

Эволюция наносекундного комбинированного объемного разряда с плазменными электродами в потоке воздуха

Н. О. Архипов^а, И. А. Знаменская^б, И. В. Мурсенкова^с, И. Ю. Остапенко, Н. Н. Сысоев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^аarkhipov@physics.msu.ru, ^бznamen@phys.msu.ru, ^сmurs_i@physics.msu.ru

Статья поступила 19.06.2013, подписана в печать 08.10.2013.

Исследованы пространственно-временные характеристики импульсного комбинированного объемного разряда с предыонизацией от плазменных листов наносекундной длительности в воздухе (~ 200 нс). Проанализированы интегральное излучение разряда, спектральный состав излучения и ток разряда при различных условиях в разрядном объеме, в том числе в газодинамическом потоке с плоской ударной волной. Показано, что свечение объемного разряда однородно в основной фазе. В области фронта ударной волны свечение усиливается, его длительность может превышать 2 мкс.

Ключевые слова: импульсный объемный разряд, плазменный электрод, электронно-оптическая камера, динамика излучения, ударная волна.

УДК: 533.6.011, 537.52. PACS: 52.80.-s, 52.30.-q.

Введение

Низкотемпературная неравновесная плазма газовых разрядов применяется во многих технологических процессах в микроэлектронике, лазерной технике, электротехнике, экологии, медицине, авиации [1–8]. Для оценки эффективности воздействия газоразрядной плазмы на течение газа необходимо исследование различных режимов инициирования разряда в потоках с одновременным контролем электроразрядных, излучательных и газодинамических параметров.

Оптимальный однородный импульсный энерговклад в поток газа в канале достигается при организации объемного разряда в диффузной форме, когда в течение десятков наносекунд формируется объемная область неравновесной плазмы [2, 9–13]. В работах [9, 10] показано, что ионизационные процессы, приводящие к пробою азота и воздуха повышенного давления, начинаются в объеме газа, а не на поверхности электродов. Измерения времен и интенсивностей излучения из различных областей объемного импульсного разряда дают возможность получать данные о локализации и динамике импульсного энерговклада в неподвижной среде [9–13]. В то же время экспериментальных данных о характеристиках импульсного объемного разряда в высокоскоростных газодинамических потоках крайне мало, в частности о динамике развития разряда, токовых параметрах и распределении излучения в пространстве.

Цель настоящей работы — исследование с высоким временным разрешением пространственно-временных характеристик импульсного объемного разряда с предыонизацией от плазменных листов (скользящих поверхностных разрядов) [7, 8], которое проводилось с помощью высокоскоростных камер БИФО К008 и К011, позволяющих исследовать динамику развития наносекундного разряда в фотохронографическом и в кадровом режиме соответственно. Одновременно регистрировалось интегральное свечение разряда, анализировался спектральный состав излучения и осциллографировался ток разряда.

1. Постановка экспериментов

1.1. Экспериментальная установка

Эксперименты по исследованию разряда в потоках воздуха проводились на ударной трубе с разрядной камерой (рис. 1). Внутреннее сечение канала ударной трубы и разрядной камеры — 48×24 мм. Боковые стенки разрядной камеры были выполнены из кварцевого стекла (КУ, полоса пропускания 200–2800 нм) длиной 17 см. Скорости ударных волн измерялись базовым методом по сигналам пьезоэлектрических датчиков давления в канале ударной трубы, подключенных к цифровому осциллографу; с помощью этих сигналов также осуществлялась синхронизация процессов при инициировании разряда в присутствии фронта ударной волны в разрядном объеме. Экспериментальные исследования проводились в неподвижном воздухе при давлениях 2–110 торр и в потоке с ударной волной (числа Маха ударных волн 2.5–4.0).

1.2. Разрядная камера

Импульсный комбинированный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым свечением от двух плазменных электродов инициировался в разрядной камере (рис. 1). На верхней и нижней стенках камеры на расстоянии 24 мм друг от друга создавались импульсные скользящие разряды площадью 30×100 мм (плазменные листы), обеспечивающие предыонизацию объема между ними [7, 14] и выполняющие роль электродов объемного разряда.

Электрическая схема комбинированного импульсного разряда, включающего два скользящих поверхностных разряда и объемный разряд, показана на рис. 2. Импульсное питание разряда осуществлялось от конденсатора C_1 , заряжаемого до рабочего напряжения 20–30 кВ и коммутируемого разрядником РУ-65. При приложении импульсного напряжения с крутизной нарастания $10^{11} \div 10^{12}$ В/с и зарядке распределенных по длине электродов емкостей C_2 формируется система

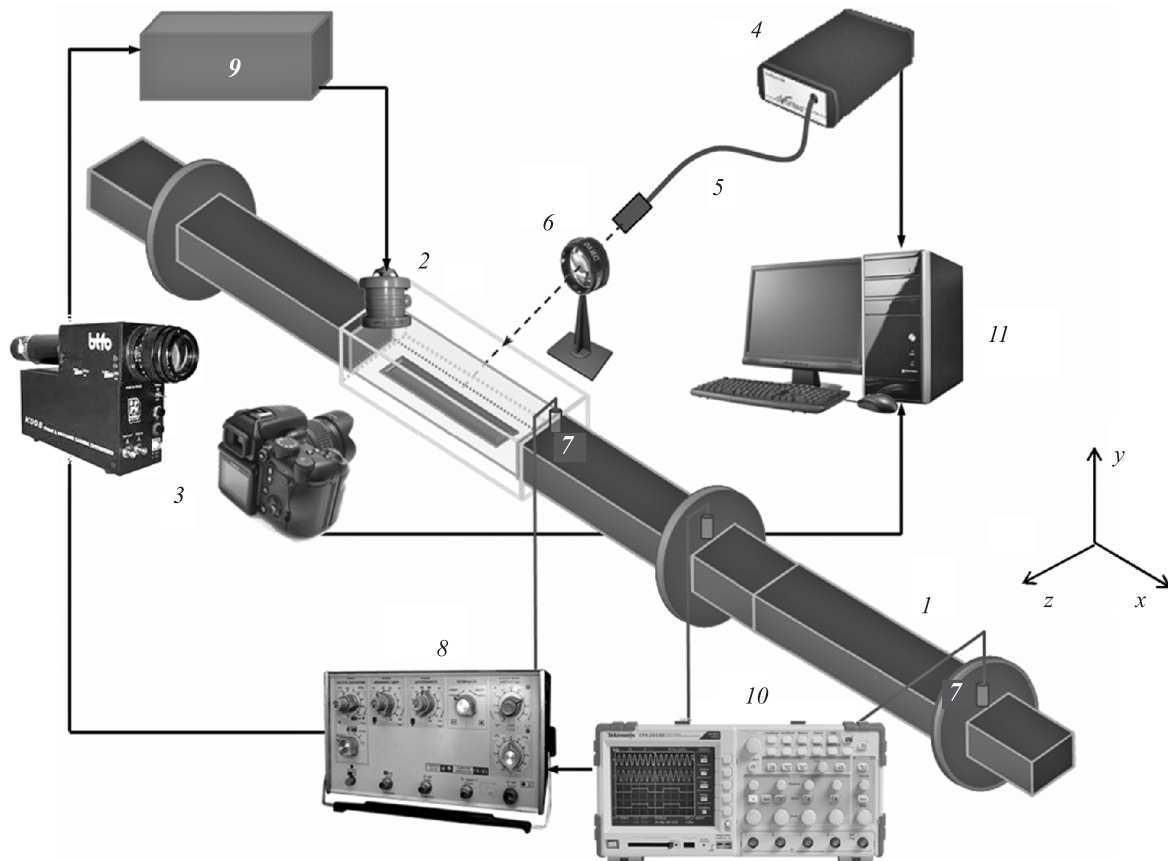


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — ударная труба, 2 — разрядная камера, 3 — фотокамера/БИФО-камера, 4 — спектрометр, 5 — оптоволоконный кабель, 6 — кварцевая линза, 7 — датчики давления, 8 — генератор импульсов, 9 — блок запуска разряда, 10 — осциллограф, 11 — ПК

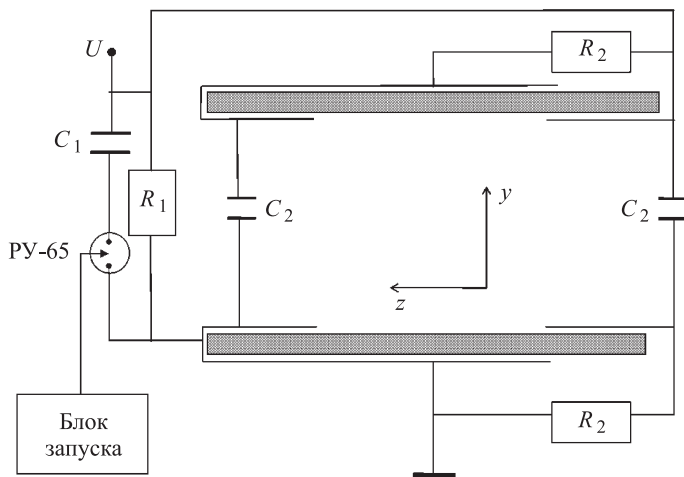


Рис. 2. Электрическая схема разряда: $C_1 = 2300$ пФ, $C_2 = 470$ пФ, $R_1 = R_2 = 1$ кОм

каналов скользящего разряда по поверхностям диэлектрика, образующая верхний и нижний плазменные листы [7, 8, 14]. После достижения достаточной концентрации электронов формировался объемный разряд [4, 7]. Ток разряда измерялся с помощью малоиндуктивного шунта специальной конструкции. Шунт располагался в разрыве заземления и регистрировал полный ток комбинированного разряда.

1.3. Регистрация излучения разряда

Интегральное свечение разряда регистрировалось фотокамерой Canon EOS 550D, временем экспозиции являлось время свечения разряда (~ 200 нс).

На рис. 3 показаны фотографии разряда при фоторегистрации разрядного промежутка сбоку (а) и с торца разрядной камеры (б). В случае б был удален сегмент ударной трубы, а торцевая часть разрядной секции была герметично закрыта прозрачной пластиной. Пунктиром показаны два положения щели при регистрации временных разверток свечения разряда.

Для регистрации свечения разряда с наносекундным разрешением использовались высокоскоростные электронно-оптические камеры БИФО K008 и K011. Диапазон спектральной чувствительности ЭОП камер 380–880 нм, размеры рабочего поля фотокаатода 13×17.3 мм.

Камера K008 в режиме линейной развертки (фотохронографическом режиме), регистрировала временную развертку изображения разряда, попадающего в щель камеры шириной 50–200 мкм. Длительность временной развертки варьировалась от 200 нс до 20 мкс. Камера K011 работала в режиме девятикадровой регистрации изображения с экспозицией от 100 нс. Ввод изображения в персональный компьютер производится с помощью ПЗС считывающего устройства.

Спектры излучения разряда регистрировались спектрометром AvaSpec 2048FT (диапазон длин волн от 174 до 1100 нм). На рис. 4 показаны характерные спек-

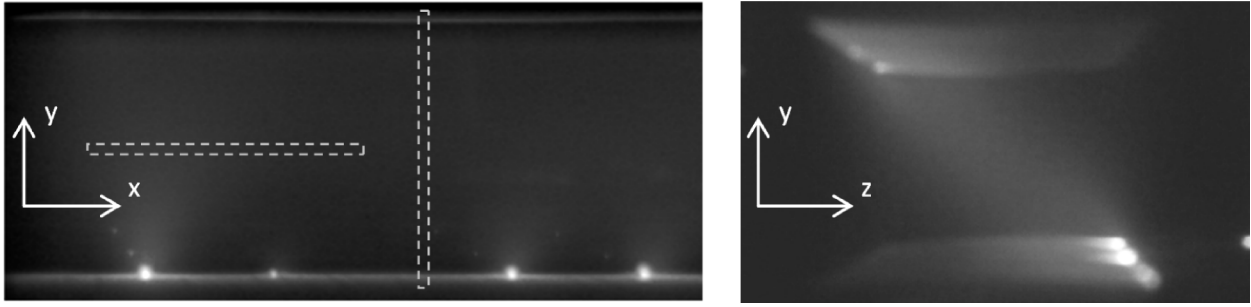


Рис. 3. Интегральное свечение разряда в неподвижном воздухе (60 торр, 25 кВ): а — в плоскости XOY (вид сбоку); б — в плоскости YOZ (вид с торца)

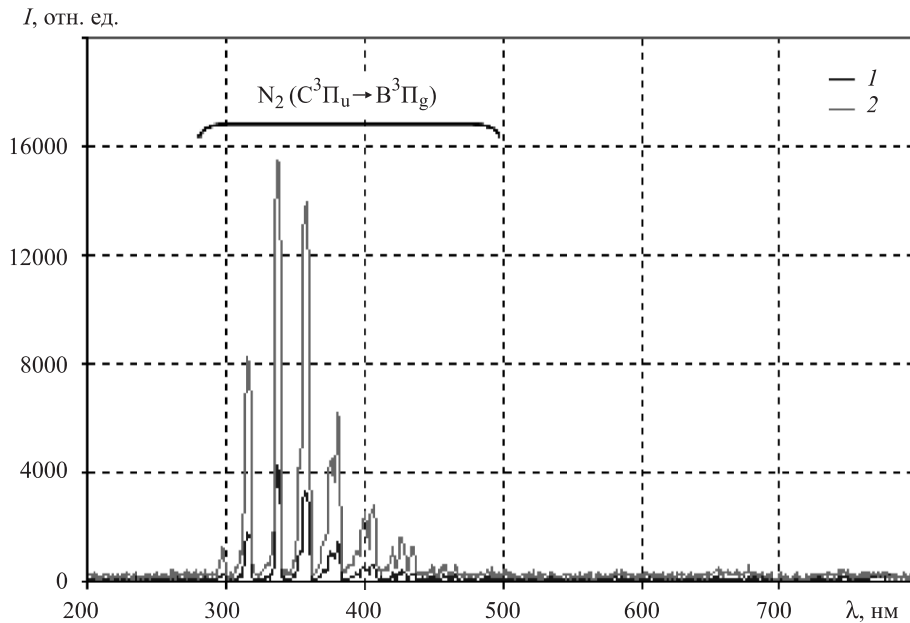


Рис. 4. Спектры излучения разряда: 1 — в неподвижном воздухе (давление 25 торр); 2 — в присутствии фронта ударной волны в разрядном объеме (давление перед фронтом волны 25 торр, число Маха 3.2). Напряжение 25 кВ

тры разряда в неподвижном воздухе и в потоке воздуха с ударной волной. Основной вклад в излучение объемного разряда дает вторая положительная система азота 2^+N_2 , соответствующая переходам $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ [15], как и в случае инициирования только поверхностных разрядов [16]. Следует отметить, что основная часть излучения лежит в ультрафиолетовой области спектра, в то время как фотокамера и электронно-оптические камеры регистрируют видимый и часть инфракрасного диапазона.

2. Характеристики разряда в неподвижном воздухе

2.1. Ток разряда

На рис.5 показаны осциллограммы тока в неподвижном воздухе. При различных значениях напряжения и давления до 70 торр осциллограммы тока имеют колебательный характер, при давлениях выше 70 торр становятся аperiodическими. При обработке осциллограмм тока измерялись максимальное значение тока разряда I_{max} , полная длительность первого полупериода тока и длительность первого полупериода на полувысоте сигнала $\Delta t_{1/2}$.

На рис. 6 приведены зависимости максимального тока разряда I_{max} и его длительности от давления в неподвижном воздухе. Ток разряда составляет 400–1200 А и уменьшается с ростом давления в соответствии с увеличением сопротивления разрядного промежутка. Из рис. 6, б следует увеличение длительности тока разряда с ростом давления. Это связано с тем, что при повышении давления (и плотности) уменьшается величина приведенного электрического поля E/N , что ведет к уменьшению скорости ионизации в разрядном объеме и увеличению времени наработки необходимой концентрации электронов [1–4].

По максимальному значению силы тока оценивалась максимальная концентрация электронов в разрядном объеме согласно [4, 16]

$$j_{maxV} = \frac{I_{maxV}}{S} = e \cdot n_e \cdot V_d(E/N),$$

где j_{maxV} — плотность тока объемного разряда, e — заряд электрона, n_e — концентрация электронов, $S = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ — поперечное сечение тока объемного разряда, $V_d(E/N)$ — скорость дрейфа электронов в электрическом поле напряженностью E при концентрации нейтральных частиц N . Величина электри-

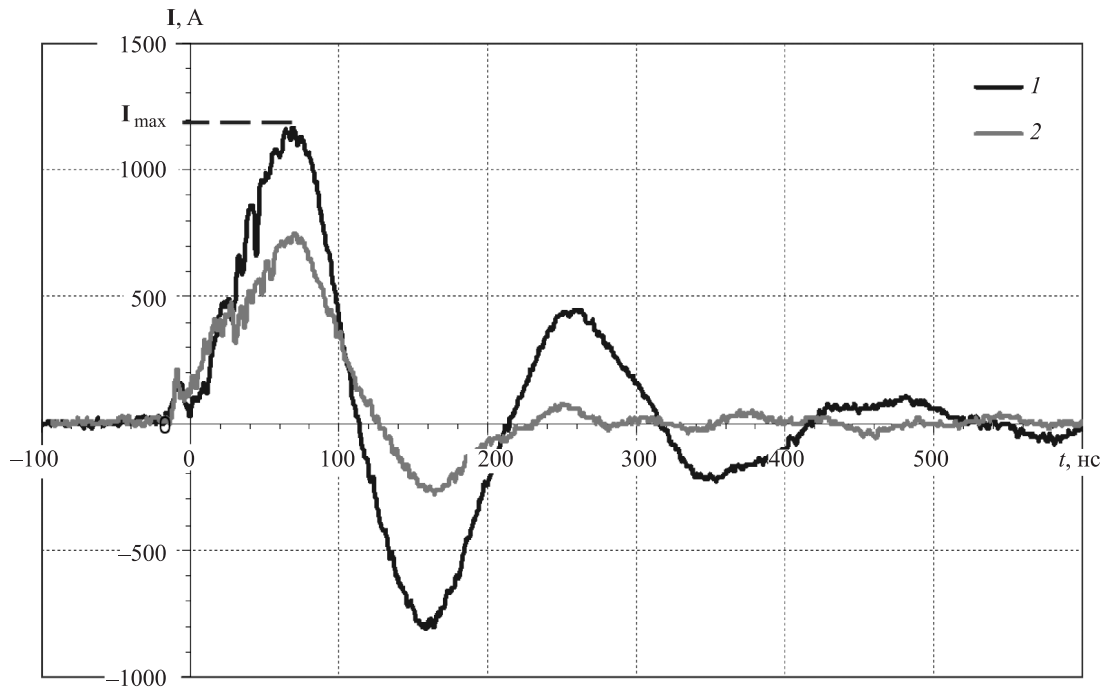


Рис. 5. Осциллограммы тока в неподвижном воздухе при напряжении 30 кВ и давлении 18 торр (1) и 73 торр (2)

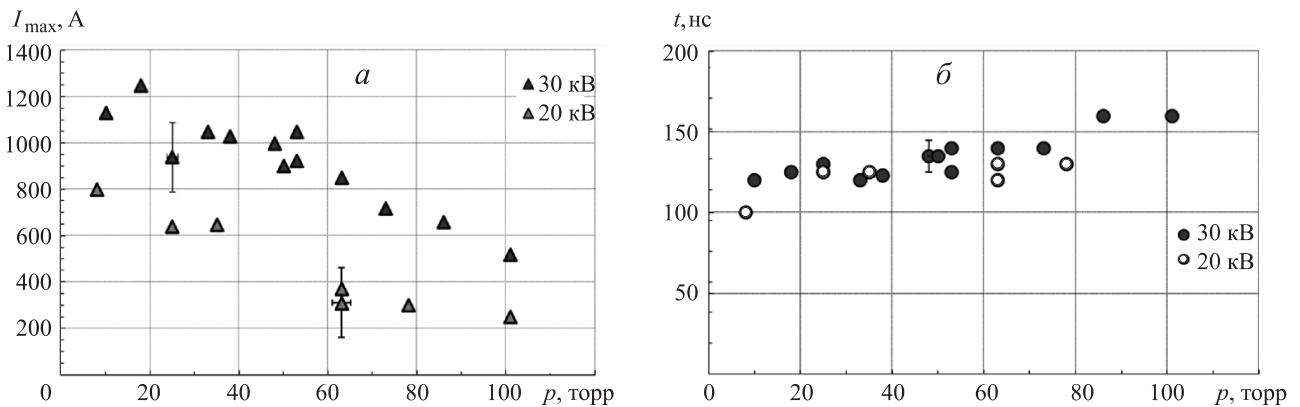


Рис. 6. Максимальное значение тока разряда (а) и длительность первого полупериода (б) в зависимости от давления воздуха

ческого поля в объемном разряде оценивалась исходя из соотношения параметров электрической цепи: часть энергии, запасенной в основной емкости, идет на организацию скользящих разрядов; оставшаяся — на питание объемного разряда. Падение напряжения на объемном разряде, таким образом, было $\sim 0.7U$. Приведенная напряженность электрического поля составляла $E/N = (2 \div 30) \cdot 10^{-20} \text{ В} \cdot \text{м}^2$, а скорости дрейфа электронов $V_d = (3 \div 70) \cdot 10^4 \text{ м/с}$ [17]. При этих условиях концентрация электронов достигала $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

2.1. Пространственно-временные характеристики излучения разряда

На рис. 7 показаны результаты 9-кадровой регистрации процесса развития объемного разряда высокоскоростной камерой К-011 в плоскости XOY (ср. с рис. 3, а). Экспозиция кадра 100 нс, длительность паузы между кадрами 100 нс). На рис. 7, а на первом кадре зафиксирована стадия поверхностных разрядов

на нижней и верхней стенках разрядной камеры, которые обеспечивают предыонизацию объема между плазменными электродами. На втором кадре (через 100 нс) зарегистрирована объемная фаза разряда, на третьем эта фаза практически завершена. На последующих кадрах наблюдается послесвечение каналов поверхностных разрядов. На рис. 7, б на первом кадре отчетливо видно формирование пробоя из центра объема между плазменными листами. Второй кадр (через 100 нс) соответствует затуханию объемной фазы разряда, после чего затухают каналы поверхностных разрядов. В результате полная длительность объемной фазы излучения разряда составляет менее 300 нс.

На рис. 8 изображена последовательность кадров, показывающая развитие комбинированного разряда с плазменными электродами в при регистрации в плоскости YOZ. Однородно распределенное излучение двух плазменных листов во время фазы предыонизации (1) обеспечивает однородную по пространству предыони-

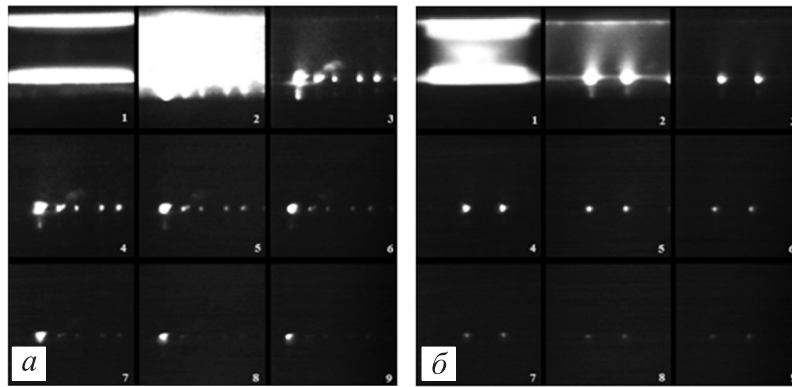


Рис. 7. Результаты 9-кадровой съемки разряда в неподвижном воздухе: 68 торр, 22 кВ (а); 18 торр, 25 кВ (б). Регистрация в плоскости XOZ; цифрами обозначен порядок следования кадров

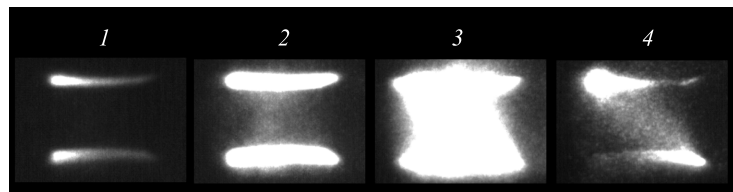


Рис. 8. Последовательность изображений, показывающая развитие разряда в неподвижном воздухе (60 торр, 25 кВ) (цифрами обозначен порядок следования)

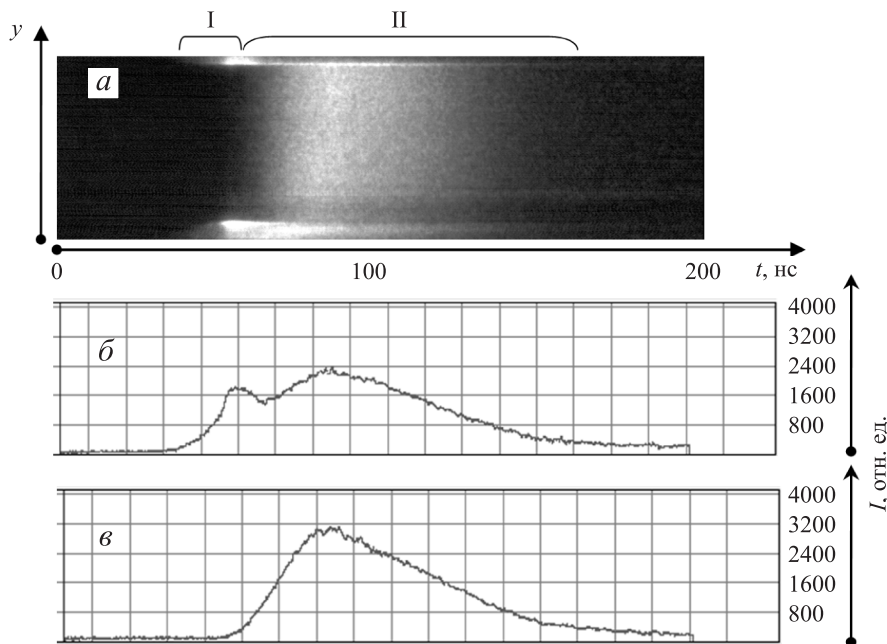


Рис. 9. а — развертка свечения разряда в в неподвижном воздухе (25 торр, 30 кВ); б, в — зависимости интенсивности свечения от времени для поверхностной и объемной фаз соответственно

зацию объема. В результате пробой носит объемный характер (2). Фаза объемного разряда характеризуется высокой степенью пространственной однородности во всех направлениях (3). Поверхностные разряды на этом этапе играют роль плазменных электродов объемного разряда. Видно, что на стадии предьонизации плазменные листы за время экспозиции интенсивнее высвечивают симметрично отраженные области (слева); это соответствует прорастанию каналов поверхностного разряда. В основной фазе горения объемного разряда и поверхностные, и объемный разряды горят весьма сим-

метрично относительно геометрического центра разрядного объема в виде параллелепипеда $24 \times 30 \times 100$ мм. На этапе затухания объемного разряда интенсивность плазменных листов и соответственно объемного разряда максимальна в диагональном направлении.

Типичная развертка свечения комбинированного разряда при вертикальном положении щели показана на рис. 9,а (ширина щели 100 мкм). Интенсивное свечение в верхней и нижней частях развертки определяется излучением поверхностных разрядов. Временные профили интенсивности излучения для объемной

и поверхностной фаз получены путем обработки соответствующих областей изображения (рис. 9, б, в). На развертке показаны стадия предьонизации (I), стадия объемного свечения (II). Максимум интенсивности свечения поверхностного разряда соответствует моменту пробоя объема между плазменными листами и началу фазы объемного свечения.

Длительность стадии предьонизации составляет 10–30 нс и возрастает с увеличением давления воздуха (рис. 10). Длительность свечения объемной фазы разряда (ширина профиля свечения на полувысоте) при давлениях до 70 торр уменьшается с ростом давления, затем растет, при этом меняется форма оптического импульса. Анализ временных разверток при вертикальном и горизонтальном положении щели камеры, как и при кадровой съемке, показал одновременность пробоя во всем объеме и высокую степень пространственной однородности объемной фазы разряда при различных условиях инициирования.

Сравнение временных характеристик тока и излучения приведено на рис. 11. Результаты получены при одинаковых параметрах настройки регистрирующей аппаратуры (чувствительность ФЭУ, уровень запуска и т. д.) и геометрии эксперимента. Длительность свечения определялась на уровне 10% от максимального

значения с учетом вычитания шума. Видно, что при давлениях ~ 10 торр длительность излучения превышает длительность тока разряда приблизительно на 30 нс, что близко к времени жизни верхнего состояния S_3P_u второй положительной системы азота (37 нс [15]). При малых давлениях происходит преимущественно радиационный переход из возбужденного состояния. С увеличением давления газа частота столкновений молекул увеличивается, что увеличивает вероятность потери возбуждения и передачи энергии в другие каналы и уменьшение длительности послесвечения при давлениях выше 50–60 торр.

Таким образом, при развитии комбинированного разряда на стадии предьонизации происходят прорастание каналов поверхностного разряда и лавинное размножение электронов в объеме в результате фотоионизации. Затем следует стадия объемного разряда с достижением максимума тока разряда; на этой стадии происходит основной энерговклад в объем и нагрев газа [4]. Послесвечение поверхностного разряда, рекомбинация электронов и ионов происходят после прекращения тока разряда.

3. Излучение разряда в присутствии фронта ударной волны

При наличии ударной волны, движущейся в канале ударной трубы и в момент разряда находящейся в разрядном объеме, свечение локализуется перед фронтом ударной волны, в области низкого давления [8]. В этой части объема выше величина приведенного электрического поля E/N , соответственно выше скорость ионизации и концентрация электронов в момент развития объемной фазы разряда. На рис. 12, а, б приведены изображения свечения импульсного объемного разряда и показано положение щели камеры K008 в экспериментах по регистрации разверток свечения разряда в области фронта плоской ударной волны. Непосредственно вблизи фронта ударной волны наблюдается увеличение интенсивности свечения разряда, как отмечалось ранее [8]. Осциллограммы тока в случаях а, б практически одинаковы.

На развертке свечения в присутствии ударной волны (рис. 12, г) наблюдаются пульсации свечения, отсутствующие в неподвижном воздухе (рис. 12, в). Период пульсаций свечения соответствует полупериоду колебаний тока разряда [11, 18]. Полная длительность свечения вблизи фронта ударной волны зависит от положения ударной волны в разрядном промежутке, она превышает длительность свечения в неподвижном воздухе. После прекращения тока разряда продолжает излучать узкая область вблизи фронта ударной волны, длительность послесвечения зависит от условий организации разряда и может превышать 2 мкс. Так как фронт ударной волны движется со скоростью около 1100 м/с, линия свечения на развертке имеет наклон. На рис. 12, г наблюдается затухание свечения, а затем его возобновление после 1500 нс.

Зарегистрированное в экспериментах свечение относится к ближней области послесвечения азота [15, 21]. В работах [19, 20] отмечалось, что его возникновение может быть связано с локальной поляризацией плазмы, образованием слоя пространственного заряда на фронте

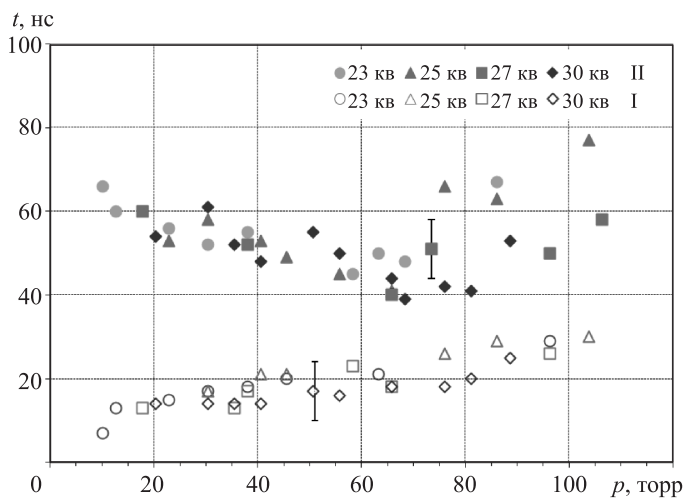


Рис. 10. Зависимость длительности стадии предьонизации (I) и объемной фазы свечения разряда (II) от давления при различных напряжениях

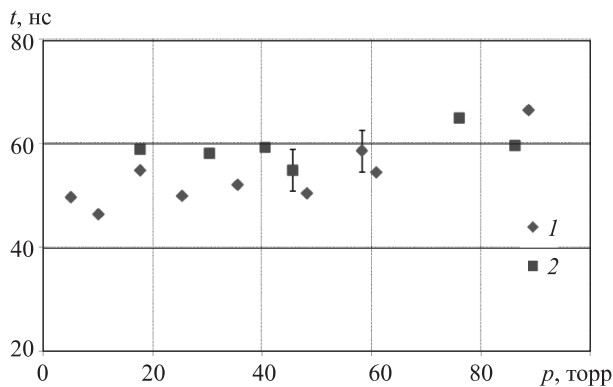


Рис. 11. Зависимости длительности первого полупериода тока разряда (1) и полной длительности излучения (2) от давления (напряжение 25 кВ)

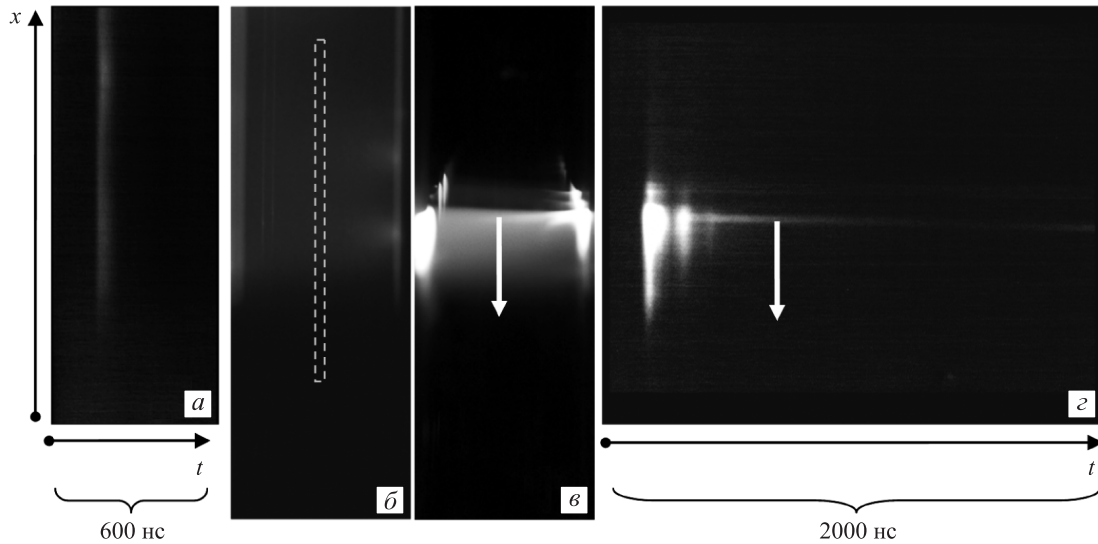


Рис. 12. Изображения свечения разряда (б, в) и развертки свечения (а, г) при напряжении 30 кВ: а, б — в неподвижном воздухе при давлении 25 торр; в, г — в потоке с плоской ударной волной (число Маха 3.2, давление перед фронтом 25 торр); направление движения ударной волны показано стрелкой. Пунктиром показано положение щели камеры K008

ударной волны и усилением интенсивности переходов между уровнями азота.

Заключение

Проведены исследования в кадровом и фотохронографическом режимах пространственно-временных характеристик комбинированного объемного разряда с предыонизацией от плазменных листов наносекундной длительности в воздухе, проанализированы спектры и осциллограммы тока разряда. Установлены зависимости динамических характеристик разряда от напряжения на разрядном промежутке и давления воздуха. Показана высокая однородность пространственного распределения излучения основной объемной стадии разряда.

Получены развертки, зафиксировавшие перераспределение свечения импульсного объемного разряда в присутствии плоской ударной волны в разрядном промежутке и его эволюцию, связанную с зарегистрированными колебаниями тока. Показано, что в области фронта ударной волны послесвечение может превышать 2 мкс.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-08-00297, 14-08-00777а) на оборудовании, приобретенном в рамках Программы развития Московского университета до 2020 г.

Список литературы

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1987.
2. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М., 1991.
3. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М., 1987.

4. Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Прохоров А.М. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1984. **48**, № 7. С. 1430.
5. Борисов В.М., Демин А.И., Ельцов А.В. и др. // Квант. электроника. 1999. **26**, № 3. С. 204.
6. Иванов В.А., Куранов А.Л., Кучинский В.В., Сухомлинов В.С. // Полет. 2004. № 12. С. 28.
7. Знаменская И.А., Латфуллин Д. Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 3. С. 57.
8. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A.E. // Physics of Fluids. 2008. **20**. P. 056101-1.
9. Иванов С.Н., Лисенков В.В., Шпак В.Г. // Журн. техн. физ. 2008. **78**. № 9. С. 64.
10. Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г. и др. // Журн. техн. физ. 2010. **80**. № 2. С. 51.
11. Ono R., Nakagawa Y., Oda T. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. **44**, N 48. P. 485201.
12. Kettlitz M., Hofst H., Hoder T. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. **45**, N 24. P. 245201.
13. Komuro A., Ono R., Oda T. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. **45**, N 26. P. 26520.
14. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е. и др. // Журн. техн. физ. 2007. **77**. № 5. С. 10.
15. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М., 2006.
16. Belysheva I.V., Chvyreva A.V., Mursenkova I.V. // Proc. of 22nd Intern. Symp. on Transport Phenomena (Delft, The Netherlands). 2011. CD-Rom Proc., 165.pdf.
17. Brunet H., Vincent P. // J. Appl. Phys. 1979. **50**. P. 4708.
18. Beverly III R.E. // J. Appl. Phys. 1986. **60**, N 1. P. 104.
19. Siefert N., Ganguly B.N., Bletzinger P. // Phys. Rev. E. Stat. Nonlin. Soft Matter. Phys. 2005. **72**. P. 066402.
20. Es-sebbar Et., Benilan Y., Jolly A., Gazeau M.-C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. **42**. P. 135206.
21. Верецагин К.А., Смирнов В.В., Шахатов В.А. // Журн. техн. физ. 1997. **67**, № 5. С. 34.

Development of nanosecond combined volume discharge with plasma electrodes in an air flow**N. O. Arkhipov^a, I. A. Znamenskaya^b, I. V. Mursenkova^c, I. Yu. Ostapenko, N. N. Sysoev***Department of Molecular Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^aarkhipov@physics.msu.ru, ^bznamen@phys.msu.ru, ^cmurs_i@physics.msu.ru.*

The space–time characteristics of a nanosecond combined volume discharge with preionization from a plasma sheet with a nanosecond duration in air (~ 200 ns) are investigated. The integral discharge radiation, radiation spectrum, and discharge current under conditions within the discharge volume, including gas-dynamic flow with a planar shock wave, are analyzed. It is shown that the volume discharge glow is homogeneous in the master phase. The glow in the area of the shock-wave front increases and its duration may be more than $2\mu\text{s}$.

Keywords: pulse-volume discharge, plasma electrode, electron-optical camera, radiation dynamics, shock wave.

PACS: 52.80.–s, 52.30.–q.

Received 19 June 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2014).

Сведения об авторах

1. Архипов Николай Олегович — студент; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: arkhipov@physics.msu.ru.
2. Знаменская Ирина Александровна — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
3. Мурсенкова Ирина Владимировна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: murs_i@physics.msu.ru
4. Остапенко Ирина Юрьевна — студентка; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: driadafantasy@mail.ru.
5. Сысоев Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, декан; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru.