

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА РАЗРЯДА

Ю.В. Кириллов, Д.В. Ситанов

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
153460, Иваново-центр, пр. Ф. Энгельса, 7. Kirillov@isuct.ru*

Широко применяемые в производстве плазмохимические процессы требуют точной информации о параметрах плазмы. Такие данные как скорости плазмохимических процессов, концентрации реагирующих частиц очень важны для достижения оптимальной производительности промышленных процессов. Кроме того, эти данные требуются при построении математических моделей плазмы. Существует много методов диагностики плазмы, способных дать такую информацию. Однако не все они могут быть применены в технологических процессах ввиду сложности аппаратного оформления, сложности интерпретации получаемых данных, или возмущения плазмы. Часто необходимо знать свойства плазмы в конкретной установке и в конкретный момент времени. Известно, что плазма является самоорганизующейся системой, и ее параметры могут сильно изменяться при незначительных изменениях внешних воздействий. Например, при изменении свойств поверхности стенки реактора из-за загрязнения, или изменении поверхности обрабатываемых материалов, концентрации реагирующих частиц могут изменяться так, что протекание целевых технологических процессов становится невозможным. В данном случае требуется быстрый “экспрессный” метод диагностики, который давал бы прямую информацию о параметрах плазмы. В качестве такого метода можно рекомендовать релаксационный или импульсный метод исследования. В данной работе была отработана аппаратная реализация релаксационной методики, и данный метод был применен для исследования плазмы хлора. С помощью него изучался процесс рекомбинации атомов хлора на стенке плазмохимического реактора, а также было прослежено изменение скорости рекомбинации при загрязнении стенки в результате распыления электродов.

Суть релаксационной методики достаточно проста, и заключается в том, что газовый разряд зажигают в импульсном режиме. Скорости плазмохимических процессов определяют в момент включения тока разряда в различные промежутки времени, соответствующие различным временам паузы между импульсами тока. В паузах между импульсами горения разряда убыль концентрации атомов хлора происходит преимущественно за счет стеночной рекомбинации: $\text{Cl} \rightarrow \frac{1}{2} \text{Cl}_2$, в результате чего, данные о ходе концентрации атомов хлора при гашении разряда позволят изучить закономерности гибели атомов хлора на стенке реактора. Для определения концентраций частиц использовалась эмиссионная спектроскопия, а импульсная методика – непосредственно для исследования гибели атомов хлора на стенке реактора в плазме чистого хлора.

Плазмохимический реактор представлял собой стеклянную трубку из молибденового стекла, в которую впаяны в отростках электроды. Катод имел форму конуса и был изготовлен из хрома. Анод выполнен в виде полого цилиндра из бериллия. Хлор получался термическим разложением соли CuCl_2 , давление хлора поддерживалось на уровне 100 Па.

Излучение разряда фокусировалось на входной щели монохроматора МУМ – 1, который был настроен на длину волны 452,62 нм. ($5p^2p^03/2 \rightarrow 4s^2p^3/2$, $E = 11,95$ эВ), что соответствует излучению атомов хлора. Излучение регистрировалось фотоэлектронным умножителем, сигнал с которого преобразовывался в цифровую форму и записывался в память компьютера. При записи сигнала быстродействие блока аналого-цифрового преобразователя составило 10000 выборок в секунду. Схема аналого-цифрового преобразователя приведена в [1].

Разряд в плазмохимическом реакторе зажигался и поддерживался от источника питания высокого напряжения. Электрическая схема питания разряда приведена на рис. 1. Источник высокого напряжения (1) включал в себя ЛАТР, повышающий трансформатор, диодный мост на высоковольтных диодах, балластное сопротивление, сглаживающий конденсатор. Он обеспечивал непрерывное горение разряда при максимальном токе до 150 мА. Импульсное питание разряда осуществлялось с помощью системы прерывания разряда. Генератор прямоугольных импульсов (2) типа Г5-75 позволял устанавливать период следования и длительность импульсов напряжением до 10 В. Он использовался как задающий генератор и определял длительности горения и паузы разряда. Током разряда управляла лампа ГМИ-10. Она была включена так, что в открытом состоянии шунтировала разрядный промежуток, замыкая напряжение высоковольтного источника питания на общий провод. Работой лампы управлял генератор импульсов. С его выхода, импульсы напряжением 8 В поступали на обмотку герконового реле (3). По переднему фронту импульса оно срабатывало, и своими контактами закорачивало напряжение на управляющей сетке лампы на землю. Лампа открывалась, и разряд прерывался. По спаду импульса реле "отпускало" и на управляющей сетке появлялось высокое отрицательное напряжение. Лампа запиралась, и разряд зажигался. Реле было необходимо, для согласования низковольтного выхода генератора с достаточно высоким напряжением на управляющей сетке. Для достижения максимального быстродействия, реле в дальнейшем было заменено транзистором. Генератор имел также выход синхроимпульсов, которые использовались как метки времени при записи излучения с ФЭУ.

Используемая методика предусматривала ряд допущений. Предполагалось, что концентрация электронов возрастает и падает почти мгновенно с включением и выключением тока разряда, а возбужденные излучающие состояния атомов хлора гибнут много быстрее чем атомы. Суть методики заключалась в фиксировании скачка интенсивности рабочей линии при различных временах паузы между подаваемыми импульсами тока. Так, если настроиться на линию излучения хлора, форма ожидаемых кривых должна быть такой, как показано на рис. 2 и 3. В момент зажигания разряда концентрация атомов медленно возрастает и достигает стационарного значения. В момент прерывания тока разряда концентрация атомов не падает мгновенно, а медленно уменьшается по закону $n=n_0 \exp(-k_r \cdot t)$, и при большой длительности паузы падает до нуля. Если время паузы при горении разряда будет меньше, чем время, за которое концентрация атомов падает до нуля, то к моменту зажигания разряда их концентрация не будет нулевой. Зависимости соответствующие этому случаю показаны на рис. 3. Для этого случая в момент прихода очередного токового импульса концентрация атомов хлора будет отлична от нуля, и интенсивность излучения увеличится скачком, а далее будет медленно расти в соответствии с ростом концентрации атомов. Длина прямолинейного участка скачка интенсивности будет пропорциональна остаточной концентрации атомов, не успевших погибнуть за время паузы. Проводя измерения при разных длительностях паузы горения разряда можно построить кинетическую кривую гибели атомов. Способ построения такой кривой приведен на рис. 4.

В действительности, описанные выше формы кривых трудно получить экспериментально по нескольким причинам. Разряд в хлоре является мощным источником электрических шумов, а само излучение разряда очень нестабильно во времени. Все это приводит к тому, что получаемые с аналого-цифрового преобразователя формы импульсов оказываются сильно зашумлены и не пригодны для какого-либо анализа. Чтобы уменьшить влияние шумов применялась методика накопления полезного сигнала. Она заключается в том, что в память компьютера записывалась не одна осциллограмма, а несколько за короткий промежуток времени. В наших экспериментах записывалось до 150 импульсов. Далее все импульсы поточечно усреднялись, что позволяло снизить зашумленность получаемых зависимостей. На рис. 5 приведена одна из экспериментально полученных зависимостей. Сразу видно, что она отличается от предполагаемых. В самом

начале импульса стабильно проявлялся максимум, наличие которого усложняло определение скачка интенсивности. Наличие этого выброса не связано с повышенным напряжением на электродах в момент зажигания разряда, как можно было бы предположить. Выброс проявлялся даже при неполной модуляции разряда. В то же время, в электроположительных газах, например азоте или аргоне, этот выброс не наблюдался. Все это позволяет сделать вывод, что свойства плазмы электроотрицательных газов при импульсном зажигании разряда существенно отличаются от плазмы электроположительных газов. Интересна зависимость величины максимума этого импульса от длительности паузы. При паузах длительностью от 0,3 до 1 мс., максимум практически отсутствует, а при паузах от 1 мс. и выше проявляется всегда и достаточно стабильно. Причем, его величина уже практически не зависит от длительности паузы. Кроме того, наличие данного максимума связано, по-видимому, с состоянием стенки реактора. Если стенка чистая, максимум проявляется при достаточно больших паузах, около 10 мс. Если в процессе горения разряда стенка покрывается продуктами распыления электродов, максимум появляется при меньших паузах. Чем более загрязнена стенка, тем при меньших длительностях паузы начинает появляться этот выброс. Описанная тенденция, связанная с проявлением максимума на осциллограммах, затрудняла интерпретацию данных и определение величины искомого скачка на экспериментальных зависимостях, особенно при больших временах пауз, соизмеримых с характерными временами гибели атомов хлора на стенках реактора. Чтобы определить величину скачка интенсивности, в условиях, когда на него накладывается максимум, экспериментальные точки обрабатывались полиномом 5-й степени. На рис. 5 показан способ определения величины скачка интенсивности.

Для исследований были выбраны следующие режимы включения разряда: длительность горения разряда была 50 - 100 мс. (она определялась гарантированным выходом интенсивности излучения разряда на стационарное значение), длительность паузы - от 1 до 50 мс с шагом 2 мс. Длительности пауз были выбраны исходя из наиболее часто встречающегося в литературе значения коэффициента гетерогенной гибели атомов хлора равного 10 с^{-1} ; то есть, с учетом стеночной рекомбинации стоило ожидать появления скачка интенсивности при включении разряда в диапазоне длительностей пауз до 100 мс. Дальнейшее статистическое накопление результатов показало, что при различных длительностях паузы время выхода концентрации атомов на стационарное значение было примерно одинаково и по нашим оценкам не превышало 10 мс. Вследствие этого, полный период следования токовых импульсов был уменьшен до 50 мс.

Определенный с помощью данной методики коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов хлора на чистой стенке оказался равным 6 с^{-1} , а на стенке, покрытой продуктами распыления электродов после длительного времени горения разряда оказался 430 с^{-1} .

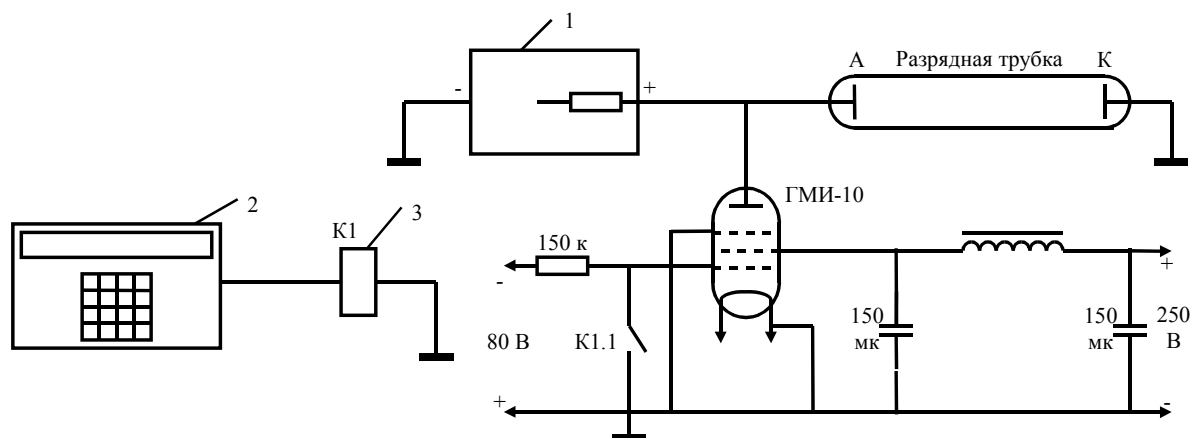


Рис. 1. Система питания разряда.

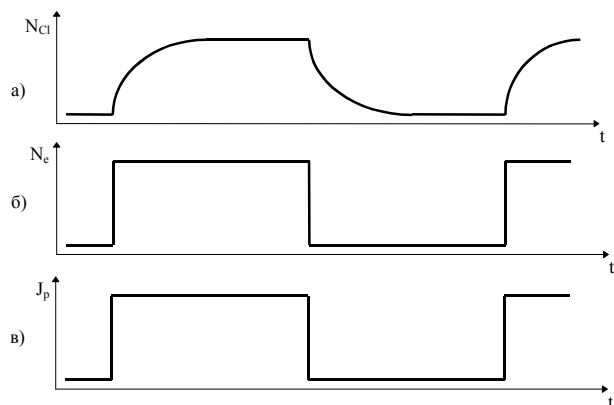


Рис. 2. Предполагаемый ход концентрации: а) атомов хлора; б) электронов; в) тока разряда при большой длительности паузы.

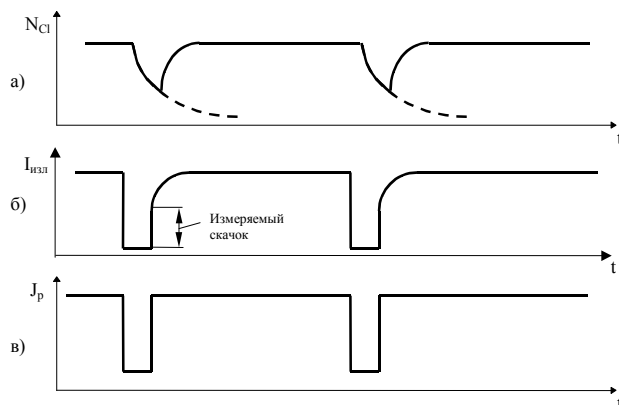


Рис. 3. Предполагаемый ход а) концентрации атомов хлора, б) излучения, в) тока разряда при малой длительности паузы.

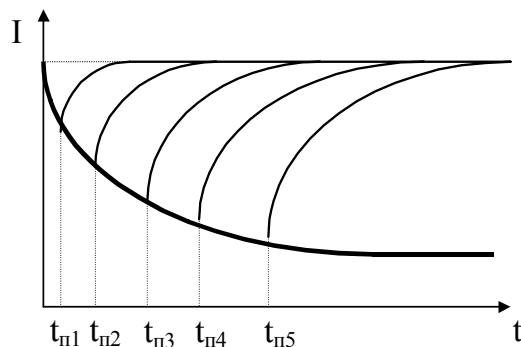


Рис. 4. Построение кинетической кривой гибели атомов хлора.

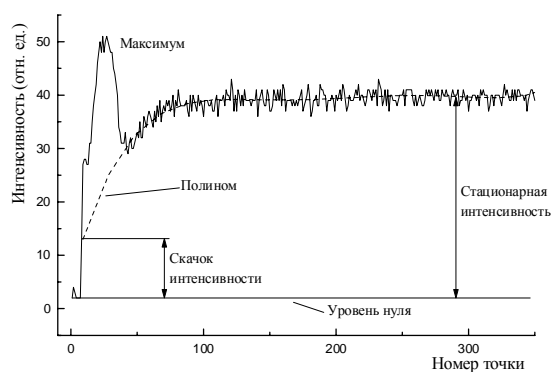


Рис. 5. Экспериментальная осциллограмма интенсивности излучения в момент включения разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов Ю.В., Ситанов Д.В. "Простой АЦП – приставка к ПК" // Радио. 2002. № 4. С. 17-19.