

04:07

## **Измерение параметров импульсного объемного разряда наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления**

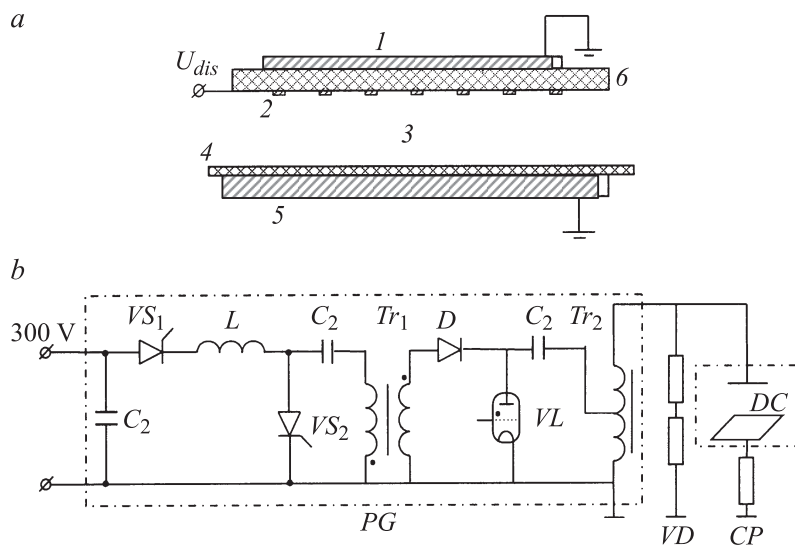
© Е.А. Елистратов, А.П. Кузнецов, С.П. Масленников,  
А.А. Протасов, Э.Я. Школьников

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва  
E-mail: ujin1221@yandex.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2012 г.

Приводятся основные электрические характеристики импульсных объемных разрядов наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления, результаты измерения температур спектральными методами и электронной плотности плазмы многолучевым интерферометром Фабри–Перо. Показано, что при условии сохранения разрядом объемной формы, максимальное значение электронной плотности составляет  $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что сопоставимо с критическим значением для стримерных разрядов.

Неравновесная низкотемпературная плазма объемного импульсно-периодического газового разряда вследствие ряда особенностей, таких как низкие газовые температуры при сравнительно высоких энергиях электронов, интенсивное ультрафиолетовое излучение, активное протекание плазмохимических реакций, находит применение в различных технологических процессах, в частности: в биологической и химической очистке, для нанесения тонких пленок, при синтезе кремниевых нанотрубок, для модификации свойств поверхностей полимерных материалов. В ряде приложений плазма в таких разрядах применяется в качестве среды, поглощающей или отражающей электромагнитное излучение СВЧ-диапазона. Экспериментальные результаты, получаемые в лабораторных условиях для подобных разрядов небольшой энергии (около нескольких десятков мДж в импульсе), могут представлять интерес при моделировании более масштабных плазменных процессов, наблюдаемых в земной атмосфере.



**Рис. 1.** *a* — структурная схема электродной системы: 1, 5 — заземленные электроды; 2 — высоковольтный электрод; 3 — область горения объемного разряда; 4 — диэлектрик; 6 — диэлектрическая пластина; *b* — схема импульсного электропитания установки: *PG* — генератор импульсов; *VD* — делитель напряжения; *CP* — токовый шунт; *DC* — газоразрядная камера.

Данная работа посвящена исследованию зависимости температуры плазмы от режимов разряда методом оптической эмиссионной спектроскопии и измерению электронной плотности многолучевым лазерным интерферометром Фабри–Перо.

Генерация импульсно-периодических диффузных разрядов проводилась в электродной системе с резконеоднородным распределением электрических полей вблизи высоковольтного электрода. Особенностью электродной системы является одновременное возбуждение двух разрядов от одного импульса напряжения (рис. 1, *a*). Напряжение подается на гребенчатый электрод 2, расположенный на диэлектрической пластине 6. На обратной стороне пластины расположен плоский заземленный электрод 1. В результате по поверхности диэлектрика развивается поверхностный разряд, служащий для предварительной

ионизации газового промежутка 3 и выполняющий роль плазменного катода для объемного разряда, развивающегося между электродами 2 и 5. Длина газового промежутка составляла 8 мм, поперечный размер разрядной области 6 см. Для повышения устойчивости объемного разряда поверхность заземленного электрода покрывалась диэлектрической пластиной 4 из акрилового стекла толщиной 1 мм.

Основу системы импульсного электропитания установки составляет генератор высоковольтных наносекундных импульсов амплитудой до 60 кВ с частотой повторения до 1 кГц [1] (рис. 1, б). Работа генератора в значительной степени определяется нелинейной плазменной нагрузкой, в результате чего параметры формируемого импульса напряжения (форма, длительность, амплитуда) зависят от условий зажигания разряда. В проведенных экспериментах длительность импульсов напряжения на полувысоте  $\sim 100$  нс при длительности переднего фронта около 50 нс. Максимальное значение тока составляет 50 А.

Одной из важнейших характеристик плазмы, определяющей скорость протекания плазмохимических процессов и пригодность ее для различных практических применений, является температура. В случае неравновесной плазмы значения поступательной, вращательной, колебательной и электронной температуре значительно различаются между собой, благодаря чему в ней достигается высокая химическая активность при сравнительно низких газовых температурах. В связи с этим были проведены измерения вращательной и колебательной температур спектральными методами [2]. Регистрация оптических спектров разряда проводилась волоконным спектрометром (ASP-150TF ООО „Авеста-Проект“) в диапазоне 200–1100 нм с разрешением 0.09 нм. Излучение разряда сосредоточено в области 250–410 нм и представляет собой линии молекулярного азота.

Для определения вращательной температуры  $T_{rot}$  использовалась ее связь с формой контура неразрешенной вращательной структуры 0–0 полосы ( $2^+$ )-системы азота. В зависимости от условий горения разряда температура меняется в широких пределах: самая высокая (до 700 К) достигается при отсутствии барьера. При использовании диэлектрического барьера толщиной 1 мм температура не превышает 400 К. С увеличением частоты следования импульсов наблюдается рост температуры.

Исследования колебательной температуры  $T_{vib}$  плазмы проводились методом измерения относительной интенсивности спектральных ли-

ний серий колебательных переходов ( $2^+$ )-системы азота. Рассчитанные значения колебательных температур плазмы лежат в пределах 2500–3000 К.

Такие различия между колебательными и вращательными температурами характерны для неравновесной низкотемпературной плазмы.

Наиболее точная информация об электронной концентрации (плотности) плазмы может быть получена из измерения фазовых возмущений в зондирующем излучении методами лазерной интерферометрии [3]. При прохождении излучения через плазменный объект размером  $l$ , помещенный во внешнюю среду с показателем преломления  $n_0$ , оптическая длина пути изменится на величину  $\Delta(nl) = (n - n_0)l$ . При низкой степени ионизации газа, как в случае объемного разряда в воздухе атмосферного давления ( $n_0 = 1$ ), показатель преломления плазмы  $n$  определяется аддитивным вкладом электронов, ионов и нейтральных частиц (атомов, молекул). Можно считать, что в плазме с временем существования  $\sim 100$  пс и менее основной вклад в изменение показателя преломления вносят только свободные электроны. Динамика показателя преломления за счет вклада нейтральных и возбужденных атомов и молекул определяется тепловыми процессами и вносит возмущение в интерференционный сигнал с существенным запаздыванием по времени для используемой в эксперименте геометрии разрядной камеры  $\sim 10$  мкс.

Электронную плотность  $N_e$  можно найти из соотношения [3]:

$$n - 1 \approx \frac{e^2 \lambda^2}{2\pi m c^2} N_e = -4.49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e, \quad (1)$$

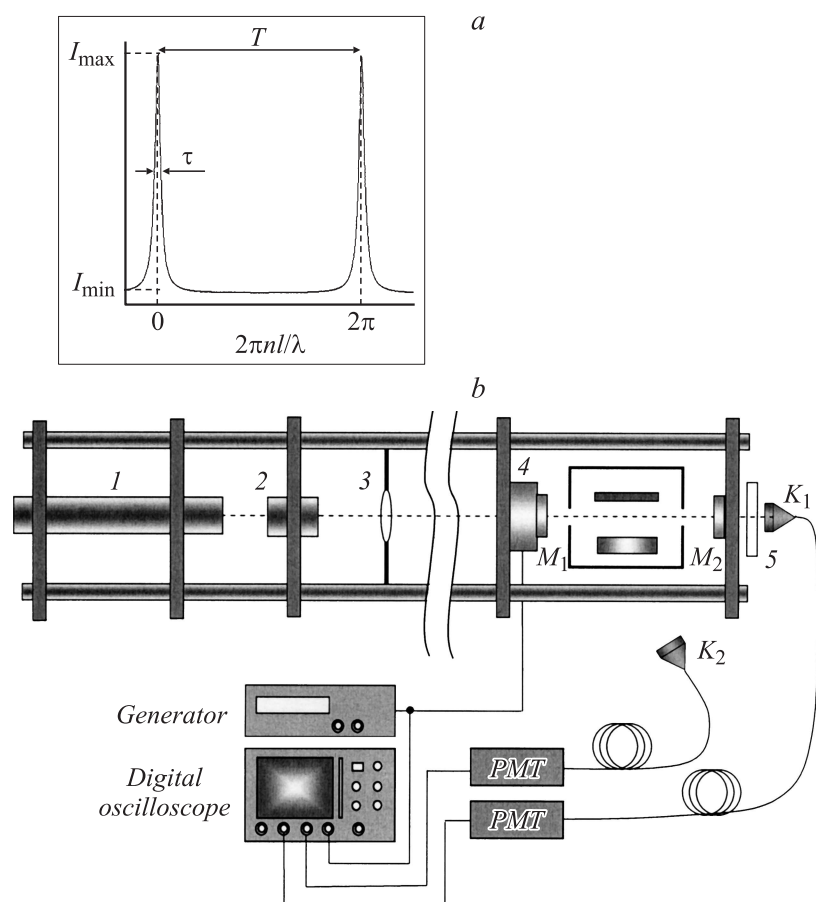
где  $\lambda$  — длина волны зондирующего лазерного излучения,  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона,  $c$  — скорость света. Средняя электронная плотность в импульсных разрядах в воздухе атмосферного давления даже в самой „горячей“ области, а именно в головке стримера, не превышает  $10^{14}$  см $^{-3}$  (см., например, [4]). Строго говоря, методами интерферометрии измеряется интегральная по направлению зондирования электронная плотность  $\int_0^l N_e dl$ , так называемая линейная электронная плотность плазмы [см $^{-2}$ ]. В работе для измерения плазмы такой низкой плотности был разработан многолучевой интерферометр типа Фабри–Перо. Для определения электронной плотности плазмы многолучевым

интерферометром можно использовать формулу

$$N_{el} = \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{e^2}{2\pi m c^2} \right)^{-1} \frac{\tau}{T} \frac{\Delta I}{I_{max}} = \frac{1.12 \cdot 10^{15}}{\lambda} \frac{\tau}{T} \frac{\Delta I}{I_{max}} [\text{cm}^{-2}], \quad (2)$$

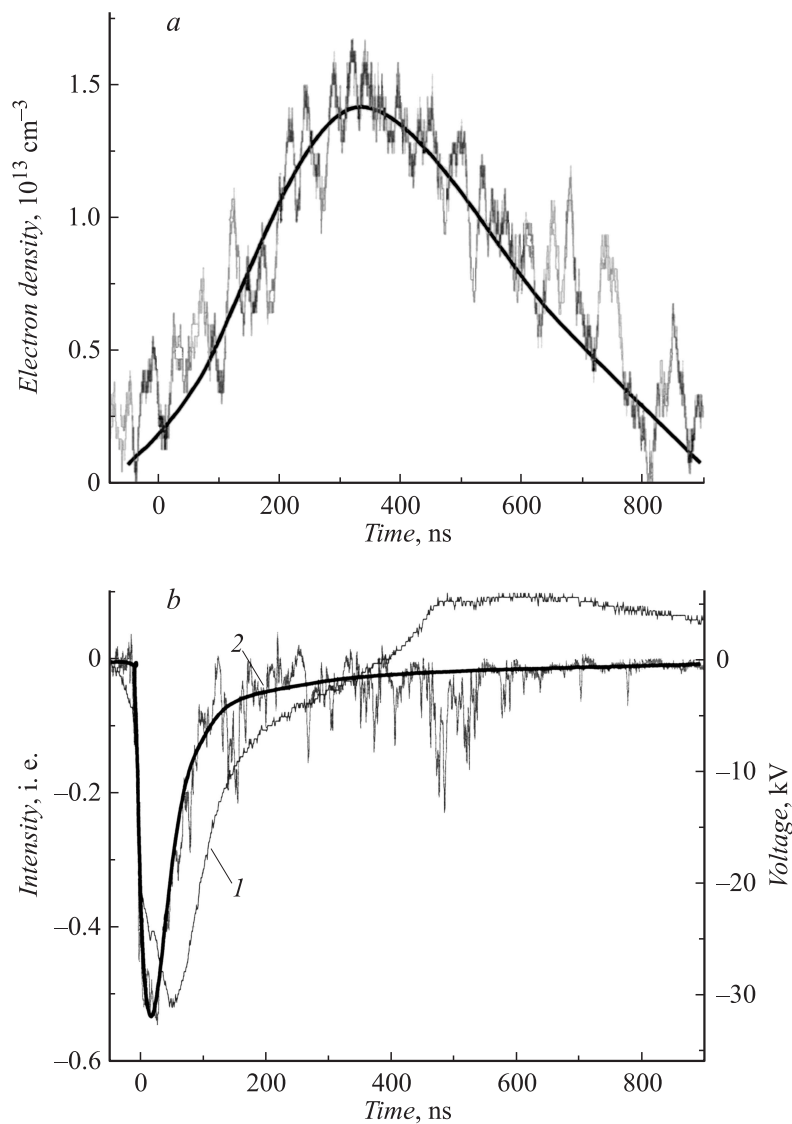
где  $\tau$  — временной интервал, соответствующий ширине функции пропускания измеренной по уровню 0.5 ( $I_{max} - I_{min}$ ),  $T$  — интервал между соседними максимумами пропускания аппаратной функции интерферометра Фабри–Перо (рис. 2, *a*),  $\Delta I$  — изменение интенсивности прошедшего через интерферометр излучения.

Принципиальная схема лабораторного стенда представлена на рис. 2. Интерферометр образован диэлектрическими зеркалами  $M_1$  (радиус кривизны 2 м) и плоским  $M_2$  с коэффициентами отражения  $> 0.98$ . Расстояние между зеркалами 230 мм. В качестве излучателя использовался одномодовый частотно-стабилизированный He–Ne-лазер мощностью 1.3 мВт ( $\lambda = 632.99012$  нм). Для устранения паразитной оптической обратной связи на выходе лазера установлен фарадеевский оптический изолятор. Согласование гауссовых пучков лазера и пассивного резонатора интерферометра достигается с помощью линзы с фокусным расстоянием 400 мм. Настройка на рабочую точку ( $I \approx 0.5I_{max}$ ) осуществляется при помощи смещения зеркала  $M_1$  пьезокерамическим актюатором. Лазер, согласующая оптика и зеркала интерферометра размещены в раме из четырех инваровых стержней длиной 120 см. Собранный в каркасе оптическая схема изолирована от внешних воздействий (воздушных потоков, акустических возмущений, вибраций). Излучение, прошедшее интерферометр, вводится с помощью коллиматора  $K_1$  в оптоволокно и транспортируется в блок фоторегистрации, для устранения электромагнитной помехи вынесенный из экспериментального зала. Дополнительно коллиматором  $K_2$  регистрируется собственное свечение плазмы из разрядного промежутка. Детекторами служат фотоэлектронные умножители (Hamamatsu R9880U) (время нарастания  $\tau_{0.1-0.95} = 0.57$  нс). Электрические сигналы с ФЭУ регистрируются на цифровой осциллограф LeCroy WR 44Xi с полосой пропускания 400 МГц и частотой дискретизации 5 ГГц. Во время протекания разряда регистрировался интерференционный сигнал, представленный на рис. 3, *a*. На рис. 3, *b* представлены осциллограммы импульса напряжения и интегрального во всем оптическом диапазоне свечения плазмы. Время существования плазмы составляет около 500 нс



**Рис. 2.** *a* — аппаратная функция многолучевого интерферометра, *b* — принципиальная схема экспериментального стенда с интерферометром Фабри–Перо: 1 — лазер, 2 — оптический изолятор, 3 — согласующая линза, 4 — пьезокерамический актюатор, 5 — интерференционный светофильтр,  $M_1$ ,  $M_2$  — зеркала интерферометра,  $K_1$ ,  $K_2$  — волоконные коллиматоры.

и примерно совпадает со временем существования электрического поля в разрядной области. При этом максимальная электронная плотность, вычисленная по (2), с учетом равномерного распределения по объему



**Рис. 3.** *a* — зависимость электронной плотности плазмы в разрядной области от времени, рассчитанная по измерениям интерферометром Фабри–Перо; *b* — осциллограммы импульса напряжения *1* и свечения разряда *2*.

межэлектродного промежутка составляет  $(1.5 \pm 0.2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Это значение сопоставимо с критической электронной плотностью для данного типа разряда ( $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), при превышении которой форма разряда меняется и он переходит к контрагированной форме. Необходимо отметить, что максимум электронной плотности достигается не в момент протекания основного разрядного тока через межэлектродный промежуток, а в последующий период. Это может быть связано с тем, что во время протекания тока свободные электроны образуются не во всем объеме, а в узких каналах стримерного разряда, а заполнение плазмой всего объема происходит после завершения основного импульса тока.

Таким образом, в результате проведения экспериментальных исследований показано, что при генерации объемных разрядов в воздушной среде атмосферного давления возможно получение неравновесной плазмы со сравнительно невысокими температурами и электронной плотностью, сопоставимой с критическим значением для данного типа разряда, что способствует интенсивному протеканию плазмохимических процессов.

## Список литературы

- [1] *Крастелев Е.Г., Масленников С.П., Школьников Э.Я.* // ПТЭ. 2009. № 5. С. 98–101.
- [2] *Бенуэл К.* Методы молекулярной спектроскопии. М.: Мир, 1985.
- [3] *Кузнецов А.П., Савелов А.С.* Двухуровневая лазерная интерферометрия в диагностике плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Сер. Б. Т. V-1. М.: ЯНУС-К, 2006. С. 586–613.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. 3-е изд. М.: Интеллект, 2009.