу плазмадағы разрядтың тығыздығын көтерілуін эксперимент жүзінде анықталды.