

04;11

Влияние состояния поверхности катода на характеристики импульсного тлеющего разряда с полым катодом

© Н.В. Гаврилов, С.Е. Романов

Институт электрофизики УрО РАН,
620049 Екатеринбург, Россия

(Поступило в Редакцию 6 октября 1997 г.)

Исследовано влияние частоты повторения импульсов ($0.1-10^3 \text{ s}^{-1}$) и среднего тока разряда ($0-1 \text{ A}$) на время запаздывания пробоя и напряжение горения тлеющего разряда низкого давления ($p < 0.1 \text{ Pa}$) в электродной системе типа обращенный магнетрон с большой площадью поверхности катода ($\sim 10^3 \text{ cm}^2$). Показано, что увеличение частоты приводит к многократному уменьшению не только статистического разброса времени запаздывания, но и времени формирования разряда, а величина среднего тока разряда оказывает существенное влияние на напряжение его горения. Дана качественная интерпретация механизма наблюдаемых явлений, основывающаяся на наличии тонких диэлектрических пленок на поверхности катода.

Введение

Импульсно-периодический режим горения разряда низкого давления с замкнутым дрейфом электронов внутри катодной полости в слабом магнитном поле используется в плазменных источниках широких пучков электронов и газовых ионов [1,2]. Разряд возбуждается в электродной системе с большими межэлектродными расстояниями ($> 10 \text{ cm}$) при низком давлении газа $p < 0.1 \text{ Pa}$ приложением относительно невысокого импульсного напряжения U амплитудой $2-3 \text{ kV}$. Большая площадь рабочей поверхности полого катода ($\sim 10^3 \text{ cm}^2$) и малая скважность импульсов приводят к тому, что значения средней плотности ионного тока на катоде оказываются невысокими, хотя импульсная плотность тока обычно составляет $1-10 \text{ mA/cm}^2$ при длительности импульса тока пучка $\tau \sim 0.1-1 \text{ ms}$ и частоте повторения $f \sim 1-100 \text{ s}^{-1}$. Для получения вакуума в источниках технологического назначения могут использоваться обычные масляные средства откачки. Необходимость периодической смены образцов приводит к частым контактам поверхности электродов источника с атмосферной средой. Поэтому, несмотря на частичное кондиционирование поверхности катода в тлеющем разряде, на ней могут присутствовать как адсорбированные атомы газа, так и загрязнения.

Экспериментально измеренные в данных условиях времена запаздывания пробоя достаточно велики и составляют десятки–сотни микросекунд. Как показали эксперименты [3,4], время запаздывания зависит не только от приложенного напряжения, давления газа и магнитной индукции, которые определяют скорость роста тока в промежутке при развитии таунсендовских лавин, но и от таких параметров импульсно-периодического режима, как частота повторения импульсов f , длительность импульса тока τ и его амплитуда I . Зависимость результатов измерений времени запаздывания разряда от предстории разряда и параметров импульсно-периодического режима для других условий горения разряда наблюда-

лась ранее в ряде работ, к примеру в [5,6]. Однако во всех предыдущих исследованиях изучалось изменение средних статистических значений времени запаздывания, тогда как в наших экспериментах [4] наблюдалось существенное изменение времени запаздывания при минимальном статистическом разбросе измеряемых значений. В [4] было показано, что напряжение горения импульсного разряда также зависит не только от величины магнитной индукции B , давления p и амплитудного тока I , но и от частоты повторения импульсов. Поскольку изменение условий зажигания и горения импульсного разряда оказывает существенное влияние на функционирование и параметры пучка источников заряженных частиц на его основе, то изучение особенностей характеристик разряда в импульсно-периодическом режиме является актуальной задачей.

В настоящей работе исследовано влияние частоты повторения импульсов и среднего тока разряда на время запаздывания и напряжение горения импульсного тлеющего разряда с полым катодом больших размеров и предложено качественное объяснение процессов на катоде тлеющего разряда, способных оказать влияние на свойства импульсного разряда в условиях эксперимента.

Эксперимент

В экспериментах использовалась электродная система источника ионов [1] (рис. 1), включающая цилиндрический полый катод 1 из нержавеющей стали, имеющий одинаковые длину L и диаметр D (150 mm), и стержневой анод 2 из вольфрама диаметром $d = 3 \text{ mm}$ и длиной $l = 100 \text{ mm}$, установленный на оси системы. Газ (аргон, азот, кислород) напускался непосредственно в катодную полость и откачивался через торцевую часть 3 катода, закрытую мелкоструктурной ($0.6 \times 6 \text{ mm}$) сеткой из нержавеющей стали. Давление газа в вакуумной камере при величине потока напускаемого в разрядный промежуток газа $1 \text{ cm}^3 \text{ atm/s}$ составляло 0.01 Pa . Вакуум создавался паромасляным насосом без ловушки. Продольное маг-

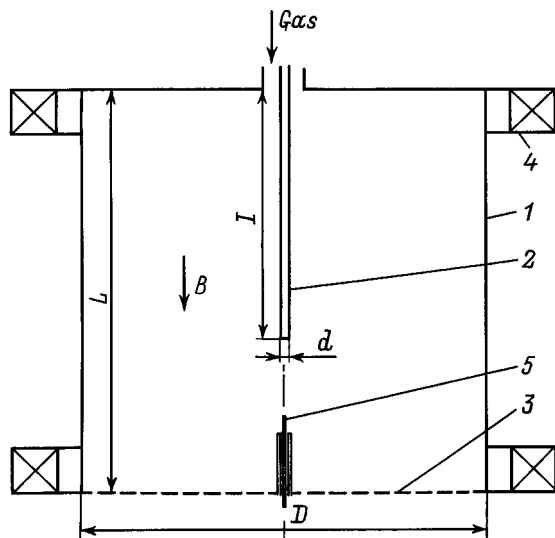


Рис. 1. Схема электродной системы.

нитное поле с индукцией 1 мТ создавалось соленоидом 4. На оси разрядной системы установлен цилиндрический лэнгмюровский зонд 5 диаметром 0,4 мм и длиной 6 мм.

Разряд возбуждался в импульсно-периодическом режиме с регулируемой в пределах 0,1–1300 Нз частотой повторения импульсов. Длительность импульсов регулировалась в пределах 0,1–1 мс, длительность фронта импульса не превышала 5 мкс. Амплитуда U импульса напряжения, прикладываемого к промежутку, регулировалась в пределах 1–3 кВ. Нестабильность амплитуды импульса напряжения и частоты повторения не превышала 5%. Ток разряда регулировался в пределах 0,05–20 А. В экспериментах по влиянию среднего тока разряда на напряжение горения импульсного разряда использовался непрерывный разряд с регулируемым в пределах 0,1–1 А током. Импульсное напряжение в этом случае прикладывалось к промежутку, в котором горел разряд постоянного тока.

Время запаздывания пробы t определялось с момента приложения напряжения U до момента времени, соответствующего резкому спаду напряжения на разрядном промежутке до уровня $0,9U$. Измерение напряжения горения разряда производилось после достижения установившейся величины тока разряда I . Приводимые данные усреднены по результатам 64 осциллографических измерений.

Перед проведением измерений проводилась продолжительная тренировка разрядной системы (~ 1 h) при фиксированной величине среднего тока разряда до установления неизменных значений параметров импульсного разряда. На рис. 2 приведены зависимости времени t от длительности $1/f$ паузы между импульсами тока разряда в аргоне после тренировки со средним током 0,5 (кривая 1) и 0,1 А (кривая 2). Рост f приводит к резкому уменьшению времени запаздывания t , при

этом значения t зависят от условий предварительной тренировки. Статистический разброс значений времени запаздывания уменьшается до минимальной величины ($\sim 2\%$), обусловленной нестабильностью амплитуды и частоты импульсов и времени формирования разряда, уже при частоте ~ 5 с $^{-1}$ (рис. 3). Наряду со снижением статистического разброса в диапазоне частот $f < 5$ с $^{-1}$ наблюдается и снижение минимальных регистрируемых значений времени запаздывания. При дальнейшем росте частоты время запаздывания продолжает монотонно уменьшаться, разброс значений t при этом сохраняется минимальным. После замены аргона на азот или кислород и продолжительной тренировки катода характер зависимостей $t(f)$ и изменения разброса значений t с частотой остается таким же, что и для разряда в аргоне. Отличительной особенностью импульсно-периодического разряда в кислороде является значительно меньшая скорость увеличения t при $f < 200$ с $^{-1}$.

Вольт-амперная характеристика разряда в электродной системе типа обращенный магнетрон является растущей, причем величина дифференциального сопротивления разряда dU/dI с ростом тока уменьшается. Поэтому в импульсном сильноточном режиме ($I \sim 5$ –20 А) напряжение горения разряда слабо зависит от амплитудной величины тока, но его величина может быть как выше, так и ниже напряжения горения более слаботочного разряда постоянного тока при одинаковых условиях в промежутке. Величина среднего тока разряда оказывает более существенное влияние на напряжение горения разряда в импульсно-периодическом режиме. На рис. 4 приведены результаты, иллюстрирующие влияние среднего тока в разрядном промежутке на напряжение горения импульсного и непрерывного разрядов. К промежутку, в котором поддерживался непрерывный разряд с регулируемым в пределах 0,1–1 А током, прикладывалось импульсное напряжение и возбуждался разряд с частотой

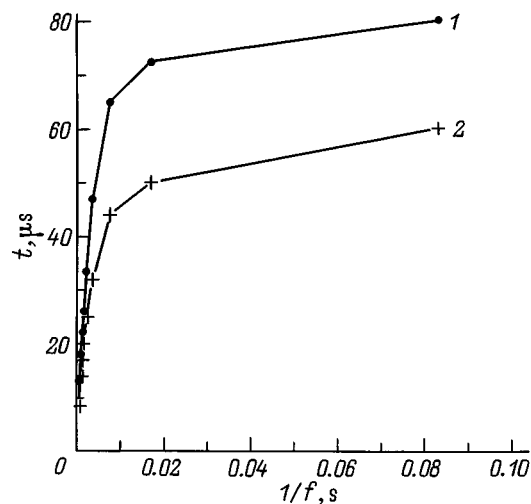


Рис. 2. Зависимость времени запаздывания пробы от длительности паузы между импульсами тока разряда: $U = 2$ кВ, $I = 2$ А, $\tau = 0,1$ мс.

$f = 10 \text{ s}^{-1}$ и амплитудным током 10 А. С увеличением постоянного тока возрастает напряжение не только непрерывного, но и импульсного разряда. После гашения разряда постоянного тока значения напряжения горения импульсного разряда уменьшаются до более низких исходных значений за несколько минут. В течение первых 1–2 min незначительно (на $\sim 5 \mu\text{s}$) возрастает время запаздывания разряда. Увеличение частоты повторения импульсов тока приводит к росту напряжений горения обоих разрядов.

Постоянная времени распада плазмы определялась по скорости изменения ионного тока в цепи отрицательно смещенного относительно катода ленгмюровского зонда после выключения разряда. Время спада напряжения на промежутке до нуля составляло несколько μs . Оцененные значения постоянной времени распада находятся в пределах 15–20 μs .

Обсуждение результатов

Как известно, время t запаздывания разряда определяется как частотой ν появления в разрядном промежутке начальных электронов, так и временем формирования в промежутке структуры тлеющего разряда в результате развития серии таунсендовских лавин. Уменьшение статистического разброса значений t с ростом частоты (рис. 3) свидетельствует об увеличении тока начальных электронов. В условиях эксперимента этот ток может быть обусловлен наличием остаточных зарядов в промежутке, влиянием метастабильных атомов и молекул, а также послеразрядной электронной эмиссией катода [7]. Поскольку снижение плотности плазмы в объеме на стадии ее распада обусловлено рекомбинацией частиц

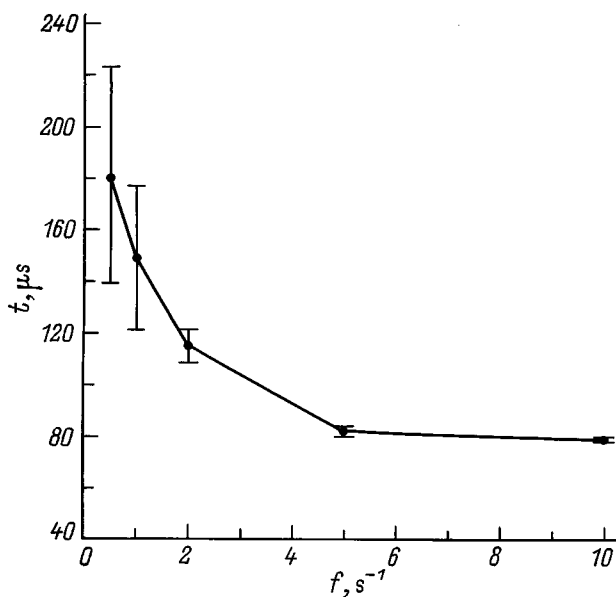


Рис. 3. Зависимость времени запаздывания пробоя от частоты повторения импульсов тока разряда: $U = 2 \text{ kV}$, $I = 10 \text{ A}$, $\tau = 1 \text{ ms}$.

на стенках, то спад плотности должен происходить по экспоненциальному закону, что подтверждается экспериментально. В этом случае, как следует из оценок, влияние остаточных зарядов может проявляться на частотах порядка 1 kHz при постоянной времени распада плазмы $\sim 30 \mu\text{s}$. Поскольку изменение времени запаздывания наблюдается при значительно более низких частотах, а измеренные значения постоянной времени распада плазмы составляют 15–20 μs , то можно заключить, что особенности зависимостей $t(f)$ не связаны с наличием остаточных зарядов в объеме разрядного промежутка. Представляется маловероятным и существование метастабильей на поверхности катода в течение столь длительного времени ($\sim 0.1 \text{ s}$).

В условиях эксперимента наиболее вероятной причиной появления в разрядном промежутке начальных электронов может быть послеразрядная электронная эмиссия катода. Характерный для послеразрядной эмиссии спад тока со временем позволяет объяснить поведение зависимостей $t(f, 1/f)$, приведенных на рис. 2, 3. Уменьшение частоты ν появления начальных электронов при увеличении длительности пауз между импульсами тока приводит к росту средних значений t и их статистического разброса. Особенностью описываемых экспериментов является использование катода с большой рабочей поверхностью, что привело к уменьшению статического разброса значений времени запаздывания и позволило проводить прямые измерения времени формирования разряда при невысокой плотности тока после эмиссии ($10^{-17} - 10^{-16} \text{ A/cm}^2$) с частично кондиционированной в разряде поверхности катода и исследовать зависимости времени формирования разряда от условий в промежутке и параметров импульсно-периодического режима.

Статистический разброс значений t снижается до минимальной величины при $f > 5 \text{ s}^{-1}$ (рис. 3). Дальнейшее уменьшение t с ростом f может быть обусловлено только изменением времени формирования тлеющего разряда. При изменении частоты f от 10 до 1300 Hz время формирования разряда в аргоне уменьшается в несколько раз (с 60–80 до 10–15 μs в условиях, соответствующих рис. 2). Влияние среднего тока разряда на этапе предварительной тренировки катода на величину t оказывается противоположным, т. е. рост тока приводит к увеличению t , а его уменьшение — к снижению времени задержки, однако изменения t в этом случае меньше, составляют 5–15 μs и происходят в течение достаточно продолжительного времени (нескольких минут). Такой характер зависимости t от среднего тока свидетельствует о том, что тренировка не сводится к обычной очистке поверхности катода от загрязнений, а обеспечивает установление некоторого равновесного состояния его поверхности после определенного периода релаксации.

Рост напряжения горения импульсного разряда наблюдается как при увеличении тока непрерывного разряда в том же промежутке (рис. 4), так и при изменении среднего тока импульсно-периодического разряда изменением частоты повторения импульсов [4]. Выключение разряда

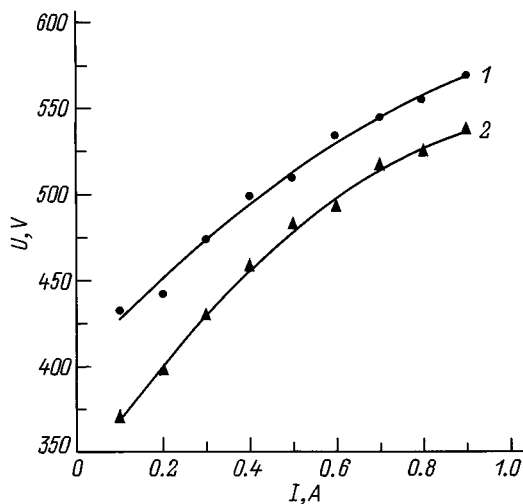


Рис. 4. Зависимость напряжений горения импульсного (1) и непрерывного (2) разрядов от величины тока непрерывного разряда. Параметры импульсно-периодического разряда: $I = 10$ А, $f = 10$ с $^{-1}$, $\tau = 1$ мс.

постоянного тока приводит к восстановлению исходных значений напряжения и времени запаздывания в течение нескольких минут. После достижения установившегося состояния поверхности катода существенного изменения параметров импульсно-периодического режима разряда не наблюдается в течение продолжительного времени (несколько часов).

Исходя из полученных результатов можно заключить, что изменение среднего тока разряда существенно влияет на состояние поверхности катода, в результате чего изменяются как коэффициент ионно-электронной эмиссии, так и электронная послеэмиссия катода. При этом способ изменения величины среднего тока (изменением частоты повторения импульсов или изменением величин I , τ и тока постоянного разряда) оказывает различное влияние на изменение t и одинаковое на величину напряжения горения разряда. Такой характер изменения эмиссионных свойств катода можно объяснить исходя из предположения о существовании на поверхности катода непроводящих тонких пленок, условия регенерации и свойства которых в разряде определяются величиной среднего тока разряда.

Как известно [8], результат воздействия потока ионов на поверхность металла зависит от соотношения между плотностью ионного тока и потоком частиц остаточного газа, адсорбирующихся на поверхности катода. В обычных условиях режим преимущественного распыления и очистки катода достигается только при достаточно высокой плотности тока ионов 0.1–1 мА/см 2 . При наличии в объеме химически активных примесей и при низкой плотности ионного тока может установиться динамическое равновесие процессов адсорбции и распыления, при котором на поверхности катода может длительное время существовать слой с измененным химическим составом

и структурой. В [9] прямыми измерениями состава поверхности катода в тлеющем разряде постоянного тока было показано, что уменьшение тока разряда со временем совпадает со снижением содержания загрязнений на поверхности катода, причем толщина загрязняющей кислород- и углеродсодержащей пленки составляет, по оценкам, лишь несколько десятков ангстрем. Присутствие на поверхности электродов тонких диэлектрических пленок и возникновение послеразрядной эмиссии с плотностью тока 10^{-15} – 10^{-18} А/см 2 наблюдались в экспериментах [10] после всех видов очистки, включающих различные комбинации высокотемпературного отжига в вакууме и обработки электродов тлеющим разрядом.

Наличие непроводящих пленок на поверхности катода позволяет объяснить как особенности процесса зажигания, так и зависимость напряжения разряда в квазистационарной стадии его горения от параметров импульсно-периодического режима. Уменьшение времени формирования t при увеличении частоты повторения f и соответственно рост тока послеразрядной эмиссии обусловлены тем, что при $t \gg 1/\nu$ реализуется режим многоэлектронного зажигания. Если ток в промежутке нарастает лавинообразно, т. е. $I(t) = I(0) \exp[-t(\mu - 1)/\tau]$, где τ — время пролета иона, μ — коэффициент усиления тока в промежутке, то уменьшение времени формирования в несколько раз означает увеличение начального тока $I(0)$ примерно на столько же порядков величины. Таким образом, наблюдаемое в экспериментах уменьшение t означает рост плотности тока послеэмиссии на 4–5 порядков при уменьшении временного интервала от 10^{-1} до 10^{-3} с.

Изучение динамики процесса послеэмиссии методом измерения времен запаздывания разряда проводилось в различных условиях и после разнообразных воздействий в целом ряде работ (см., например, [5,7,10]) в интервале времен от нескольких секунд до десятков часов. Общей закономерностью всех полученных результатов является рост скорости изменения тока послеразрядной эмиссии по мере уменьшения времени с момента прекращения разряда. Использование в наших экспериментах высокой частоты повторения импульсов позволило провести измерения с малой временной задержкой (10^{-3} с) относительно момента гашения разряда и обнаружить высокую скорость изменения тока послеразрядной эмиссии электронов при $1/f < 10^{-2}$ с.

Известно, что адсорбция атомов основных загрязняющих примесей — кислорода и углерода на поверхности приводит к увеличению работы выхода металлов и соответствующему уменьшению коэффициента ионно-электронной эмиссии γ [11]. Увеличение потенциальной эмиссии электронов возможно в результате формирования на поверхности металла проникаемой для бомбардирующих катод ионов тонкой непроводящей пленки и создания в ней электрического поля, облегчающего выход вторичных электронов из металла вследствие эффекта Шоттки. Такое поле создается в результате возникновения на поверхности пленки положительного

электрического заряда под действием излучения из разряда и вследствие осаждения положительных ионов [5,7]. Наличие микронеоднородностей на поверхности катода, способствующих усилению поля в пленке, обеспечивает возникновение послеразрядной автоэлектронной эмиссии катода.

Быстрый спад тока послеразрядной эмиссии со временем до невысоких значений свидетельствует о незначительном загрязнении катода, которое тем не менее оказывает существенное влияние на свойства импульсного разряда. Следует отметить, что наличие на катоде приповерхностного слоя с измененным составом и структурой не приводит к сколь-либо существенному загрязнению пучка газовых ионов [1].

Заключение

Состояние поверхности катода в тлеющем разряде в условиях несовершенного вакуума зависит от среднего тока разряда и оказывает существенное влияние на параметры процессов зажигания и горения импульсного разряда. На поверхности катода при низком среднем токе разряда формируются непроводящие тонкие пленки, наличие которых приводит к существенному уменьшению времени запаздывания разряда и напряжения его горения. С увеличением среднего тока влияние пленок уменьшается. Время релаксации параметров разряда при изменении среднего тока составляет несколько минут.

Методика, основанная на использовании катода с большой площадью рабочей поверхности и изменении в широких пределах частоты повторения импульсов, позволила с высоким временным разрешением исследовать динамику изменения послеразрядной эмиссии и обнаружить резкое увеличение плотности тока послеэмиссии при сокращении интервала времени после гашения разряда. Высокая плотность тока послеразрядной эмиссии с большой поверхности катода при повышенной частоте повторения импульсов тока обеспечивает многоэлектронное инициирование разряда, следствием чего является уменьшение времени формирования разряда.

Обнаруженная в эксперименте высокая степень влияния тонких пленок на эмиссионные свойства катода тлеющего разряда обуславливает необходимость учета их существования в экспериментах с импульсными тлеющими разрядами функционирующих в техническом вакууме устройствах на их основе.

Список литературы

- [1] *Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Nikulin S.P.* et al // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. Vol. A14(3). P. 1050–1055.
- [2] *Гаврилов Н.В., Завьялов М.А., Никулин С.П.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 19. Вып. 21. С. 57–60.
- [3] *Gavrilov N.V., Nikulin S.P.* // *Proc. XVI Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum* / Ed. G. Mesyats. Proc. SPIE. 2259. 1994. P. 118–121.

- [4] *Gavrilov N.V., Mesyats G.A.* // *Proc. XXIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases* / Ed. M.C. Bordage & A. Gleizes. Toulouse: Univ. of P. Sabatier, 1997. Vol. 2. P. 32–33.
- [5] *Paetow H.* // *Z. Physik.* 1939. N 111. P. 770–791.
- [6] *Kudrle V., Le Due E., Fitaire M.* // *Proc. XXIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases* / Ed. M.C. Bordage & A. Gleizes. Toulouse: Univ. of P. Sabatier, 1997. Vol. 4. P. 28–29.
- [7] *Королев Ю.А., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [8] *Плешивцев Н.В.* Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968.
- [9] *Houston J.E., Bland R.D.* // *J. Appl. Phys.* 1973. Vol. 44. N 6. P. 2504–2508.
- [10] *Чистяков П.Н., Татарина Н.В.* // *ЖТФ.* 1965. Т. 35. Вып. 7. С. 1333–1355.
- [11] *Каминский М.* Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. М.: Мир, 1967. 506 с.