

**ДИНАМИКА УСТАНОВЛЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО СВЧ-РАЗРЯДА
НА КОНЦЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДА В АЗОТЕ
ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ**

© 2010 г. Ю. А. Лебедев, Т. Б. Мавлюдов, В. А. Шахатов,
И. Л. Эпштейн, М. А. Карпов*

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

** Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Россия*

Поступила в редакцию 09.04.2009 г.

Окончательный вариант получен 27.05.2009 г.

Экспериментально исследован процесс зажигания СВЧ-разряда на конце цилиндрического электрода в азоте при давлении 1 Тор и падающей мощности 60–140 Вт. Использовались видеокамеры К-008 и К-011, осциллограммы излучения разряда. Показано, что полное время установления разряда в радиальном направлении порядка 10^{-4} с, а в аксиальном направлении порядка 10^{-2} с. Для анализа полученных результатов использовалось нестационарное одномерное моделирование разряда в азоте в квазистатическом приближении. Кинетическая схема включала 50 процессов с участием электронов, ионов, возбужденных частиц и атомов. Изменения во времени концентрации состояний $N_2(C^3\Pi_u)$ и $N_2(B^3\Pi_g)$, ответственных за регистрируемое излучение разряда, сопоставлено с экспериментальными данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание исследователей привлекают неоднородные электрические разряды, которые существуют в широком диапазоне давлений и могут инициироваться электрическими полями различной частоты. Это связано с тем, что, с одной стороны, ряд практических задач требует создания квазиоднородных плазменных систем с применением специальных мер, разработка которых невозможна без знания физики неоднородных разрядов. С другой стороны, определение перспектив использования самих неоднородных разрядов также невозможно без знания их свойств. Одним из представителей неоднородных разрядов является электродный СВЧ- (микроволновый) разряд (ЭМР), существующий в окрестности электрода-антенны, помещенной в металлическую разрядную камеру больших размеров, при пониженных давлениях [1–3].

Важным методом получения информации о физических процессах в газовых разрядах является исследование релаксационных явлений в них [4]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования изменения во времени излучения ЭМР в процессе установления стационарного состояния разряда в азоте, и проведен анализ полученных результатов на основе кинетической модели процессов в плазме.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТА

В работе использована экспериментальная установка для получения и исследования ЭМР, детально описанная в [5]. Она была существенно модернизирована применительно к задачам настоящего исследования.

Разрядная камера представляет собой металлический цилиндр из нержавеющей стали диаметром 15 см. Электрод-антенна (медная цилиндрическая трубка с внешним диаметром 5 мм и длиной 80 мм) вводится через вакуумный переход в верхней части разрядной камеры. Плазма ЭМР зажигается в окрестности торца электрода. Камера снабжена окнами для наблюдения разряда, как через боковую стенку, так и с ее нижнего торца. Использовались окна из кварцевого стекла КУ-1 и стекла ВК7.

Электромагнитная волна (мощность до 180 Вт, частота 2.45 ГГц) в режиме непрерывной генерации вводилась в разрядную камеру с помощью коаксиально-волноводного перехода, элементом которой является электрод-антенна. СВЧ-тракт включал в себя элементы системы измерения мощности и коэффициента стоячей волны напряженности: циркулятор, измерительную линию и измеритель падающей мощности P_{in} . Согласование в тракте изменялось с помощью короткозамыкающего поршня и трехшлейфового трансформатора. Для анализа спектрального состава СВЧ-излучения использовались анализатор

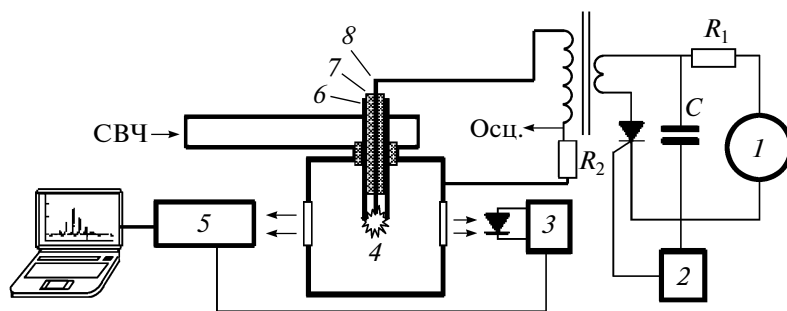


Рис. 1. Схема поджига разряда. 1 – источник постоянного напряжения, 2 – формирователь импульса запуска, 3 – формирователь импульса синхронизации, 4 – искра, 5 – видеокамеры К-008 и К-011, 6 – электрод/антенна, 7 – изолятор, 8 – поджигающий электрод, C – накопительный конденсатор (0.2 мкФ), R_1 – зарядный резистор (1 Мом), R_2 – измерительный резистор (3 Ом).

спектра С4-27, стробоскопический осциллограф С7-11. Имеется также система регистрации изменений во времени параметров СВЧ-волны и интегрального излучения плазмы с использованием осциллографа Tektronix TDS2012B. В экспериментах электрод-антенна был по постоянному току закорочен на камеру и имел тот же, что и камера, потенциал. Установка оборудована спектрометрами AvaSpec-2048 (разрешение 1 нм) и AvaSpec-2048-4-RM (разрешение 0.1 нм) в четырех спектральных диапазонах.

Эксперименты проводились в проточной системе. Расход азота составлял 1–200 см³/мин при нормальных условиях. В отличие от предыдущих исследований, напуск газа осуществлялся не через канал в электроде, а через канал в крышке камеры. Ранее было показано, что структура и свойства ЭМР не зависят от способа подачи газа при таких расходах. Давление в разрядной камере поддерживалось в пределах 1–15 Тор.

Для исследования процесса перехода разряда от зажигания к стационару установка была дооборудована наносекундными электронно-оптическими видеокамерами К-008 (однокладовая) и К-011 (девятикадровая). Спектральный диапазон чувствительности камер составлял 400–800 нм. Камера К-011 позволяла независимо варьировать времена экспозиции и паузы между кадрами в диапазоне 0.1–100 мкс.

В зависимости от напряженности СВЧ-поля организация таких экспериментов в СВЧ-плазме может осуществляться по-разному. Если напряженности СВЧ-поля достаточно для пробоя газа, необходим импульсный источник СВЧ-энергии и синхронизация его импульса с работой измерительных устройств. В нашем случае это не реализовывалось, поскольку энергии СВЧ-источника хватало для поддержания стационарного разряда, но не для пробоя.

Была спроектирована и изготовлена система искрового поджига разряда (рис. 1). Искровой

разрядник помещался в канал внутреннего электрода-антенны и представлял собой высоковольтный молибденовый электрод в кварцевой изоляции. Неизолированная его часть находилась внутри канала и не выступала за пределы электрода-антенны, чтобы не возмущать структуру СВЧ-поля. Искровой разряд зажигался между неизолированной частью высоковольтного электрода и внутренней поверхностью трубчатого металлического электрода-антенны вблизи ее открытого конца. Импульс высокого напряжения обеспечивался разрядом накопительной емкости на первичную обмотку повышающего трансформатора. Напряжение на накопительной емкости выбиралось минимальным, при котором разряд еще поджигался. Запуск системы производился подачей управляющего импульса на тиристор в цепи первичной обмотки. Управляющий импульс формировался специальной схемой, которая давала и импульс синхронизации для работы измерительных систем. Однако, для того чтобы избежать ошибок во времени запуска видеокамер, связанных со статистическим временем запаздывания зажигания, в экспериментах синхроимпульс формировался фотодиодным датчиком, реагирующим на искровой разряд. Индуктивность и паразитная емкость в электрической цепи поджига формировали затухающий колебательный процесс в цепи, который заканчивался на временах, меньших 500 нс.

Эксперименты проводились следующим образом. Сначала в систему вводилась СВЧ-энергия, и при этом разряд не возбуждался. Затем подавался зажигающий импульс, при появлении искры запускалась видеокамера, и производилось фотографирование развития инициированного искрой разряда с выбранными временами экспозиции кадров и паузы между ними.

Для качественного объяснения некоторых из полученных экспериментальных результатов применялось одномерное моделирование ЭМР в азоте. В основу положена упрощенная квазиста-

тическая модель СВЧ-разряда, поддерживаемого между двумя сферическими электродами, использованная для моделирования разряда в азоте и кислороде при пониженных давлениях и детально описанная в [6–8], где было показано, что модель достаточно хорошо передает общие свойства разряда. Модель модифицирована для описания нестационарных процессов и, в частности, процесса зажигания разряда.

Модель включает в себя уравнение для электрического поля в квазистатическом приближении (предполагается, что электрическое СВЧ-поле везде параллельно градиенту концентрации); нестационарные уравнения баланса заряженных (e , N^+ , N_2^+ , N_3^+ , N_4^+) и нейтральных ($N_2(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(C^3\Pi_u)$, $N_2(a^1\Sigma_u^-)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$) частиц плазмы с учетом диффузии, а также процессов рождения и гибели соответствующих частиц за счет объемной рекомбинации и химических реакций; уравнение Пуассона. Схема реакций, учитываемых при моделировании, и коэффициенты скоростей приведены в [7]. Соответствующие коэффициенты для электронов считались функциями локального значения СВЧ-поля и рассчитывались с помощью функции распределения электронов по энергиям, полученной при решении стационарного однородного уравнения Больцмана [9]. Для этого использовался набор сечений для азота, любезно предоставленный И.В. Кочетовым. Коэффициенты диффузии всех нейтральных возбужденных компонент плазмы считались равными коэффициентам диффузии этих частиц в основном состоянии. Для учета влияния колебательно-возбужденных молекул азота на процессы в плазме использовался упрощенный подход. Применялось аналитическое выражение для функции распределения молекул по колебательным состояниям, полученное в диффузионном приближении [10].

Начальные и граничные условия

В начальный момент концентрации всех частиц, кроме электронов и ионов N_2^+ , полагались равными нулю. Концентрация электронов задавалась в виде узкой параболической функции шириной несколько миллиметров и с максимумом n_{\max} , в 2–3 раза превышающим значение критической концентрации электронов ($n_c = 7.44 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Концентрация N_2^+ в начальный момент полагалась равной концентрации электронов. Ширина начального распределения и его максимум варьировались. На временах порядка 10^{-7} с и больших начальное распределение электронов уже не сказывалось на результатах расчетов. Для проверки чувствительности результатов расчетов к началь-

ным условиям в ряде случаев расчеты проводились при отличных от нуля начальных концентрациях молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ (см. разд. 3).

Концентрации заряженных частиц на электродах полагались равными нулю. Потенциалы обоих электродов считались одинаковыми и равными нулю. Концентрация атомов и молекул азота в основном состоянии на электродах определялась из соотношений

$$D_N \frac{dn_N}{dr} = \pm \frac{1}{4} \gamma v_T n_N, \quad D_{N_2} \frac{dn_{N_2}}{dr} = \mp \frac{1}{8} \gamma v_T n_N,$$

где γ – вероятность рекомбинации атомов азота на стенках, $\gamma = 10^{-4} - 10^{-3}$, v_T – тепловая скорость. Для всех остальных нейтральных частиц поверхность электродов считалась идеально каталитической, и их концентрации на электродах полагались равными нулю.

Численный алгоритм

При численном решении уравнений неразрывности для всех частиц использовалась неявная по времени схема. Для нахождения решения уравнений неразрывности электронов и положительных ионов и уравнения Пуассона применялся алгоритм, изложенный в работах [11, 12]. Его основой является аппроксимация потоков заряженных частиц с помощью экспоненциальной схемы Шарфеттера и Гюммеля [13]. Полученная система нелинейных уравнений решалась методом Ньютона.

Использовалась равномерная сетка с числом узлов от 100 до 600.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Целью работы было исследование процесса перехода от искрового поджига до стационарного режима разряда. Чтобы избежать возможных неопределенностей во времена получения фотографий, промежутки между кадрами выбирались таким образом, чтобы в одной серии фотографий получить снимки, по возможности характеризующие весь процесс перехода. Длительность кадров была одинаковой (1 мкс), так что яркость изображения соответствует реальной интенсивности излучения разряда. Для фиксации момента зажигания первый кадр соответствует искре. Электрод расположен вертикально, и разряд иницируется на его конце. Результаты измерений при давлении 1 Тор и разных падающих мощностях показаны на рис. 2. С учетом спектральной чувствительности фотокамеры ЭОК, можно ожидать, что основной вклад в получение изображения дает первая положительная система азота $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$, излучающая в диапазоне длин волн 500–800 нм. Это подтверждается тем, что

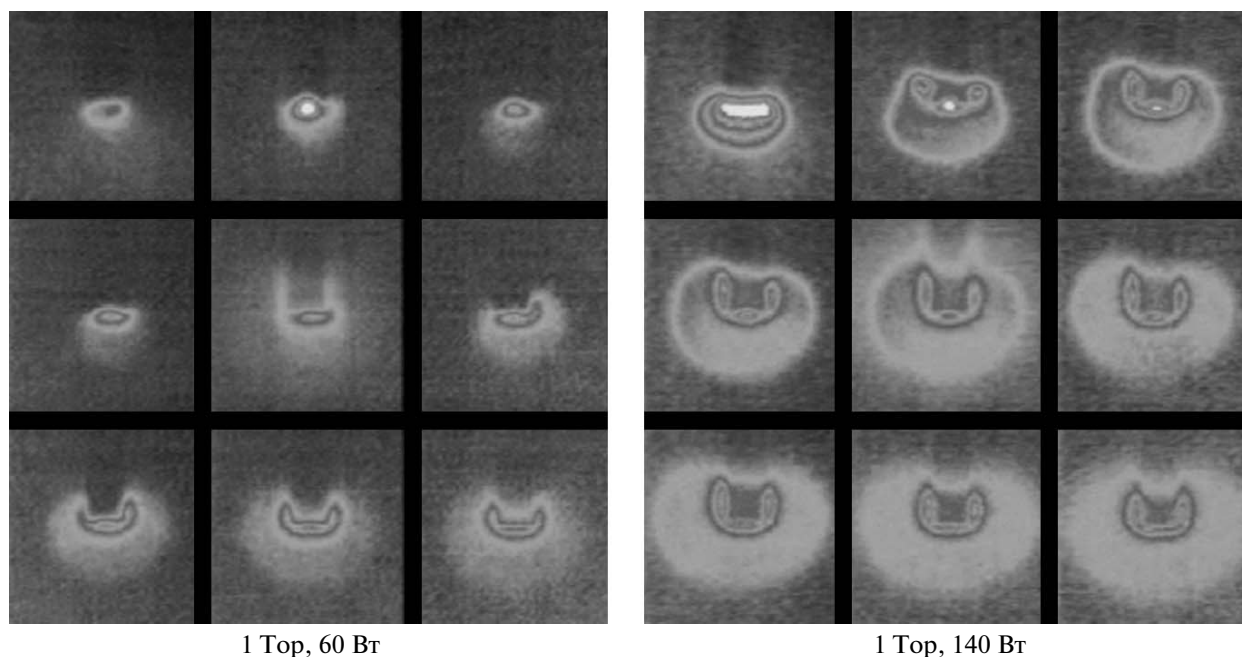


Рис. 2. Последовательности фотографий развития разряда в азоте при давлении 1 Тор при падающих СВЧ-мощностях 60 и 140 Вт. Время экспозиции кадров 1 мкс, паузы между кадрами равны 2, 5, 5, 5, 25, 50, 100, 100 мкс, соответственно. Фотографии получены камерой К-011.

использование УФ-фильтра практически не изменяло яркость кадра. Структура стационарного состояния разряда показана на рис. 3. Осциллограммы сигнала с СВЧ-детектора в волноводе и интегральной интенсивности излучения разряда (разряд сфокусирован на приемную поверхность фотодиода) при зажигании разряда показаны на рис. 4.

Видно, что на любой стадии разряда, как и в стационаре, ЭМР состоит из яркой приэлектродной пленки и сферической области. Размеры сферической области зависят от падающей мощности, и стационарный размер диаметра по нормали к оси достигается за времена порядка 10^{-4} с, что видно из сравнения фотографий, полученных на этих временах (рис. 2), и фотографии в стационарном состоянии (рис. 3). Это время остается неизменным при изменении падающей мощности от 60 до 140 Вт. Именно это время будет сопоставляться далее с результатами расчетов.

Осциллограмма сигнала СВЧ-детектора в тракте (рис. 4) показывает, что структура СВЧ-поля устанавливается за доли миллисекунды. В то же время осциллограмма сигнала фотодетектора показывает наличие двух участков (рис. 4). Резкое возрастание интенсивности излучения тоже происходит за доли миллисекунды, в то время как время выхода на стационар порядка десяти миллисекунд. Различие результатов, полученных из рис. 2 и 4, может быть объяснено следующим. При измерениях сфокусированного на приемник

излучения ЭМР основной вклад в излучение и регистрируемый сигнал дает приэлектродная пленка, в которой сосредоточено до 90% энерговклада [1–3]. Следовательно, кривая на рис. 4 характеризует изменение во времени суммарной интенсивности приэлектродной области. Используемая видеокамера К-011 не дает возможности получать изображение разряда на временах, превышающих единицы миллисекунд. Да и этот предел достигается только при максимальных значениях длительности кадра и выдержки (100 мкс), причем теряется информация о начальных стадиях развития разряда. Ситуация может быть прояснена сравнением рис. 2 и 3. Видно, что длина приэлектродной области разряда, покрывающего антенну в стационарном режиме, больше (рис. 3), чем на рис. 2. Это означает, что на максимальных временах, соответствующих рис. 2, формирование разряда еще не закончилось. Из рисунков также видно, что в такой незавершенной стадии разряд имеет эллипсоидальную форму, в то время как в стационарном режиме — сферическую с тем же диаметром.

Развитие приэлектродной пленки начинается от центра электрода, где расположен искровой разрядник. Она распространяется по торцу электрода и начинает подниматься по нему в сторону генератора. Процесс этот достаточно медленный и связан, по-видимому, с разогревом газа и движением его вдоль электрода. Заметим, что газодинамические эффекты наблюдались ранее в ЭМР при исследовании пространственных распреде-

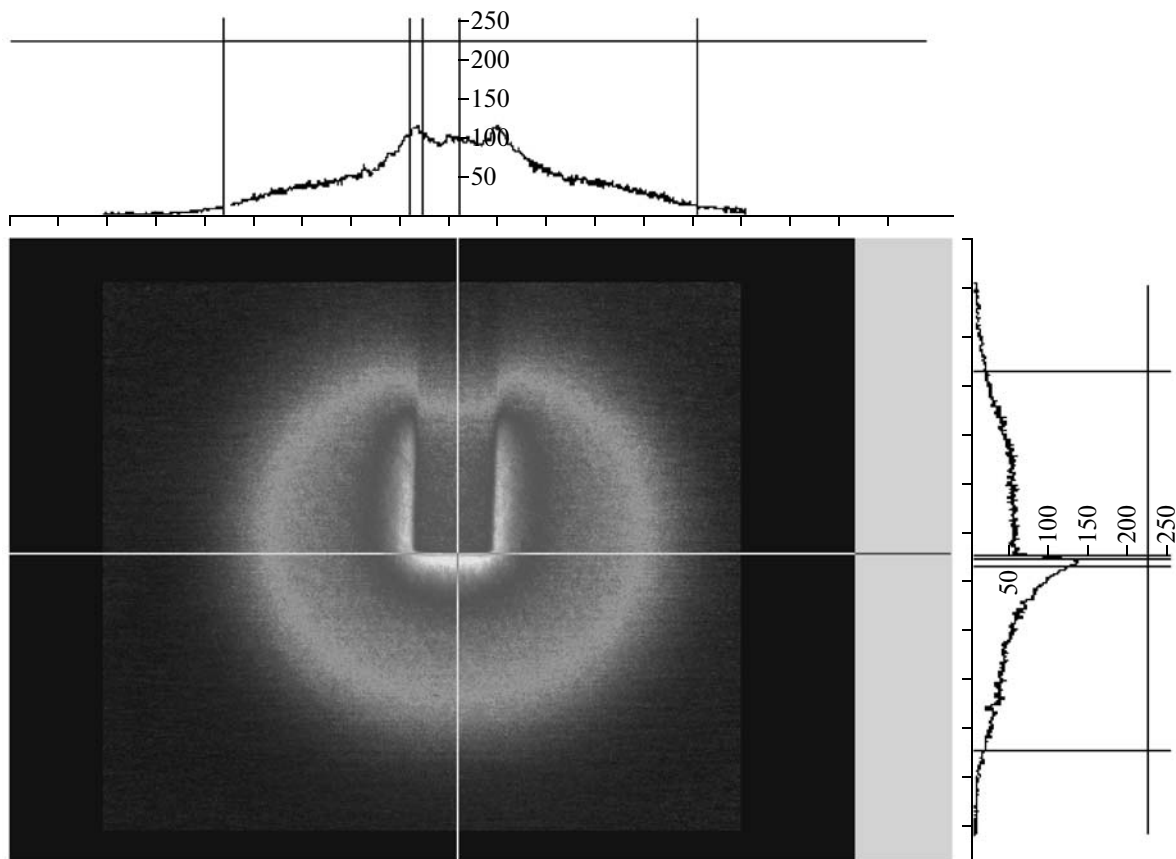


Рис. 3. Структура стационарной фазы разряда в азоте при давлении 1 Тор и падающей мощности 120 Вт (видеокамера К-008). Кривые показывают пространственное распределение интегральной интенсивности излучения разряда в радиальном (верхний рисунок) и аксиальном (нижний рисунок) сечениях (сечения показаны прямыми линиями на фотографии). Пространственный масштаб ясен из того, что диаметр видимого на фотографии электрода равен 5 мм.

лений температуры газа в водороде и азоте. Было показано, что температура газа неизменна вдоль радиуса разряда, что обусловлено вихревым движением [14].

Из проведенного анализа следует, что система является двумерной и, соответственно, имеет два характерных времени формирования: в направлении оси разряда и в перпендикулярном направлении. Эти времена определяются разными физическими процессами. Это означает, что для корректного анализа процесса возникновения разряда необходимо использовать двумерные модели, и, более того, они должны учитывать нагрев газа и газодинамику разряда. Используемая в настоящей работе одномерная модель может дать лишь качественное описание процесса развития разряда в радиальном направлении.

Следует отметить одну особенность использованного способа инициирования разряда, которую нужно учитывать при анализе полученных результатов. Фотографирование разряда при нулевой падающей СВЧ-мощности показало, что, несмотря на то, что разрядный процесс в цепи

поджига заканчивается за времена, меньшие 500 нс (меньше времени экспозиции первого кадра), послесвечение зажигания наблюдается в течение 10 мкс. Это означает, что первый этап развития СВЧ-разряда реализуется в активной среде,

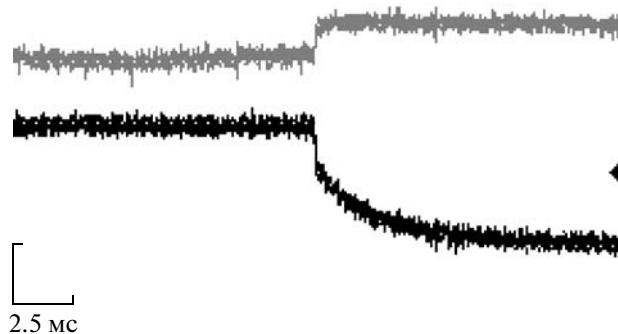


Рис. 4. Осциллограммы напряжения с СВЧ-детектора в волноводе (верхняя кривая) и интегрального излучения (нижняя кривая) при зажигании ЭМР в азоте при давлении 1 Тор и падающей мощности 90 Вт.

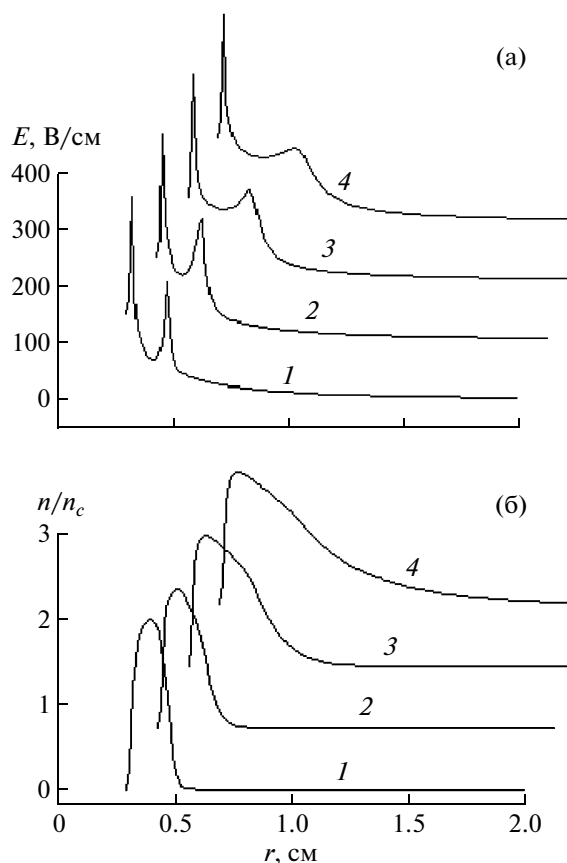


Рис. 5. Эволюция напряженности СВЧ-поля (а) и концентрации электронов (б). Кривые 1 относятся к $t = 10^{-7}$ с, 2 – 10^{-6} с, 3 – 10^{-5} с, 4 – 10^{-4} с.

созданной искрой. Следовательно, продолжительность начальной стадии разряда может быть меньше, чем та, которая была бы без остаточных явлений искрового разряда. Эти времена значительно меньше полного времени перехода разряда в стационарный режим, и последнее оказывается невозмущенным. Косвенным подтверждением тому является экспериментально показанная независимость этого времени от напряжения на искровом разряднике, от которого должны зависеть концентрации всех частиц, нарабатанных в искре.

Основным компонентом такой активной среды может быть состояние азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, влияние которого на процессы возбуждения и ионизации в плазме оказывается важным [7]. Для проверки влияния этого фактора на развитие разряда были проведены две серии расчетов на основе одномерной модели. В первой серии задавалась только начальная концентрация электронов, а во второй – концентрация электронов и концентрация молекул в состоянии $N_2(A^3\Sigma_u^+)$. Расчеты показали, что результаты, полученные на временах 10^{-4} и

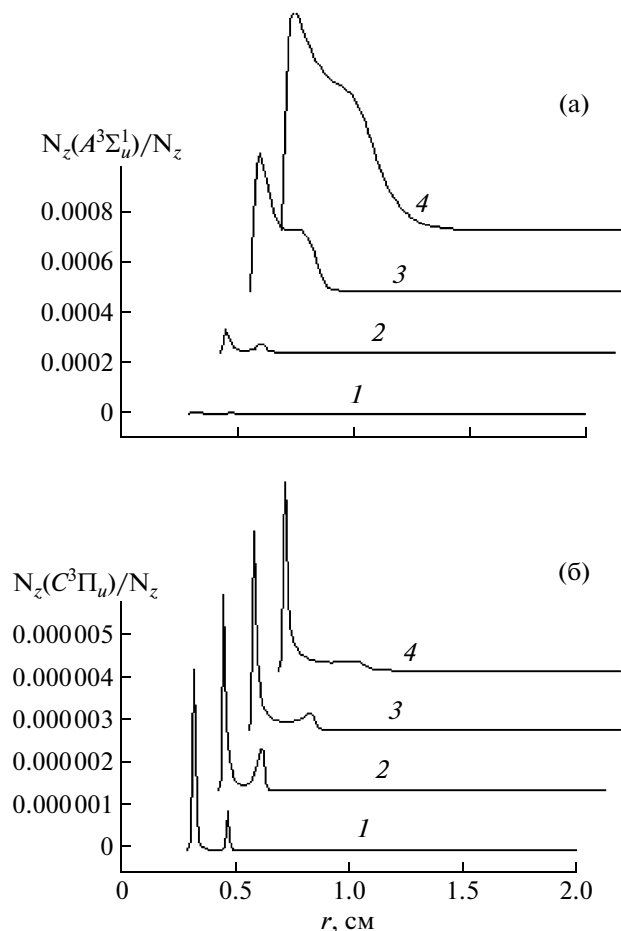


Рис. 6. Эволюция концентраций: а) – молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$; б) – $N_2(C^3\Pi_u)$. Обозначения такие же, как на рис. 5.

10^{-3} с, практически не различаются, и поэтому далее результаты ограничиваются временем 10^{-4} с, а начальная концентрация молекул в состоянии $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ считается равной нулю. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 5–7. Поскольку плазма существует только в окрестности центрального электрода, именно эта область изображена на рисунках, и радиальная координата не продлена до внешнего электрода.

Кратко результаты расчетов могут быть сформулированы следующим образом. Величины и зависимости от времени напряженности СВЧ-поля (рис. 5а), концентрации электронов (рис. 5б) и состояния $N_2(C^3\Pi_u)$ (рис. 6б), ответственного за излучение второй положительной системы азота при переходе $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$, не изменяются при задании ненулевого значения $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ в начальный момент времени. Это означает, что состояние $N_2(C^3\Pi_u)$ возбуждает-

ся, в основном, однократным электронным ударом ($N_2(X^1\Sigma_g^+) + e \Rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + e$), а ассоциативное возбуждение ($N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \Rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + N_2$) дает малый вклад (см. также [12, 19]). Поэтому в приэлектродной области концентрация молекул в состоянии $N_2(C^3\Pi_u)$ устанавливается практически мгновенно, а расширение области существования этого состояния в пространстве (в сферической области разряда) связано с диффузионным расширением концентрации частиц, участвующих в ионизации. Напомним, что именно излучение второй положительной системы азота в результате перехода $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ преобладает над другими полосами в излучении приэлектродной области [14].

Присутствие молекул в состоянии $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ в нулевой момент времени оказывает большое влияние на начальную стадию кинетики изменения концентрации молекул $N_2(B^3\Pi_g)$. Во все моменты времени образование $N_2(B^3\Pi_g)$ происходит в результате процесса $N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \Rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2$. При нулевых начальных концентрациях $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, пока его концентрация в результате наработки в процессе $N_2(X^1\Sigma_g^+) + e \Rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e$ мала, основным каналом образования $N_2(B^3\Pi_g)$ является возбуждение электронами из основного состояния $N_2(X^1\Sigma_g^+) + e \Rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + e$. Это подтверждается возрастанием концентрации этого состояния в областях плазменного резонанса. На последних стадиях развития разряда возбуждение определяется процессом $N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \Rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2$.

Важно отметить, что рассчитанное время выхода разряда в стационарный режим порядка 10^{-4} с и не зависит от присутствия молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ в нулевой момент времени. Не зависят от него и концентрации всех частиц плазмы, включая и концентрацию $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ в момент времени 10^{-4} с. В экспериментах это время соответствует времени установления стационарного размера шаровой области в направлении, перпендикулярном оси разряда. В сферической области преобладает излучение первой положительной системы азота, за которое ответственно состояние $N_2(B^3\Pi_g)$.

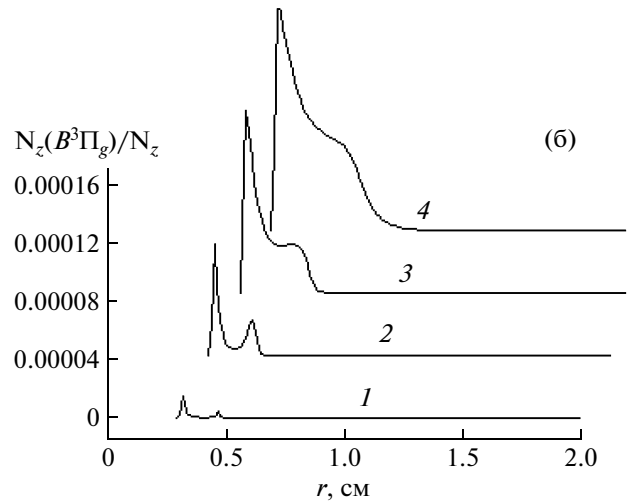


Рис. 7. Эволюция концентрации молекул $N_2(B^3\Pi_g)$. Обозначения такие же, как на рис. 5.

Таким образом, полное время выхода разряда в стационарный режим в радиальном направлении не возмущается искровым поджигающим разрядом, хотя начальные стадии и искажаются. Расчеты, как и эксперименты, показали, что изменение мощности не приводит к изменению этого времени.

Еще раз отметим, что для полного описания условий возникновения разряда необходимо решение нестационарной двумерной задачи с учетом нагрева газа и газодинамики.

Расчеты также показали, что в момент поджига у электрода образуется два слоя пространственного заряда в областях плазменного резонанса (рис. 5а), где концентрация электронов равна критической концентрации. Один слой расположен вблизи центрального электрода и сливается с обычным слоем пространственного заряда у поверхности тел, помещенных в плазму. Вторым слоем расположен на внешней стороне кривой уменьшения концентрации. Второй слой по мере расширения радиального профиля концентрации электронов во времени уширяется, смещается в сторону внешнего электрода, и поле в нем уменьшается по величине от сотни до единиц вольт. В стационарном режиме разряда нарушение квазинейтральности и поле пространственного заряда существуют у электродов и в области плазменного резонанса на внешней границе шаровой области между электродами. Заметим, что стационарное распределение поля пространственного заряда устанавливается за времена порядка миллисекунд, поскольку оно определяется заполнением зарядами всей камеры. Нарушение квазинейтральности плазмы в области плазменного резонанса детально рассмотрено в [15].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования процесса установления СВЧ-разряда в азоте при давлении 1 Тор показали, что при зажигании разряда на конце электрода стационарная структура разряда в радиальном направлении устанавливается за диффузионные времена порядка 10^{-4} с, а в аксиальном направлении – за времена порядка 10^{-2} с, определяемые нагревом газа и движением его вдоль электрода. Поджигающий искровой разряд и его параметры не влияют на время формирования разряда. Процессы, происходящие при развитии разряда, можно разделить на процессы, определяемые однократным электронным ударом, и процессы, связанные с вторичными явлениями. К первой группе относится возбуждение излучающего состояния $N_2(C^3\Pi_u)$, а ко второй – возбуждение излучающего состояния $N_2(B^3\Pi_g)$. Этим определяется различие времен формирования различных частей разряда. Состояние $N_2(C^3\Pi_u)$ ответственно за излучение области около антенны-электрода (вторая положительная система азота). Состояние $N_2(B^3\Pi_g)$ определяет наблюдаемое время установления сферической области разряда (первая положительная система азота). Возбуждение этого состояния идет с участием молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$. Полученные результаты подтверждают сделанный ранее вывод о том, что в сильно неоднородном разряде, каковым является разряд СВЧР, существуют области с сильно различающимися свойствами.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Ю.А. Электродный СВЧ-разряд и его применения. Химия низкотемпературной плазмы. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том VIII-1/ Под ред. Ю.А. Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова. М.: Янус-К, 2005. С. 435.
2. Lebedev Yu.A., Shakhatov V.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L. // J. Phys.: Conf. Ser. 2006. V. 44. P. 30.
3. Lebedev Yu.A., Mokeev M.V., Solomakhin P.V. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. 194001.
4. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980.
5. Лебедев Ю.А., Соломахин П.В., Шахатов В.А. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 614.
6. Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л. // ТВТ. 2007. Т. 45. С. 325.
7. Лебедев Ю.А., Эпштейн И.Л. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 68.
8. Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л. // ТВТ. 2008. Т. 46. С. 645.
9. Lebedev Yu. A., Epstein I.L. // J. Moscow Phys. Soc. 1995. V. 5. № 1. P. 103.
10. Capitelli M., Ferreira B., Gordiets B., Osipov A. Plasma Kinetics in Atmospheric Gases. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 297 p.
11. Boeuf J. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. P. 1342.
12. Fiala A., Pitchford L., Boeuf J. // Phys. Rev. E. 1994. V. 49 P. 5607.
13. Sharfetter D., Gummel H. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1969. V. ED-16. P. 64.
14. Лебедев Ю.А., Соломахин П.В., Шахатов В.А. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 180.
15. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L. // European J. Phys. D. 2009. V.53. P. 319.