

УДК 533.9.072

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26-30 июня 2017 г.*

И.И. Коротких, Ю.И. Малахов, Н.М. Скорнякова

*Национальный исследовательский университет (Московский энергетический институт),
Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЯДА В
ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ**

Представлены результаты регистрации начальной стадии формирования разряда в индуктивно-связанной плазме методом высокоскоростной цифровой видеосъемки. Исследовались процессы предварительного вспомогательного пробоя в индукторе и последующего формирования факела в среде аргона при давлении близком к атмосферному. Получена информация о временной эволюции геометрических размеров плазменного факела и изменения его как интегральной интенсивности излучения, так и в отдельных спектральных линиях.

**ЦИФРОВАЯ ВИДЕОСЪЕМКА, ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННАЯ ПЛАЗМА,
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

В спектроскопии при решении различных прикладных задач широко используются газоразрядные источники излучения. Обычно их подразделяют на источники для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области. Перечисленные источники имеют не только различные спектральные и энергетические характеристики, но и различные конструктивное исполнение и способы получения плазмы. Применяются дуговой, тлеющий, искровой, высокочастотный безэлектродный разряды в изолированном объеме, разряд в полном катоде. Имеется опыт использования дуговых плазмотронов, как источников излучения [1]. В зависимости от режимов работы источников питания и конструкции плазмотронов температура плазмы может составлять 6000 – 15000 К. Особый интерес для прикладной спектроскопии представляют плазмотроны, в которых создаётся индуктивно-связанная плазма (ИСП). Метод получения такой плазмы известен достаточно давно. Современная элементная база электроники обеспечивает создание малогабаритных источников питания с выходной мощностью до 2000 ВА. С целью выявления возможностей использования ИСП в спектроскопии, а также при снятии характеристик фотоэлектронных устройств (фотоумножителей и фотоэлементов), особенно в ультрафиолетовом диапазоне, проведена серия экспериментов. В этом докладе представлены первые результаты изучения начальной стадии пробоя и последующего формирования факела ИСП.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования стадии формирования индуктивно-связанной плазмы использовался метод покадровой регистрации с помощью высокоскоростной цифровой

видеокамеры. Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис.1.

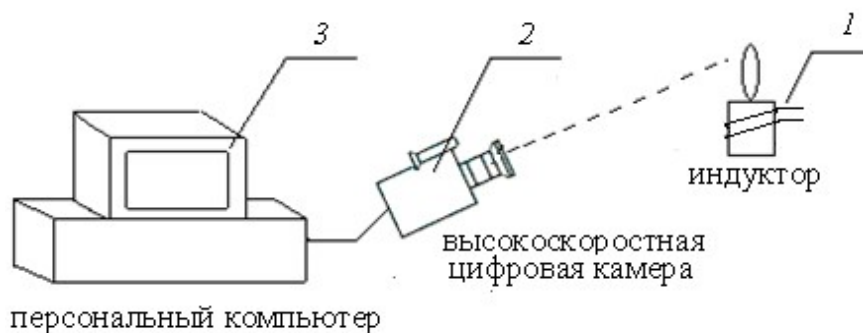


Рис.1. 1 – индуктор, 2 – высокоскоростная цифровая камера, 3 – персональный компьютер

Индуктивно-связанная плазма создавалась в индукторе в среде аргона при давлении газа 0.12 МПа. Для зажигания разряда необходима предварительная ионизация рабочего газа. С этой целью использовалась катушка Теслы. Питание индуктора осуществлялось от генератора, рабочая частота которого составляла 27,12 МГц. В дальнейшем с целью оптимизации параметров её можно изменить. Схематично узел формирования ИСП представлен на рис.2.

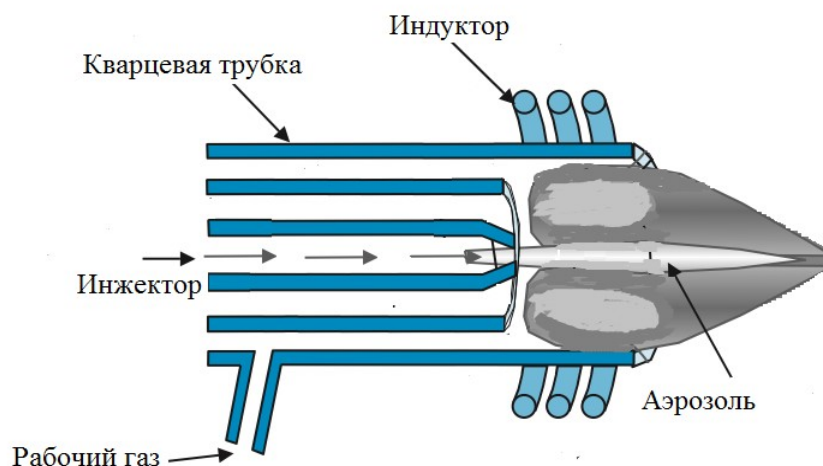


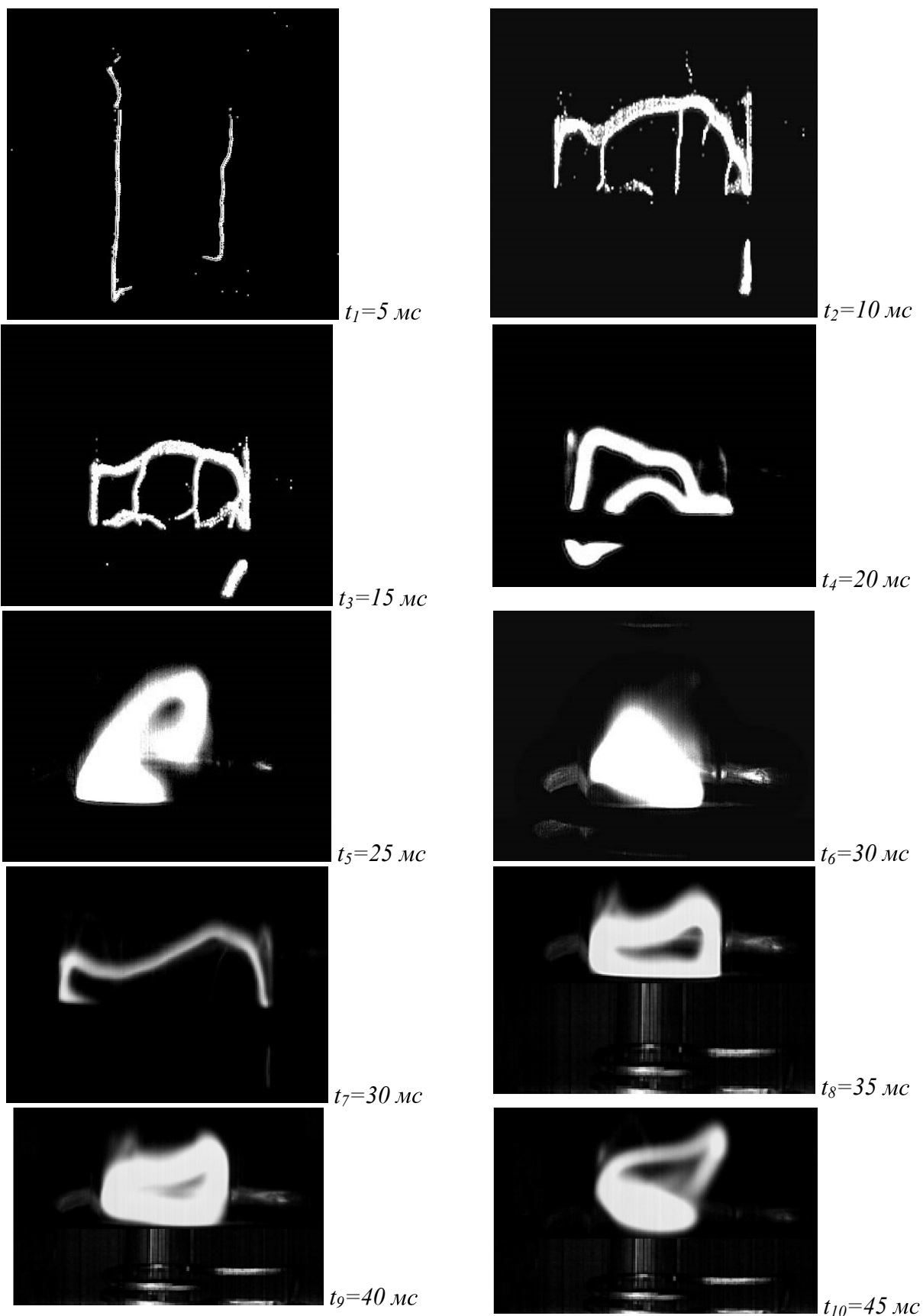
Рис.2. Структурная схема узла формирования индуктивно-связанной плазмы

Индуктор выполнен из медной трубки, защита индуктора от взаимодействия с плазмой обеспечивается внешней кварцевой трубкой. Для уменьшения тепловых нагрузок предусмотрена возможность прокачки воды через индуктор. Плазмообразующий газ, аргон, тангенциально подавался внутрь кварцевой трубки, расход газа 10 л/мин. Внутри кварцевой трубки предусмотрен канал для подачи различных аэрозолей и порошков в плазму.

Для высокоскоростной регистрации стадий формирования плазмы использована цифровая видеокамера Fastec HiSpec-1 2 и объектива CMOS с фокусным расстоянием $F = 50$ мм, необходимого для создания изображения плазменной струи на плоскости матрицы. Разрешение цифровой видеокамеры 1280×1024 пикселя на дюйм. Длительность кадра $1,98 \cdot 10^{-3}$ с. Тип матрицы CMOS, размер пикселя 14 мкм, динамический диапазон 10 бит.

Оптическая ось высокоскоростной камеры ориентирована по нормали к геометрической оси индуктора. Перед съемкой определяется масштабный коэффициент переноса изображения факела плазмотрона на плоскость матрицы. Далее производилась регистрация изображений исследуемого объекта (плазменной струи) с частотами 1000, 2000 и 3000 кадров в секунду на протяжении 2 – 3 с.

Метод высокоскоростной регистрации позволил проследить процессы, происходящие при зарождении плазменного факела и его дальнейшее развитие. На рис.3 представлена последовательность кадров, начиная от подачи высоковольтного поджигающего импульса и заканчивая установлением факела.



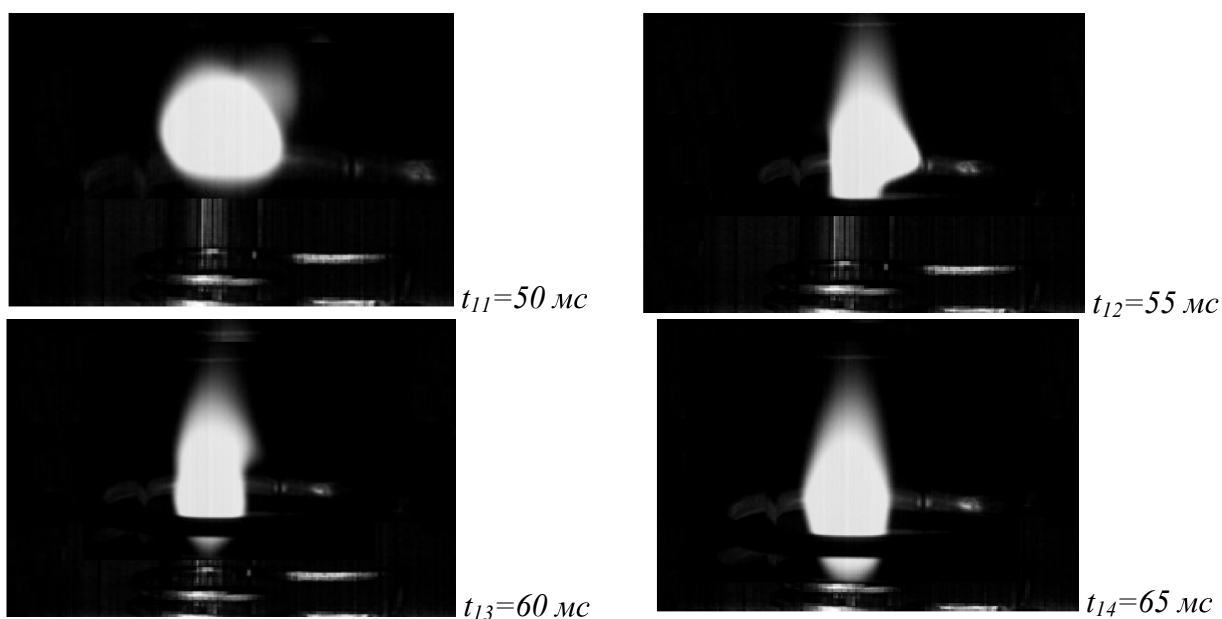


Рис. 3. Стадии развития разряда

За время $t_1=5 \text{ мс}$ после начала съемки возникает пробой в газе, появляются линейные структуры, при $t_2=10 \text{ мс}$ они преобразуются в тороидальные, далее деформируются и за время $t_3=20 \text{ мс}$ преобразуются в объемные сгустки, за время $t_4=65 \text{ мс}$ формируется устойчивый факел.

После того, как сформировался факел, была продолжена съёмка с целью проверки, насколько стабильно положение факела и интенсивность его излучения. Было установлено, что флуктуации интенсивности излучения довольно значительны, что иллюстрирует приводимый ниже рис. 4. На данном рисунке приведено распределение интенсивности излучения по строке, соответствующей наиболее яркой части пламени, показаны наибольшее и наименьшее значения интенсивностей.

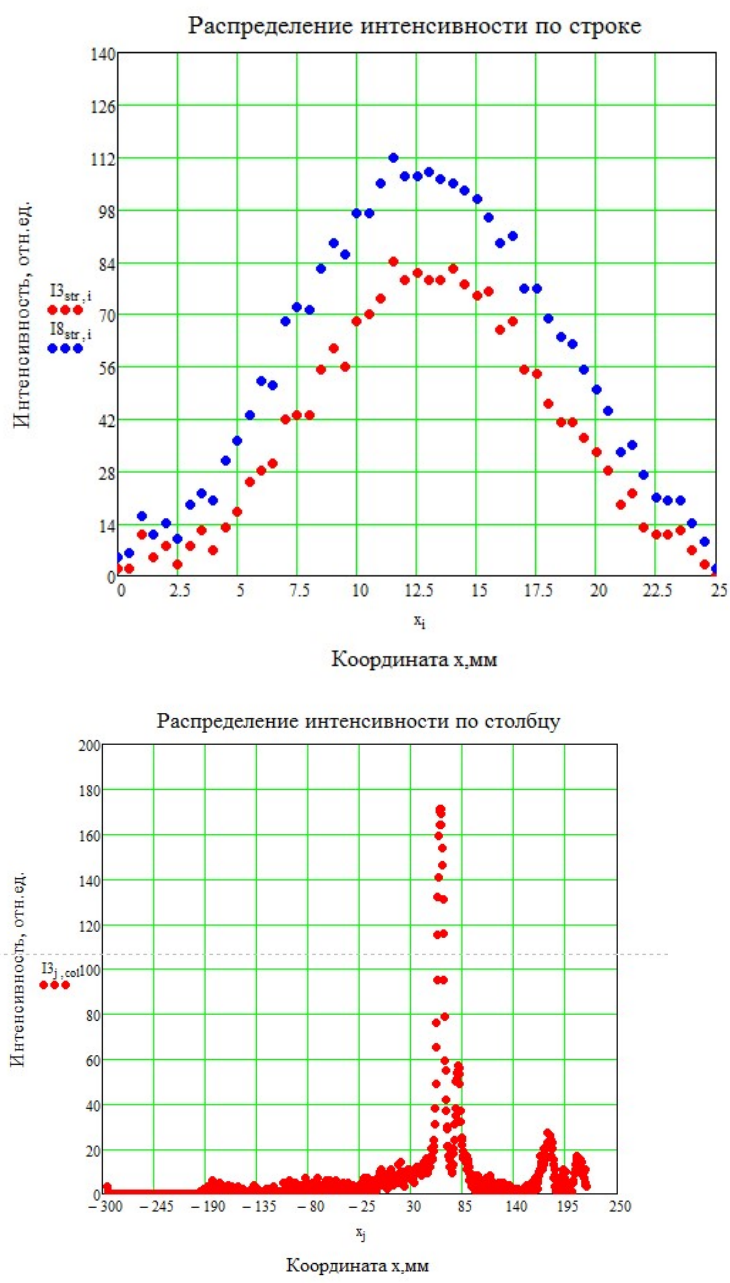


Рис. 4 Распределения интенсивности излучения по координате факела в различные моменты времени с шагом 2 мс

Данный график показывает, что изменение интенсивности составляет 30%. Подобный уровень флуктуации не допустим в спектрометрии и для испытаний фотоприемников, возникает необходимость обеспечения стабильной работы источника индуктивно-связанной плазмы. Результаты видеосъемки факела ИСП представлены в приложении 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты регистрации начальной стадии формирования разряда в индуктивно-связанной плазме методом высокоскоростной цифровой видеосъемки. Исследовался процесс предварительного вспомогательного пробоя в индукторе и последующего формирования факела в среде аргона при давлении близком к атмосферному. Получена информация о временной эволюции геометрических размеров плазменного факела и изменения его как интегральной интенсивности излучения, так и в

отдельных спектральных линиях. Данный источник может быть использован для калибровки фотоприемных устройств в ультрафиолетовом диапазоне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И.** Техника и практика спектроскопии // 1972, Изд. 2-е, испр. и доп. 392 с.: ил.
2. **Зайдель А. Н., Шрейдер Е.Я.** Спектроскопия вакуумного ультрафиолета, М.: Наука, 1967. – 472 с., ил.
3. Описание камеры Fastec HiSpec-1 www.fastecimaging.com

I. Korotkikh, Yu. Malakhov, N. Skornyakova

*National Research University (Moscow Power Engineering Institute), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya Str. 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

*National Research University "MPEI" (Moscow),
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail*

HIGH-SPEED REGISTRATION OF DISCHARGE FORMATION IN INDUCTIVELY- COUPLED PLASMA

ABSTRACT

The results of recording the initial stage of discharge formation in inductively coupled plasma by the method of high-speed digital videotaping are presented. The processes of preliminary auxiliary breakdown in inductor and the subsequent formation of a torch in argon medium at the close to atmospheric pressure were investigated. Information on the temporal evolution of the geometric dimensions of the plasma torch and its variation as in integrated radiation intensity, and in individual spectral lines is received.

DIGITAL VIDEOTAPING, INDUCTIVELY COUPLED PLASMA, SPACE-TIME
DISTRIBUTION OF RADIATION