

04;10

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА С УБЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ПРИ ГРАНИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

© Г.В.Колбычев, П.Д.Колбычева, И.В.Пташник

Институт оптики атмосферы СО РАН,
634055 Томск, Россия
(Поступило в Редакцию 1 марта 1995 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик зажигания и срыва в дуговой канал при высоких напряжениях импульсного объемного разряда в газе среднего давления, являющегося эффективным источником пучков убегающих электронов. Показано, что УФ подсветка катода через сетчатый анод из пучковой плазмы зажигает и поддерживает разряд при напряжении, в 2–3 раза меньшем, чем напряжение самостоятельного пробоя этого же промежутка, но при непрозрачном аноде. Установлено, что причиной срыва объемного разряда в дуговой канал является самостоятельный пробой промежутка, который значительно затруднен из-за убегания электронов в сильно электрической поле. Показано, что механизмы развития объемного разряда и пробоя различны и практически не оказывают друг на друга никакого влияния. Отсюда появляется принципиальная возможность усиления первого и торможения второго с целью повышения энергии и тока электронного пучка.

Импульсный объемный разряд в коротком межэлектродном промежутке интересен тем, что в нем длительное время (свыше 10 нс) выполняются условия для эффективного перевода электронов в режим убегания при давлении заполняющего газа до 20 кПа [1]. На этой основе разработаны электронные пушки, в которых 40–80% тока разряда переносится пучком убегающих электронов со средней энергией $\sim 0.7eU_0$ (e — заряд электрона, U_0 — амплитудное значение импульса напряжения) [2]. Особенностью пушек является их работоспособность при частотах повторения импульсов 0.1–100 кГц [2,3].

Естественно, что разряд, обладающий столь исключительными свойствами, стал объектом ряда исследований [2,4–9]. Но, несмотря на полученный в них обширный экспериментальный и теоретический материал, общая картина разряда, механизмы его развития и параметры генерации пучка электронов в различных фазах остаются неясными. При этом отсутствует информация о самой первой фазе — пробое разрядного промежутка, которая фактически определяет динамику последующих фаз разряда. Не рассматривались также условия и причины

перехода объемного высоковольтного разряда в дуговой канал, который ограничивает возможность увеличения напряжения на разряде U и тем самым энергию электронов в пучке. Настоящая работа имеет целью восполнить указанные пробелы.

1. Техника и методика эксперимента

Исследования проводились на установке, типичной для наших экспериментов [1,2,4-7]. Разрядная камера из отрезка стеклянной трубки закрыта с одного торца плоским катодом из нержавеющей стали с полированной и очищенной рабочей поверхностью. С другого торца трубка закрыта коллектором электронов. В трубке параллельно катоду помещался анод, соединенный с коллектором и заземленный через токоизмерительный шунт. Катод и анод разделены изолирующей диафрагмой с центральным отверстием диаметром 12 мм. Между анодом и коллектором оставлено пространство длиной 40 мм, необходимое для обеспечения требуемой УФ подсветки катода через сетчатый анод. При необходимости сюда могли помещаться экранные сетки и ослабители УФ подсветки (в виде пакета металлических сеток [7]). Камера заполнялась гелием марки ВЧ до требуемого давления. Электроды предварительно тренировались разрядом. Откачанный до ~ 1 Па промежуток катод-анод выдерживал без пробоя напряжение 15 кВ — максимальное для источника питания.

Импульс напряжения формировался путем подключения заряженной до напряжения $U_0 = 0-15$ кВ емкости $C = 110-1500$ пФ к электродам промежутка, зашунтированным через линию задержки разрядным сопротивлением. Этот генератор давал импульсы отрицательной полярности с передним фронтом 0.1 мкс, почти плоской вершиной длительностью 2 мкс и последующим экспоненциальным спадом с постоянной времени 3.1 мкс.

Измерения амплитудно-временных параметров импульсов напряжения на катоде и тока разряда, а также задержки пробоя и момента перехода объемного разряда в дуговой канал проведены с помощью двухлучевых осциллографов С1-55, С1-74. Одиночные импульсы осциллографировались на С7-10Б.

В работах [6,7] установлено, что первой после пробоя фазой является фотоэлектронный разряд. В нем основным источником зарядов в межэлектродном промежутке служит фотоэффект на катоде под действием УФ подсветки из пучковой плазмы в заанодной области. Чтобы определить ее влияние на пробой, нами испытаны три системы электродов: а) со сплошным анодом, б) с анодом из фольги с малым отверстием в центре (диаметром 0.2 мм), в) с сетчатым анодом с размерами ячеек 0.16×0.32 мм и геометрической прозрачностью $\mu = 0.84$. Исследования промежутка с малым отверстием носили вспомогательный характер.

При определении минимальных значений напряжения пробоя U_{th} в зависимости от $p \cdot d$ (где p — давление гелия, d — межэлектродный зазор) использованы следующие методики. Для промежутка со сплошным анодом из-за невозможности визуального наблюдения за разрядом факт пробоя регистрировался по осциллограммам тока. Для промежутка с сетчатым анодом факт пробоя на осциллограммах отсутствует, и поэтому использовалась лишь визуальная регистрация. Сравне-

ние результатов измерений, полученных и тем и другим способом для промежутка с малым отверстием в аноде, показали, что осциллографический способ дает завышенные на 100–200 В значения и больший их разброс, чем визуальный.

Измерения проводились в трех режимах посылки импульсов: одиночных ($f < 1$ Гц), повторяющихся ($f = 40$ Гц), частых ($f = 400$ Гц). За U_{th} принималось такое значение, при котором из 10 подач в одной регистрировался пробой. Каждое измерение повторялось 5–10 раз. Испытания показали, что разброс значений при повторениях не превышает $\pm 5\%$ для промежутка со сплошным и $\pm 10\%$ от U_{th} с сетчатым анодами.

2. Результаты измерений и их анализ

На рис. 1 приведены результаты измерений минимального напряжения пробоя $U_{th}(p \cdot d)$ промежутка со сплошным анодом при различной частоте посылок импульсов и величине разрядной емкости. По вольт-амперным и временным характеристикам разряд подобен наблюдавшемуся в [1,4] сильноточному объемному разряду, развивающемуся в виде узкого диффузного канала: длительность импульса тока ~ 10 нс, скорость нарастания $1-5 \cdot 10^9$ А/с, следы диаметром 0.3–1 мм на катоде. Следы хаотично распределены по поверхности катода, а при наличии в аноде малого отверстия сконцентрированы напротив него. В последнем случае из разряда выходит пучок убегающих электронов в виде узкого луча, направленного к коллектору. С повышением напряжения на катоде, т. е. с увеличением тока пучка, луч начинает рассыпаться. На пороге пробоя ток разряда сильно зависит от напряжения U_0 . Так, при превышении U_0 над U_{th} всего на 100 В при высоком и на 200–300 В при низком давлении гелия ток возрастает до единиц ампер. Таким образом, за единицы наносекунд от анода к катоду

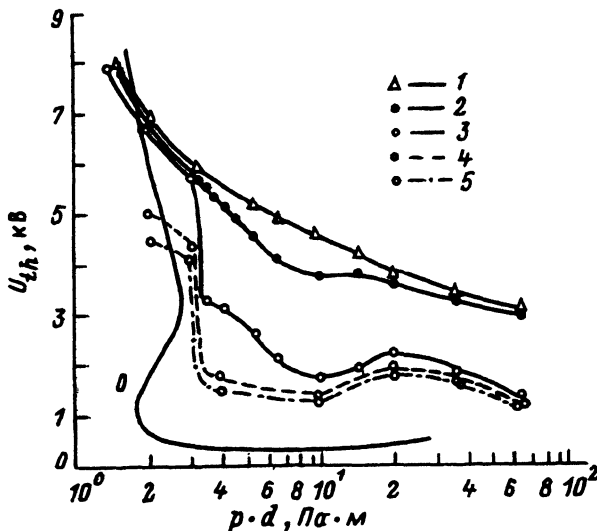


Рис. 1. Зависимость напряжения пробоя промежутка со сплошным анодом от $(p \cdot d)$ при различной частоте посылок импульсов f и величине разрядной емкости C .

0 — кривая Пашена в гелии [10], $d = 1$ мм; газ — гелий; C , пФ: 1–3 — 110, 4 — 220, 5 — 470; f , Гц: 1 — < 1 , 2 — 40, 3–5 — 400.

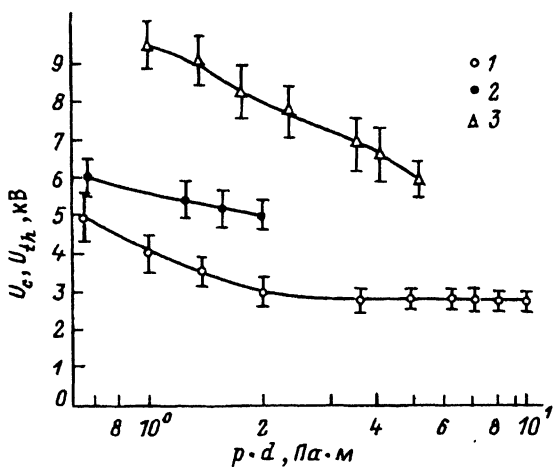


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания объемного разряда U_{th} и значения порогового напряжения срыва разряда в дуговой канал U_c в промежутке с сетчатым анодом от $(p \cdot d)$.

Газ — гелий, $d = 0.5$ мм, $C = 470$ пФ, $f = 40$ Гц; 1 — U_{th} при $\mu = 0.44$, 2 — U_{th} при $\mu = 0.17$, 3 — U_c при $\mu = 0.44$.

прорастает узкий плазменный канал, пропускающий ток плотностью $10^7 - 10^8$ А/м². Разряд не является дуговым, поскольку напряжение на нем остается достаточно высоким (2–4 кВ) и продолжается генерация электронного пучка. Медленный распад этого сильноионизованного плазменного канала в межимпульсный период и является скорее всего причиной отраженного на рис. 1 снижения электрической прочности межэлектродного промежутка с повышением частоты посылок импульсов.

Возникающий при высоких частотах скачок значений U_{th} при $(p \cdot d) = 3$ Па·м является, по-видимому, S-образной аномалией, присущей кривой Пашена в гелии [10]. Заметим, что аномалия появляется полностью сформированной и при увеличении пробойного тока (т.е. с увеличением разрядной емкости C) величина скачка не меняется. Однако при этом весь прилегающий к нему участок кривой $U_{th}(p \cdot d)$ заметно смещается вниз.

На рис. 2 приведены результаты, полученные для промежутка с сетчатым анодом. Здесь картина пробоя существенно отличается от описанной выше. Во-первых, пробой всегда осуществляется объемным разрядом, протекающим со всей поверхности катода. Во-вторых, при $U_0 = U_{th}$ в промежутке, хотя и зажигается разряд, ток его очень мал ($I = 10^{-3} - 10^{-2}$ А) и скорость $dI/dt = 10^5 - 10^6$ А/с. С дальнейшим повышением напряжения на промежутке ток разряда монотонно растет, вначале слабо, а затем со все более возрастающей скоростью dI/dU (рис. 3). Таким образом, на осциллограммах тока и напряжения факт пробоя при прохождении через U_{th} никак не проявляется. В-третьих, во всех трех режимах посылки импульсов напряжения вид кривой $U_{th}(p \cdot d)$ и ее положение не меняются. Лишь с повышением частоты до 2 кГц наблюдается некоторое (не более чем на 10%) смещение $U_{th}(p \cdot d)$ вниз.

Из рис. 2 следует, что даже при пониженном давлении гелия, когда интенсивность УФ подсветки вообще невелика, она обеспечивает зажигание разряда при напряжениях вдвое меньших величин U_{th} , приведенных на рис. 1. Размещение в дрейфовом пространстве ослабителей с геометрической прозрачностью $\mu = 0.17$ (ослабление равно μ^{-2}), конечно, сказалось на величине напряжения зажигания, однако и в этом

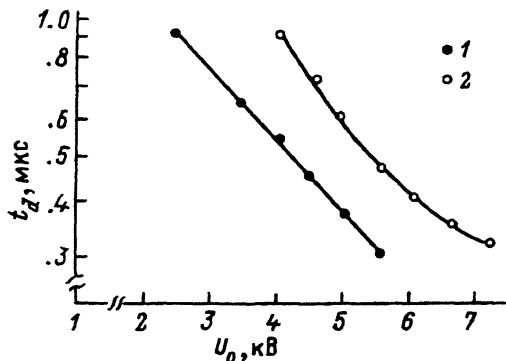
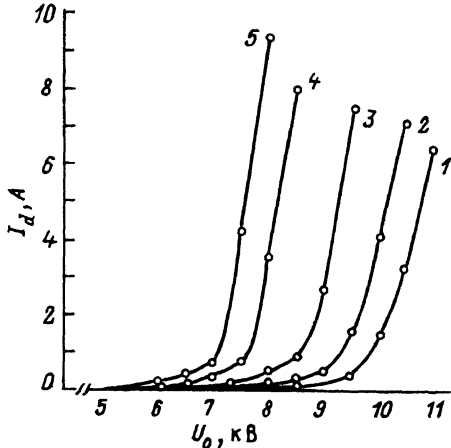


Рис. 3. Амплитудное значение импульса тока объемного разряда в промежутке с сетчатым анодом от величины начального напряжения.

$d = 0.5$ мм, $\mu = 0.8$, $C = 1500$ пФ, $f = 400$ Гц; He; 1 — 2.0, 2 — 2.3, 3 — 2.7; 4 — 3.0, 5 — 3.3 кПа.

Рис. 4. Времена задержки пробоя промежутка со сплошным анодом (1) и зажигания объемного разряда в промежутке с сетчатым анодом (2) в зависимости от величины начального напряжения.

Газ — гелий при 4 кПа, $C = 470$ пФ, $f = 400$ Гц, $d = 1$ (1) и 0.5 мм (2), $\mu = 0.8$ (2).

случае она ниже, чем U_{th} для промежутка со сплошным анодом. Заметим также, что зажигание разряда под действием УФ подсветки оказалось малочувствительным к давлению гелия, тогда как зависимость U_{th} от $(p \cdot d)$ для промежутка со сплошным анодом существенна.

На рис. 4 представлены значения задержки пробоя t_d для промежутка со сплошным анодом и зажигания разряда для промежутка с сетчатым анодом, полученные в режиме частых посылок импульсов. В этом режиме разброс значений t_d от среднего не превышал $\pm 5\%$. Использование полученных значений t_d в формуле Шаде [10] позволяет оценить показатель нарастания тока в предпробойной стадии $\gamma K - 1$, где γ — второй коэффициент Таунсенда, K — усиление тока в газе межэлектродного промежутка,

$$\gamma K - 1 = \frac{T}{t_d} \ln \left[1 + (\gamma K - 1) \frac{j(t_d)}{j_0} \right]. \quad (1)$$

Здесь T — постоянная времени обратной связи, $j(t_d)$ — регистрируемое в момент времени t_d значение плотности тока в промежутке, j_0 — начальная плотность тока. Для случая с сетчатым анодом принимаем T равным постоянной времени высвечивания УФ кванта $\sim 10^{-8}$ с, $j_0 = 10^{-7}$ А/м² [11,12], $j(t_d) = 300$ А/м². Тогда по данным рис. 2 и 4 для $U_0 = 2.8-7.2$ кВ получаем $(\gamma K - 1) = 0.1-0.6$. Используя рассчитанные в [13] для тех же U_0 и $(p \cdot d)$ значения γ , учитывающие бомбардировку катода ионами и быстрыми и возбужденными атомами гелия ($\gamma = 0.28$ и 0.88 при $U_0 = 2.8$ и 7.6 кВ соответственно), получаем $K = 4$ и 1.8 . Если же принять во внимание сильное влияние в нашем случае УФ подсветки, а также вклад в γ от размножения зарядов вследствие провисания потенциала в ячейки анодной сетки [6,7], то истинное значение

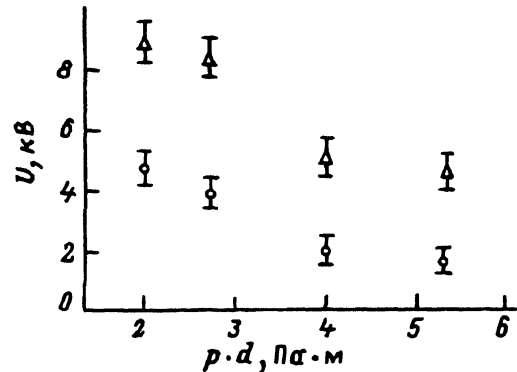


Рис. 5. Величина напряжения пробоя U_{th} и порогового напряжения срыва разряда в дуговой канал U_c в случае промежутка с малым отверстием в аноде.

Газ — гелий, $d = 1 \text{ мм}$, $C = 470 \text{ пФ}$, $f = 400 \text{ Гц}$; Δ — U_c , \circ — U_{th} .

K будет еще меньше. Очевидно, что при столь слабом усилении тока в межэлектродном промежутке большую (и даже основную) роль играют процессы на электродах и в заанодной области.

Описанные объемные формы разряда устойчиво реализуются лишь в определенном диапазоне значений начального напряжения U_0 : $U_{th} \leq U_0 \leq U_c$, показанном на рис. 2 и 5. При $U_0 > U_c$ быстро возрастает вероятность развития неустойчивости, переводящей объемный высоковольтный разряд в дугу и срывающей, естественно, генерацию пучка убегающих электронов. Длительность этого процесса 1–2 нс, что существенно короче времен, характерных даже для сильноточного объемного разряда, отличающегося короткой длительностью и высокой скоростью нарастания тока. Исследование условий появления неустойчивостей в промежутке с сетчатым анодом показали следующее.

1) Неустойчивость возникает вначале на спаде импульса тока разряда. С повышением напряжения U_0 задержка появления неустойчивости сокращается быстрее, чем задержка зажигания разряда t_d , и неустойчивость перемещается на максимум импульса тока объемного разряда, а затем на его передний фронт. С дальнейшим повышением напряжения формирование дугового канала происходит раньше зажигания объемного разряда. Если при этом, не снимая напряжения, быстро откатить газ из разрядной камеры, то при частоте посылок импульсов 100 Гц и выше импульсная дуга будет продолжать гореть и в отстаточном газе (при давлении 0.1–1 Па).

2) Величины U_c и тока, при которых возникает неустойчивость, уменьшаются с увеличением разрядной емкости. Эффект от увеличения емкости состоит в замедлении снижения напряжения на промежутке в процессе развития объемного разряда. В результате этого высокое напряжение дольше сохраняется на промежутке (увеличивается длительность экспозиции).

3) При замене анодной сетки другой с большими размерами ячеек значения U_c увеличиваются (при пониженных давлениях гелия на 2–3 кВ). Осциллограммы тока и напряжения показывают, что при переходе к крупноячейстой анодной сетке сокращается задержка зажигания объемного разряда и возрастает скорость его развития. В результате этого сокращается длительность экспозиции высокого напряжения на разрядном промежутке, что, согласно разделу 2, повышает U_c .

4) При работе с катодом, свободным от инородных включений (монокристалл германия, поверхность которого отполирована, а затем удалена посредством распыления в тренирующем разряде), ограничивающим напряжением фактором являются пробои на периферийных участках катодной поверхности, обычно закрытых диафрагмой. Неустойчивостей непосредственно в самом объемном разряде не наблюдается.

3. Обсуждение полученных результатов

Описанные в пунктах 1 и 4 эксперименты однозначно указывают на то, что неустойчивость типа срыва высоковольтного объемного разряда в дуговой канал инициируется взрывными процессами на катоде [11]. Далее, эксперименты, перечисленные в разделах 1–3, и данные, представленные на рис. 2 и 5, приводят к заключению, что формирование неустойчивости характеризуется определенным временем задержки относительно момента подачи напряжения на промежуток, которая зависит от величины напряжения и давления газа, но не зависит от амплитудно-временных параметров тока объемного разряда. Иными словами, объемный разряд в промежутке с сетчатым анодом никак не связан с процессами, запускающими неустойчивость. Обсудим этот вывод и вытекающие из него следствия.

1. Механизм развития неустойчивости, наблюдавшейся в настоящих экспериментах, известен [11,14]. Он заключается в лавинообразном нарастании автоэмиссионного тока под действием поля, им же генерируемого в газе объемного заряда ионов. Процесс заканчивается взрывом микро неоднородности на катоде с формированием катодного пятна и перемыканием области катодного падения потенциала дуговым каналом. Этот механизм запускается только тогда, когда среднее значение электрического поля на катоде превышает некоторое пороговое значение \bar{E}_{in} . Следуя [15], получаем для нашего случая (газ — гелий, катод — нержавеющая сталь; коэффициент размножения зарядов в газе $K < 10$) оценку $E_{in} = 2-3 \cdot 10^8$ В/м. Тогда соотношения [2]

$$j_{d,in} = (1 + \gamma) \cdot j_i, \quad j_i = 1.436 \frac{\epsilon_0 \cdot \Gamma U_0^{3/2}}{N^{1/2} \delta^{5/2}}, \quad \delta = 2U_0 / \bar{E}_{in}, \quad (2)$$

где j_d , j_i — плотности тока разряда и ионного тока на катоде; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; N — плотность газа; $\Gamma \simeq 10^{13}$ в гелии; δ — размер области катодного падения потенциала, определяют параметры разряда, пороговые для развития неустойчивости. Например, при давлении гелия 4 кПа и $U_0 = U_c$ (8 кВ на рис. 2 и 5 кВ на рис. 5) и принимая $\gamma = 1.5$ [13], получаем $j_{d,in} = 4 \cdot 10^6$ А/м² для разряда с УФ подсветкой и $j_{d,in} = 8 \cdot 10^6$ А/м² для сильноточного локального объемного разряда. В последнем j_d достигает $j_{d,in}$ уже при напряжении, лишь ненамного превышающем напряжение пробоя U_{th} . Но при этом, однако, еще не выполняется второе условие: длительность импульса тока должна быть достаточна для разогрева и взрыва микро неоднородности на катоде [11]. Это условие выполняется только при $U_0 = U_c \geq 2U_{th}$ (рис. 5), и тогда возникает катодное пятно. Что касается разряда, горящего со всей поверхности катода, то при $U_0 = U_c$ обычно $j_d = 0.03-0.1 \cdot j_{d,in}$, поэтому он ни в коем случае не может инициировать наблюдавшуюся неустойчивость.

Данная оценка приводит к заключению, что переход объемного разряда, протекающего со всей поверхности катода, в дуговой канал происходит в два этапа. Сначала возникает локальный объемный разряд, а затем в нем формируется неустойчивость. Локальный разряд представляет собой пробой промежутка с эмиссионного центра на катоде [11,16]. Из-за малых его поперечных размеров его ток становится заметным, только когда в промежутке уже образовался узкий канал сильно-ионизованной плазмы. Поэтому в настоящих экспериментах, где коэффициент усиления тока в межэлектродном промежутке мал ($K = 1-5$) задержка пробоя велика (рис. 4), а скорость нарастания тока при пробое очень высокая $\sim 5-10 \cdot 10^9$ А/с. В результате пробой промежутка локальным объемным разрядом и его переход в дуговой канал сливаются в один быстропротекающий процесс. Такой характер локального пробоя с эмиссионного центра делает его нечувствительным к параметрам тока объемного разряда с УФ подсветкой, и влияние последнего сводится лишь к тому, как быстро и насколько он снижает напряжение на промежутке по сравнению с начальным U_0 . Во всем остальном эти два процесса развиваются независимо друг от друга.

2. Данные, представленные на рис. 1 и 2, показывают, что зажигание разряда при сетчатом аноде происходит при напряжении, в 2-3 раза меньшем, чем напряжение пробоя промежутка с эмиссионного центра. Следовательно, объемный разряд является по сути несамостоятельным с инициацией и поддержкой УФ подсветкой из анодной области. Этим обстоятельством объясняется отсутствие факта пробоя на осциллограммах тока и напряжения при $U_0 = U_{th}$, отмеченное в разделе 2, а также плавный начальный ход кривых $I(U)$ на рис. 3, не имеющих видимого пересечения с осью абсцисс. Ток разряда монотонно растет по мере увеличения интенсивности УФ подсветки. Излом на кривых $I(U)$ на рис. 3 пока не имеет однозначного объяснения. Ясно, что он не связан с образованием плазмы в межэлектродном промежутке, поскольку ток в это время недостаточен для образования области катодного падения потенциала с размером, меньшим, чем длина межэлектродного промежутка. Более того, картина распыления катода при давлении гелия до 2.6-3 кПа [7] свидетельствует, что ионы возникают в ячейках анодной сетки и их объемный заряд в межэлектродном промежутке мал. По-видимому, причиной резкого изменения dI/dU (излома) является дополнительная УФ подсветка катода разрядом, возникающим в пучково-плазменном шнуре в дрейфовой области [17].

Заключение

Установлены механизмы зажигания и срыва в дуговой канал импульсного объемного разряда в узком межэлектродном промежутке в условиях сильного убегания электронов.

1. Убегание электронов существенно затрудняет пробой узкого межэлектродного промежутка. В результате усиление тока в нем составляет 1-2, что на порядок меньше усиления при пробое в минимуме кривой Пашена.

2. Зажигание и развитие объемного разряда со всей поверхности катода, эффективно генерирующего пучок убегающих электронов, иницируется и поддерживается УФ подсветкой из пучковой плазмы в анодной области. Его зажигание происходит при напряжении, в 2-3 раза меньшем, чем необходимо для самостоятельного пробоя промежутка, и в этом смысле разряд является несамостоятельным.

3. Срыв объемного разряда в дуговой канал при высоких напряжениях происходит вследствие самостоятельного пробоя промежутка и быстрого образования катодного пятна. Самостоятельный пробой осуществляется локальным (диаметром 0.3–1 мм) объемным разрядом с эмиссионного центра на катоде. При превышении напряжения некоторого граничного значения U_c в нем происходит взрыв эмиссионного центра и разряд за 1–2 нс переходит в дуговой режим.

4. Зажигание и развитие объемного разряда с УФ подсветкой определяют длительность экспозиции высокого напряжения на промежутке. В свою очередь самостоятельный пробой характеризуется задержкой относительно момента подачи импульса напряжения, которая зависит от величины последнего и давления газа. Протекание объемного разряда полностью зависит от соотношения этих времен.

5. Поскольку механизм зажигания и развития объемного разряда является по преимуществу фотоэлектронным, а пробой промежутка определяется исключительно ионизацией газа (подавленной из-за убегающих электронов), то эти два явления развиваются практически независимо друг от друга. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, так как открывает принципиальную возможность воздействия на процессы, лежащие в основе того и другого явления по отдельности: усилить одни и подавить другие. Это позволит повысить энергию электронов в пучке и ток пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 94-02-03154).

Список литературы

- [1] Бозан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823–1831.
- [2] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–649.
- [3] Бозан П.А. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 9. С. 1837–1847.
- [4] Колбычев Г.В., Самышкин Е.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2032–2037.
- [5] Бозан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88–95.
- [6] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 18. С. 1106–1110.
- [7] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 104–111.
- [8] Бозан П.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 61–68.
- [9] Колбычев Г.В. Канд. дис. Томск, 1983. 141 с.
- [10] Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. Л.: ГИТТЛ, 1950. 672 с.
- [11] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 256 с.
- [12] Слишков Ю.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [13] Ульянов К.Н., Чулков В.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 2. С. 328–334.
- [14] Boyle W.S., Haworth F.E. // Phys. Rev. 1956. Vol. 101. N 3. P. 935–938.
- [15] Королев Ю.Д., Месяц Г.А., Пономарев В.В. // ЖПМТФ. 1979. № 6. С. 25–29.
- [16] Boyle W.S., Kisliuk P. // Phys. Rev. 1955. Vol. 97. N 2. P. 255–259.
- [17] Колбычев Г.В., Колбычева П.Д., Забудский О.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 3. С. 247–252.