

УДК 533.9.07

НАНОСЕКУНДНЫЙ ОБЪЕМНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД В ПОТОКЕ С ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ РАЗРЫВАМИ

И. А. Знаменская, Д. А. Коротеев

(кафедра молекулярной физики)

E-mail: znamen@phys.msu.ru; dkoroteev@yandex.ru

Представлены результаты экспериментов по взаимодействию области импульсной объемной ионизации со сверхзвуковым потоком газа в ударной трубе. Приведены пространственно-временные и спектральные характеристики плазмы наносекундного объемного разряда с предыонизацией ультрафиолетовым излучением плазменных электродов. Показана возможность локализации области ионизации при помощи газодинамических разрывов. Обсуждается вопрос о совпадении области свечения и области выделения разрядной энергии.

Введение

Изучение физики импульсных объемных газовых разрядов является важной составляющей развития таких направлений современной техники, как усовершенствование газоразрядных лазеров и использование плазмы для управления параметрами газовых потоков [1, 2]. Настоящая работа выполнена в рамках исследования взаимодействия области наносекундной ионизации и разрывного течения газа в ударной трубе. В работе отражены некоторые физические аспекты воздействия высокоскоростного разрывного течения газа на параметры области наносекундной ионизации.

Описание эксперимента

Эксперименты по исследованию взаимодействия ударноволновых потоков с поперечным импульсным объемным газовым разрядом проводились на установке, представляющей собой ударную трубу прямоугольного сечения 24 × 48 мм со встроенной разрядной камерой. Ударная труба позволяет инициировать ударные волны с числами Маха в диапазоне от 1 до 5. Рабочим газом является воздух, толкающим — гелий. Разрядная камера является продолжением канала ударной трубы. Верхняя и нижняя стенки камеры представляют собой плазменные электроды, а боковые стенки выполнены из кварцевых стекол, что позволяет проводить измерения пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы разряда. Длина межэлектродной области составляет 100 мм. При инициировании объемного разряда сначала происходит поджиг плазменных листов (электродов), ультрафиолетовое свечение которых обеспечивает предыонизацию области развития объемного разряда. Предыонизация обеспечивает однородность развития основной объемной фазы разряда, которое начинается спустя примерно 20 нс после поджига плазменных листов. Специальная

схема позволяет инициировать объемный разряд на любой стадии газодинамического процесса в разрядной камере.

Анализ и обсуждение результатов эксперимента

При помощи электронно-оптической стробируемой камеры с наносекундным затвором получена зависимость интенсивности свечения плазмы объемного разряда в неподвижном газе от времени (рис. 1). Очевидно, что с увеличением давления газа время свечения уменьшается. Это связано с ускорением процессов релаксации энергии внутренних степеней свободы молекул газа при увеличении их плотности и уменьшении удельного энерговклада на частицу. Время свечения находится в соответствии с длительностью импульса тока разряда, которая составляет примерно 200 нс.

Спектральный анализ свечения объемного разряда проводился с использованием цифрового спектрометра и оптоволоконного волновода с широким

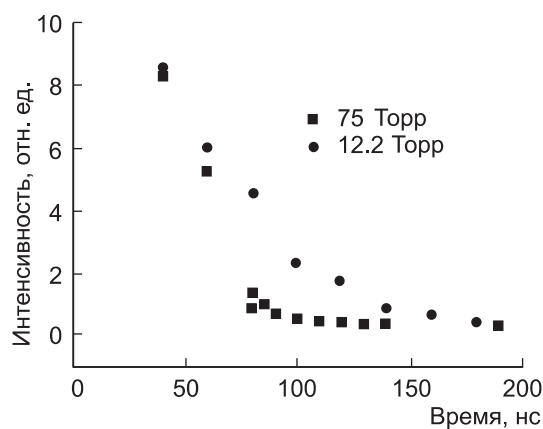


Рис. 1. Зависимость интенсивности свечения плазмы объемного разряда в неподвижном газе от времени

спектром пропускания. Установлено, что основная часть спектра излучения плазмы разряда представляет собой излучение второй положительной системы азота (N_2^+). Интенсивность всех различных линий спектра падает с ростом давления, так же как и интегральная по спектру и времени интенсивность свечения.

Время свечения разряда не превышает 150–200 нс, и с газодинамической точки зрения поток, скорость которого около 1000 м/с, за это время остается практически неподвижным в масштабах размеров разрядной камеры. При инициировании разряда в момент, когда в разрядной камере находится ударная волна или область контактного перехода, наблюдается локализация свечения в области низкого давления перед газодинамическим скачком. Это связано с сильной зависимостью локальной проводимости газа от параметра E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация молекул газа). Кроме того, в области контактного перехода воздух–гелий происходит резкое изменение потенциала ионизации, что также способствует локализации свечения перед контактным разрывом (в воздухе). На рис. 2 представлены изображения свечения разряда в неподвижном газе и в случае инициирования разряда в момент, когда в межэлектродной области находится плоский газодинамический скачок. Установлено, что при инициировании разряда в промежутке с ударной волной форма спектра остается неизменной, а интенсивность полос растет с увеличением расстояния x , пройденного ударной волной по разрядной камере на момент инициирования разряда (рис. 3, а). При неизменном давлении перед ударной волной зависимость интенсивности полос и интегральной интенсивности свечения от x аппроксимируется соотношением $I(x) = I_0/(1 - x/L)$, где I_0 — интенсивность полосы (интегральная интенсивность) при инициировании разряда в покое газе при соответствующем давлении. (Здесь и далее под интегральной интенсивностью подразумевается интенсивность интегральная по времени и спектру, усредненная по области свечения.) Указанное соотношение также описывает экспериментальные данные по ионизации области контактного перехода. В этом случае I_0 — интегральная интенсивность свечения плазмы при ионизации области однородного потока за ударной волной, а x — расстояние, пройденное контактной поверхностью по разрядной камере на момент инициирования разряда (рис. 3, б). Во всех случаях приведенное соотношение аппроксимирует экспериментальные зависимости при $0 \leq x \leq 95$ мм с коэффициентом корреляции не менее 0.83.

В работе [3] приведены результаты плазмохимического расчета параметров рассматриваемого разряда в покое газе и при наличии в разрядном промежутке ударной волны. Показано, что удельный энергозатрат q в области разрядной камеры

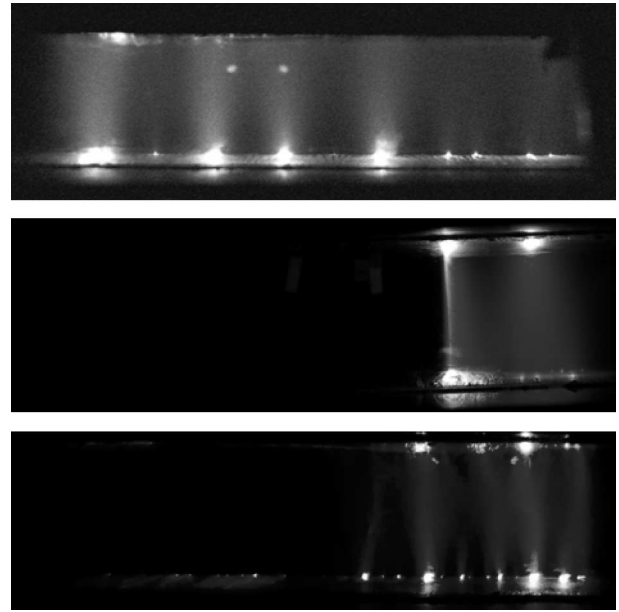


Рис. 2. Свечение разряда в неподвижном газе (сверху), перед ударной волной (в середине) и перед контактным переходом (снизу)

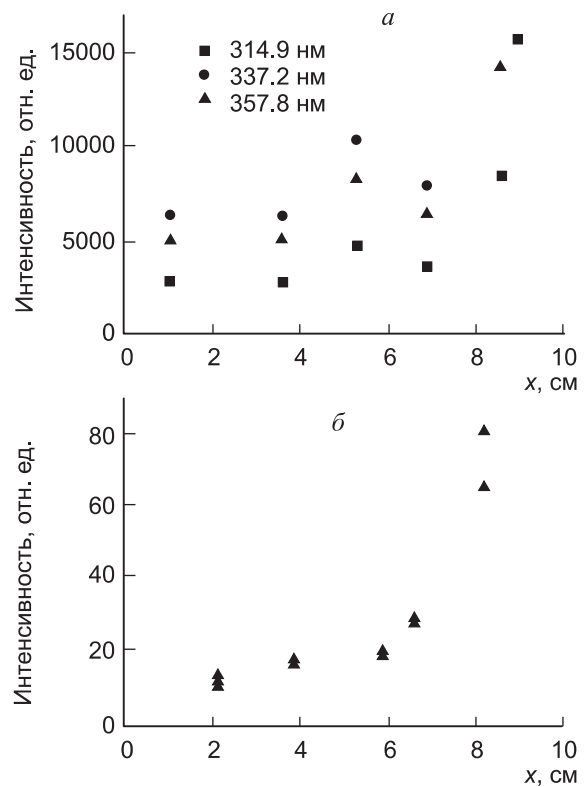


Рис. 3. Интенсивность некоторых полос N_2^+ в зависимости от положения фронта ударной волны в разрядном промежутке (а) и интегральная интенсивность свечения в зависимости от положения контактного перехода в разрядном промежутке (б)

объема V , находящейся перед ударной волной, хорошо аппроксимируется соотношением $q = q_0 V_0/V$, где V_0 — полный объем разрядной камеры, q_0 —

удельный энерговклад при иницировании разряда в неподвижном газе при давлении, равном давлению перед фронтом ударной волны. Очевидно, что $V \sim L - x$, что в соответствии с приведенными выше зависимостями позволяет сделать вывод о том, что $q(x) \sim I(x)$, причем в качестве I может выступать как интегральная интенсивность свечения плазмы разряда, так и интенсивность одной из характерных полос спектра.

Заключение

В работе приведены экспериментальные зависимости интенсивности свечения объемного наносекундного газового разряда с плазменными электродами от времени. Установлено, что время свечения падает с ростом давления газа. Показана возможность локализации области свечения и энерговклада при помощи газодинамических разрывов. При локализации свечения перед ударной волной область

свечения совпадает с областью энерговклада при значениях последнего не более 0.15 мДж/мм^3 (или $x \leq 95 \text{ мм}$). Показано, что в качестве характеристики величины энерговклада могут быть использованы интегральная интенсивность свечения или интенсивность одной из характерных полос спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-08-50247а).

Литература

1. Chernyi G.G. // Proc. AIAA 2nd Weakly Ionized Gases Workshop. Norfolk (Virginia, USA), 1998. P. 1.
2. Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscaden A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. **38**, No. 4. P. R33.
3. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Попов Н.А. // ТВТ. 2005. **43**, № 6. С. 820.

Поступила в редакцию
03.09.07