

04

© 1991 г.

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА  
В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ИОНИЗАЦИИ

А. С. Головин, В. А. Гурашвили, И. В. Кочетов

Исследовалась устойчивость несамостоятельного разряда в условиях неоднородной ионизации газа высокоэнергетичными электронами. Эксперименты показали, что если при больших токах электронного пучка ( $\sim 1-2$  мА/см<sup>2</sup>) предельные характеристики разряда существенным образом зависят от электрического поля вблизи катода и неоднородность ионизации в межэлектродном зазоре в связи с этим заметно влияет на удельный критический энерговыклад, то при малых токах электронного пучка ( $\sim 10-50$  мкА/см<sup>2</sup>) такого влияния не обнаружено. Тем не менее и в этом случае отчетливо наблюдается зависимость предельного энерговыклада от величины зазора, причиной которой, по-видимому, является обнаруженная непропорциональная неоднородность горения разряда, инициированная прикатодным процессом. При одинаковых начальных условиях в малом зазоре такая неоднородность развивается быстрее.

Неоднородность ионизации газа высокоэнергетичными электронами, как показывают расчеты [1], приводит к неравномерному распределению электрического поля в разряде. Вблизи одного из электродов в результате образуется область с повышенным энерговыделением. Вопрос о том, в какой мере перераспределение поля в разряде сказывается на его устойчивости, возникает в связи с созданием мощных электроионизационных лазеров, неоднородность ионизации в которых достаточно высока. Параллельно встает вопрос и о влиянии межэлектродного зазора на предельные характеристики разряда, поскольку неоднородность ионизации газа в разрядном промежутке прямо зависит от его величины.

В [2] в рамках модели идеально проводящего канала определено время развития неустойчивости при внешней ионизации, линейно нарастающей от катода к аноду. Получено аналитическое выражение для скорости распространения канала, из которого видно, что время устойчивого горения разряда  $\tau_{\text{н}}$  зависит от начального значения  $E/N$  на катоде. Численных расчетов  $\tau_{\text{н}}$  для конкретных условий в [2] не проводилось, и о степени влияния неоднородности ионизации на время формирования канала по результатам данной работы сказать что-либо трудно. Известно только, что основную часть этого времени длина канала сопоставима с размером начальной неоднородности, которая задавалась в виде полусферы на поверхности катода, и только перед самым пробоем она резко увеличивается. Время интенсивного роста канала, как правило, значительно меньше  $\tau_{\text{н}}$ , но оно, как отмечают авторы, существенно зависит от всевозможных макроскопических неоднородностей, в частности от неоднородности ионизации в разрядном промежутке.

По наиболее полной модели разряда формирование токового канала при неоднородной ионизации исследовалось в [3]. Приведены результаты расчета для азота атмосферного давления при среднем  $E/N = 2.75 \cdot 10^{-18}$  В·см<sup>2</sup>. Варьировались как амплитуда неоднородности, так и ее размер. Расчеты показали, что время формирования токового канала слабо зависит от этих параметров. В то же время наличие полусферического выступа на катоде заметно сокращает  $\tau_{\text{н}}$ , что объясняется значительным усилением поля на острие.

Проблема устойчивости разряда при неоднородной ионизации исследовалась также в [4]. Правда, изучение этого вопроса не являлось целью работы и полномасштабных исследований его в [4] не проводилось. В указанной работе объяснялась зависимость времени устойчивого горения разряда от величины межэлектродного зазора, обнаруженная в [5]. Авторы исходили из предположения, что устойчивость всего разряда определялась условиями у катода, где электрическое поле было выше, т. е. по сути дела исследовалась устойчивость прикатодной области разряда.

Надо заметить, что во всех этих работах исследования проводились в сравнительно узкой области электрических параметров, отличающейся большими токами электронного пучка и высоким  $E/N$ . Однако, как показывают эксперименты, в разных областях этих параметров несамостоятельный разряд имеет свои отличительные особенности и механизмы возникновения контракции, по-видимому, также будут неодинаковы. Это относится и к контракции разряда в условиях неоднородной ионизации.

Установка, на которой проводились эксперименты, подробно описана в [5]. Ускоряющее напряжение электронной пушки составляло 130 кВ. Плотность тока ускоренного пучка изменялась в пределах  $10 \text{ мкА/см}^2$ — $3 \text{ мА/см}^2$ . Выход электронов в газоразрядную камеру (ГРК) осуществлялся через алюминиевое окно сечением  $15.15 \text{ см}$ . Толщина фольги составляла  $30 \text{ мкм}$ . Анод ГРК был изготовлен из алюминия в форме диска и состоял из двух изолированных секций:

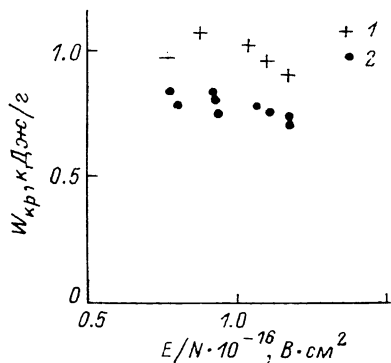


Рис. 1. Зависимость удельного критического энергозклада от  $E/N$  при разных полярностях напряжения на потенциальном электроде.

1 — положительная полярность, 2 — отрицательная полярность,  $j_{д} = 2 \text{ мА/см}^2$ ,  $h = 4 \text{ см}$ .

центральной и периферийной. Такая конструкция анода выравнивала электрическое поле в его центральной части и тем самым улучшала однородность горения разряда в этой зоне. Катод был выполнен в виде алюминиевой решетки с отверстиями диаметром 5 мм и шагом между ними 6 мм.

Характеристики разряда регистрировались на центральной секции анода. Ток в этой секции измерялся с помощью шунта, сигнал с которого через усилитель с гальванической развязкой подавался на осциллограф. ГРК питалась от батареи конденсаторов емкостью  $150 \text{ мкФ}$ . Для ограничения разрядного тока при срыве в дугу последовательно с накопительной емкостью устанавливалось балластное сопротивление. Предельные энергетические характеристики разряда снимались для двух межэлектродных зазоров 2.5 и 4 см. Эксперименты проводились на чистом азоте с содержанием воды не более  $10 \text{ ppm}$  и кислорода —  $0.01$ — $0.03 \%$  при давлении  $40 \text{ кПа}$ .

Сравнение устойчивости разряда в разных условиях эксперимента лучше всего проводить по величине удельного критического энергозклада. Время развития контракции не всегда является адекватным показателем устойчивости. Кроме того, в отличие от предельного энергозклада, оно более резко зависит от электрических параметров разряда и особенно от  $E/N$ , поэтому любая неточность, допущенная при установке этих параметров, может привести к таким погрешностям, которые недопустимы при проведении сравнительных экспериментов.

В отличие от [4] в нашей работе исследования проводились при малых значениях  $E/N$  ( $\leq 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ В·см}^2$ ). Плотность тока электронного пучка не превышала  $2 \text{ мА/см}^2$ . Неоднородность ионизации в области разряда изменялась путем изменения величины зазора, а также в результате переплюсовки напряжения на электродах. Чтобы разное качество поверхности электродов при переплюсовке не отразилось на результатах эксперимента, двухсекционный анод заменялся на электрод из решетки с такой же изолированной внутренней

секцией. Изменение полярности напряжения на этом электроде, как показывают эксперименты, приводит к существенному изменению предельного энерговклада в разряде (рис. 1). При одном среднем  $E/N$  неустойчивость возникает раньше, если поле вблизи катода выше. Переполсовка в данном случае произошла на зазоре шириной 4 см и напряженность электрического поля вблизи катода при этом возрастала на 25 %. Изменение величины зазора не так сильно влияет на устойчивость разряда, поскольку поле у катода в этом случае изменяется слабее.

Надо отметить одну отличительную особенность развития неустойчивости в наших условиях. В [4] исследования проводились в области больших  $E/N$  ( $1-3 \cdot 10^{-16}$  В·см<sup>2</sup>), где, как известно, наблюдается резкая зависимость удельного критического энерговклада от напряженности поля в разряде. Согласно результатам этой работы, устойчивость разряда определяется электрическим полем  $E_k$  вблизи катода и указанная зависимость отражает по сути дела зависимость  $W_{кр}$  от  $E_k$ . Любое изменение  $E_k$  при сохранении среднего поля в разряде вызовет соответствующее изменение и в  $W_{кр}$ , что и наблюдалось в [4] при из-

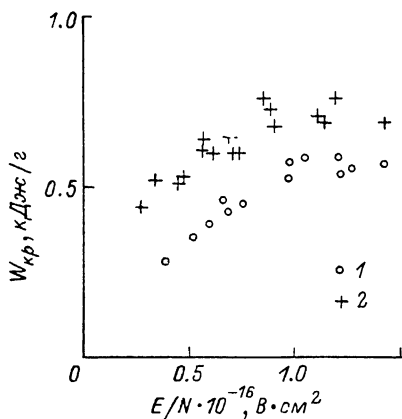


Рис. 2. Зависимость удельного критического энерговклада от  $E/N$  для разных зазоров.

1 —  $h=2.5$ , 2 — 4 см;  $j_{д}=15$  мкА/см<sup>2</sup>.

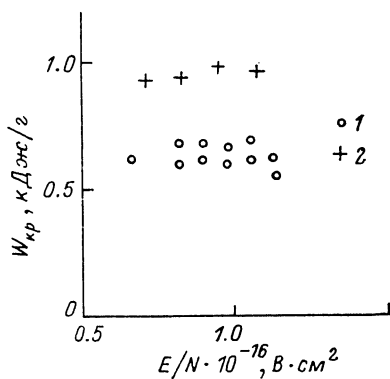


Рис. 3. Зависимость удельного критического энерговклада от  $E/N$  в условиях однородной ионизации.

1 —  $h=2.5$ , 2 — 4 см.

менении величины зазора. В наших экспериментах зависимость  $W_{кр}$  от электрического поля выражена слабо, поэтому и влияние зазора на предельные характеристики разряда невелико.

Следует указать и на другую причину, в какой-то мере влияющую на эту зависимость. Фотографирование разряда фоторегистратором с показровой разверткой показывает, что на катоде в какой-то момент времени возникает один или несколько каналов, довольно быстро прорастающих в направлении анода. Из этой группы каналов, как правило, выделяется один, по скорости своего развития заметно опережающий все остальные. Время распространения каналов между электродами составляет не более 20 % от полного времени горения разряда. Исследование таких каналов при их искусственном инициировании на катоде показывает, что при одинаковых начальных условиях время движения канала от катода до противоположного электрода коррелирует с длиной зазора. Чем зазор меньше, тем неустойчивость в нем развивается быстрее. Таким образом, время устойчивого горения разряда в присутствии каналов в малом зазоре всегда будет короче.

Устойчивость горения разряда при малых токах электронного пучка ( $10-50$  мкА/см<sup>2</sup>) исследовалась в условиях, аналогичных [6]. Как известно из литературы [7], в результате образования катодных пятен происходит возмущение потенциала вблизи катода и возникает область с заведомо неоднородным полем. Неоднородность поля проникает в объем разряда на глубину, соизмеримую с периодом расположения пятен на катоде. Распределение потенциала в зазоре, снятое с помощью зонда, показывает, что прикатодная область возмущенного поля

в наших условиях нередко достигает 1.5 см, поэтому при проведении измерений, так же как и в [6], на расстоянии 1.5—2 см от катода ставился зонд и все предельные характеристики разряда снимались для промежутка зонд—анод, где электрическое поле практически однородно.

В работе [5] для смеси  $\text{CO} : \text{N}_2 = 1 : 9$  приведены зависимости удельного критического энергозклада от  $E/N$  при малых токах электронного пучка. Повторение этих экспериментов в  $\text{N}_2$  в условиях, когда электрическое поле в разряде определялось с помощью зонда, приводит к более гладкой зависимости  $W_{\text{кр}}(E/N)$  со слабо выраженным экстремумом (рис. 2). На том же рисунке отражено и влияние зазора на  $W_{\text{кр}}$ , которое, как это видно, достаточно велико. Даже если предположить, что именно  $E_{\text{к}}$  определяет устойчивость разряда, то при столь слабой зависимости  $W_{\text{кр}}(E/N)$  невозможно объяснить полученные результаты. Начальное поле вблизи катода, так же как и среднее поле в зазоре, слабо влияет на удельный критический энергозклад. Этот вывод подтверждается и тем, что переполюсовка напряжения на электродах, значительно изменяющая  $E_{\text{к}}$ , на предельных характеристиках разряда не сказывается. Средняя напряженность поля в зазоре при переполюсовке составляла  $1 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ . При таком значении поля, как это видно из рис. 2, любые его изменения слабо отражаются на предельном энергозкладе.

Следует остановиться на одной особенности несамостоятельного разряда,

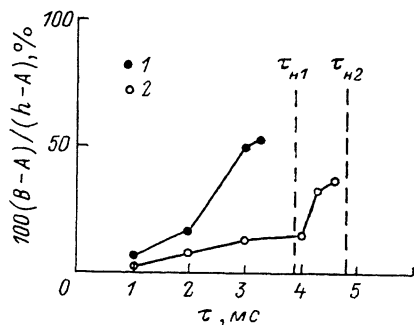


Рис. 4. Относительный размер возмущений однородной области разряда в зависимости от времени для разных зазоров.

1 —  $h=2.5$ , 2 — 4 см;  $\tau_{н1}$  — время развития неустойчивости в зазоре 2.5 см,  $\tau_{н2}$  — в зазоре 4 см,  $B$  — размер наибольшего возмущения,  $A$  — ширина прикатодной области разряда,  $h$  — высота зазора.

обнаруженной при переполюсовке напряжения на сплошном электроде с плюса на минус. Когда катодом является верхний электрод ГРК, выполненный в виде решетки с прозрачностью 60 %, нормальный режим горения разряда реализуется сравнительно быстро. На фотографиях катодные пятна наблюдаются уже спустя 0.5 мс от начала разряда. Полное же время горения разряда в наших условиях составляет несколько мс. Образование катодных пятен в данном случае облегчается еще и тем, что нижняя сторона решетки скрыта от пучка и ток томпсоновского разряда привязывается в основном к кромкам ее отверстий. В случае сплошного катода нормальный режим горения за время импульса либо вообще не реализуется, либо реализуется с некоторой задержкой. При этом, как правило, в центральной части катода образуется яркое пятно, а на осциллограмме наблюдается линейный рост тока разряда.

Для облегчения работы катода при переполюсовке он изготавливался из отдельных медных штырей, равномерно расположенных на керамической пластине и заделанных заподлицо с ее поверхностью. Общая площадь штырей занимала 30 % от поверхности пластины. Такой катод обеспечивал в промежутке ток разряда, аналогичный тому, который мы наблюдали до переполюсовки. Время развития неустойчивости при этом сохранялось. Ширина зазора в данном случае составляла 2.5 см. Начальное электрическое поле вблизи катода, как показывают расчеты, в результате переполюсовки изменялось на 15 %.

Таким образом, влияние зазора на предельные энергетические характеристики разряда при малых токах электронного пучка нельзя объяснить неоднородностью ионизации. В подтверждение этого для разных зазоров проводились исследования устойчивости разряда в условиях однородной ионизации. Разряд поджигался в специальном канале, ограниченном температуростойкой пленкой толщиной 50 мкм. Сечение канала составляло  $0.8 \cdot 2.0 \text{ см}^2$ . С обоих торцов в канал вводились электроды. Расстояние между электродами могло свободно регулироваться. Канал располагался горизонтально и своей широкой гранью был обращен к пучку. Разряд питался от батареи конденсаторов, оба полюса кото-

рой изолировались от земли. Измерения показали, что и в случае однородной попизации зависимость удельного критического энерговклада от зазора сохраняется (рис. 3).

Для выявления причины такой зависимости проводилось фотографирование разряда при разных зазорах. На фотографиях видно, что из образовавшихся катодных пятен сравнительно быстро прорастают каналы с диффузно размытой головкой и у катода формируется область с ярким свечением и достаточно ровной границей, отделяющей ее от основной части разряда. Со временем ширина этой области увеличивается, но ее граница долгое время остается невозмущенной. Наконец, в определенный момент времени граница искривляется и наблюдается опережающий рост отдельных ее участков, поперечный размер которых составляет 2—3 см. По мере горения разряда амплитуда возмущений нарастает. Время их появления и скорость развития в значительной степени зависят от высоты зазора. Нет никаких сомнений, что эти возмущения ускоряют развитие неустойчивости, поскольку дуга всегда возникает в месте их наиболь-

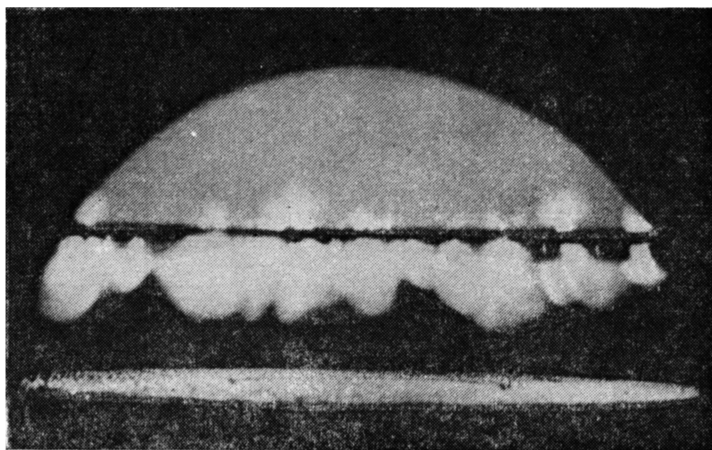


Рис. 5. Неоднородное горение разряда в зазоре 2.5 см.

шей амплитуды. Определяющую роль здесь, по-видимому, играет относительный размер возмущений. Зависимости его величины от времени горения разряда для зазоров 2.5 и 4 см представлены на рис. 4. На рис. 5 приведена фотография, иллюстрирующая неоднородное горение разряда в зазоре 2.5 см. Фотографирование проводилось по методу оборванного импульса. С увеличением зазора влияние широкомасштабных возмущений на устойчивость разряда должно быть менее заметным. Действительно, как это видно из результатов работы [5], зависимость  $\tau_{н}$  от зазора при достаточно больших его величинах начинает вылаживаться.

Фотографирование разряда также показывает, что плотность расположения пятен на катоде в разных зазорах неодинакова. В зазоре 4 см, например, пятен на равной площади наблюдалось в 1.5 раз больше, чем в зазоре 2.5 см. Кроме того, надо отметить, что пятна на катоде располагаются нерегулярно. Наблюдаются такие участки, где плотность их выше средней, и такие, где она ниже средней. Особенно наглядно это проявляется в малом зазоре. Вполне вероятно, что нерегулярная структура расположения пятен на катоде инициирует развитие широкомасштабных возмущений.

Надо сказать, что совершенно одинаковых условий горения разряда в зазорах 2.5 и 4 см реализовать не удастся. Увеличение области неоднородного поля вблизи катода в зазоре 2.5 см происходит медленнее, чем в зазоре 4 см, однако влияние этой области на распределение потенциала в разряде в малом зазоре существенно больше, в результате электрическое поле в области однородного горения разряда в зазоре 4 см за время импульса увеличивается слабее нежели в зазоре 2.5 см. Это видно и по току разряда. Если в зазоре 4 см ток со временем практически не изменяется, то в зазоре 2.5 см наблюдается характер-

ный рост тока. Сравнение предельных характеристик разряда для разных зазоров проводилось при одном среднем поле. Слабое изменение поля в течение импульса, как уже обсуждалось выше, на предельном энерговкладе не отражается.

В заключение авторы выражают благодарность А. П. Нинарговичу за полезные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] Былков Ю. И., Королев Ю. Д., Месяц Г. А. и др. Инжекционная газовая электроника. Новосибирск: Наука, 1982. 239 с.
- [2] Ульянов К. Н., Чулков В. В. // ТВТ. 1983. Т. 21. № 1. С. 30—37.
- [3] Лобанов А. Н., Степанов В. В., Ульянов К. Н. // ТВТ. 1985. Т. 24. № 3. С. 463—467.
- [4] Лобойко А. И., Непартович А. П., Наумов В. Г. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 968—971.
- [5] Головин А. С., Гурашвили В. А., Кочетов И. В. и др. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 852—856.
- [6] Бердышев А. В., Головин А. С., Гурашвили В. А. и др. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 3. С. 335—341.
- [7] Печав А. А., Орлов Ю. В., Персианцев И. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 2. С. 80—85.

Поступило в Редакцию  
19 марта 1990 г.