

04;07;12

Еще раз к вопросу о стабилизации протяженного тлеющего разряда в поперечном потоке газа

© И.А. Иванченко

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 27 мая 1998 г. В окончательной редакции 9 апреля 1999 г.)

Экспериментальным путем исследуется неустойчивость разряда в поперечном потоке газа. Показано влияние характеристик источника на эффект его устойчивости.

Введение

Тлеющий разряд в поперечном потоке газа применяется в CO_2 лазерах. На его основе с использованием относительно простых электродных устройств и умеренных скоростей потока газа (до 60–70 м/с) реализуются высокие мощности генерации — около 5 кВт с метра длины электродов [1].

Есть существенный прогресс в технологии газовых разрядов, тем не менее механизмы явления неустойчивости (явления перехода разряда из диффузной формы в контрагированную) еще полностью не раскрыты. Выводы из современных теоретических моделей о неустойчивости не находятся в согласии с закономерностями явлений, наблюдаемых в экспериментах. Так, из теоретических работ, как правило, следует, что увеличение скорости газа v должно приводить к увеличению предельного удельного энергозатрата W^* (величине энергии, при которой наступает переход разряда из диффузной формы в контрагированную). Но в экспериментах с ростом v сначала наблюдается увеличение W^* , затем наступает эффект насыщения и далее снижение (см., например, [2]).

Ответ на традиционный вопрос о влиянии характеристик цепи питания на устойчивость разряда [3,4] применительно к разрядам в потоке газа с научной точки зрения еще не найден. Теоретические работы на эту тему основаны на результатах исследований статических вольт-амперных характеристик разряда и его частей. Динамические характеристики в расчет не принимаются, так как почти не имеется экспериментальных работ.

В работе представлены результаты исследований статических и динамических вольт-амперных характеристик и устойчивости протяженного тлеющего разряда в поперечном потоке газа.

Описание экспериментальной установки

В качестве экспериментальных установок использовались 11 лазеров типа "ЛОК" ("Плутон") [5]. Электроразрядные устройства лазеров не были идентичными, отличались своими конструктивными характеристиками, такими как расположение катода относительно стенок канала, конструктивные соединения электродов с элементами устройства, характеристики потока, характери-

стики источника и цепи питания разряда. Поэтому вероятности контракции разряда в установках были существенно различны, частоты перехода в контрагированную форму отличались в 10–100 раз.

Один из вариантов электроразрядного устройства представлен на рис. 1. На нем показано поперечное сечение и один из вариантов схемы питания разряда. Стрелка указывает направление потока газа лазерной смеси газов. Протяженный трубчатый катод 1 и плоский анод 2 вытянуты в направлении, поперечном потоку газа. Протяженность электродов составляет величину 0.86–1.1 м. Электроды через балластный резистор или непосредственно подсоединены к источнику питания на

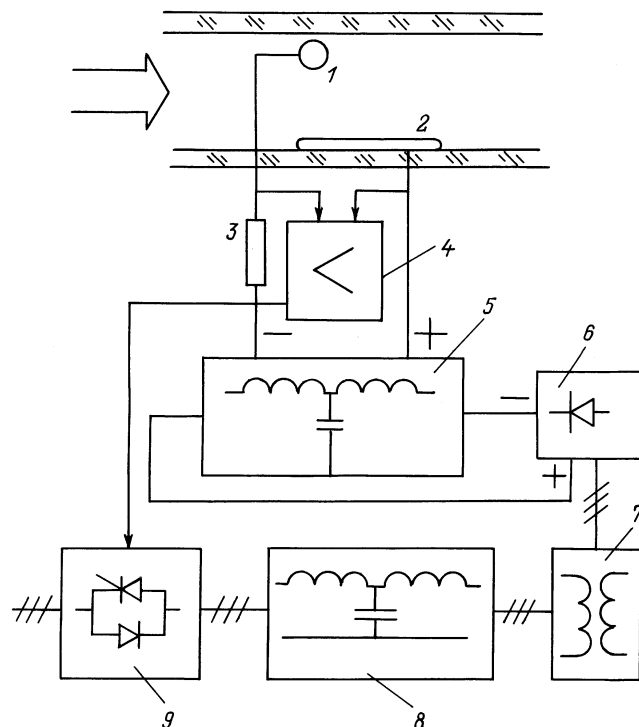


Рис. 1. Схема электроразрядного устройства на базе индуктивно-емкостного преобразователя: 1 — катод, 2 — анод, 3 — резистор, 4 — устройство обратной связи по току, 5 — фильтр, 6 — выпрямитель, 7 — трансформатор, 8 — индуктивно-емкостной преобразователь, 9 — тиристорный регулятор напряжения для управления током разряда.

базе индуктивно-емкостного преобразователя. В источнике используются жесткая параметрическая связь и отрицательная обратная связь по току. Путем применения отрицательной обратной связи компенсируются колебания напряжения сети и медленные изменения тока нагрузки. Другие варианты электроразрядного устройства отличались источниками питания, применялись источники питания с нежесткой внешней характеристикой с отрицательной обратной связью по току. Во всех случаях использовались низкие частоты для преобразования переменного тока в постоянный. Характерные параметры разряда были следующие: $v_0 = 30 \div 60$ м/с — скорость потока газа на переднем фронте газоразрядного канала; $U = 1300-2000$ В — напряжение на разрядном промежутке, $I = 10-20$ А — ток разряда.

Электрооптические характеристики разряда

Электрические и оптические характеристики поперечных разрядов подробно представлены в работах [6–9]. Фундаментальным свойством таких разрядов является то, что значительную часть их объема занимает фарадеево пространство. Оно проявляется как в смеси газов, так и в его компонентах. С точки зрения процессов рождения и гибели заряженных частиц это свойство можно сформулировать так: в значительной части объема разряд является локально несамостоятельным, плазма образуется за счет амбиполярного дрейфа заряженных частиц из приэлектродных областей [10,11].

О неустойчивости

Переход разряда из диффузной формы в контрагированную неизбежно возникает, если его параметры превышают некоторые предельные значения. Эта ситуация в данной работе не рассматривается. Существует много конструктивных и технологических аспектов, при которых возникает этот переход. Кроме того, он возможен при значениях параметров ниже предельных, именно эта ситуация и рассматривается в настоящей работе. Если разряд переходит в контрагированную форму с частотой $\leq 1h^{-1}$, то его будем считать неустойчивым.

Переход разряда в контрагированную форму регистрировался по изменению тока и напряжения на электродах.

Эксперименты показали, что причины контракции могут быть связаны как с анодом, так и с катодом. Иногда возникали ситуации, когда наблюдалось существование двух разрядов: контрагированного и неконтрагированного протяженного диффузного. В любом случае характерные размеры канала, в котором развивалась контракция, не превышали величины около 1 см. Это составляет величину около 1% от протяженности всего газоразрядного канала. Поэтому его внешнюю электрическую цепь можно рассматривать как эквивалентное сопротивление, состоящее из двух параллельных цепей: цепи разряда и цепи его питания [12].

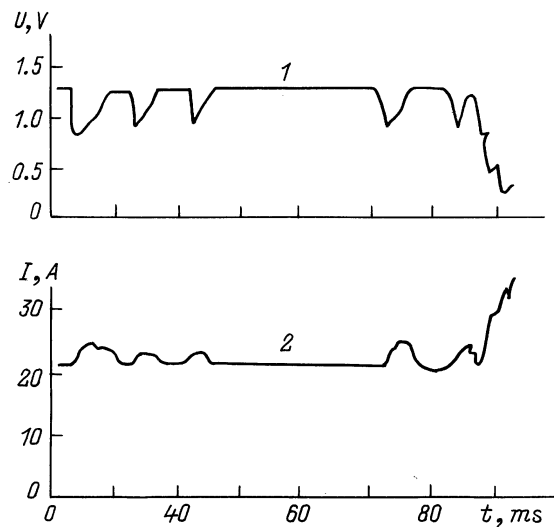


Рис. 2. Процесс развития контракции: 1, 2 — пульсации напряжения и тока разряда соответственно.

Экспериментальные исследования разрядов с одной и той же конфигурацией на различных лазерах показали, что для одних и тех же номинальных режимов работы лазеров вероятности перехода разряда из диффузной формы в контрагированную могут отличаться на два порядка. Не обнаружено никаких причин, приводящих к

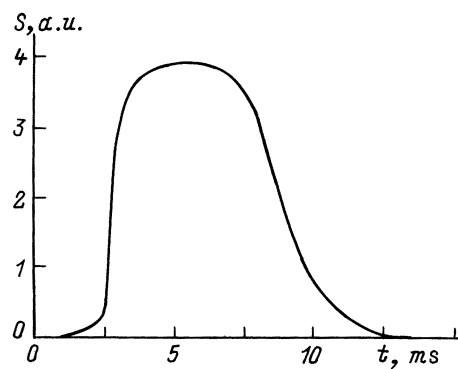


Рис. 3. Процесс развития контракции. Пульсации эмиссионной яркости.

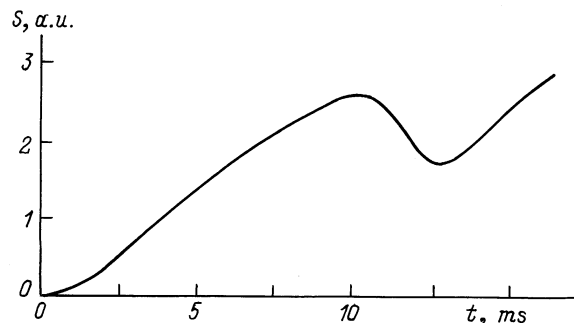


Рис. 4. То же, что и на рис. 3.

контракции разряда, кроме тех, что связаны с явлениями накопления адсорбированных веществ на электродах и свойствами электрических цепей разряда. От эффектов, связанных с накоплением адсорбированных веществ на электродах специальными технологическими приемами, в частности путем тренировки электродов, всегда удавалось отстраиваться на время около 10 h и более.

О временных процессах развития контракции тлеющего разряда можно судить по пульсациям тока и напряжения (рис. 2) или по пульсациям эмиссионной яркости разряда (рис. 3 и 4). Напряжение измерялось непосредственно на электродах, ток — в цепи питания разряда. Пульсации эмиссионной яркости снимались с помощью фотоэлементов, направленных на элемент объема, где предполагалось возникновение контракции. Появляются, как правило, "предвестники контракции" — серия импульсов длительностью от 1 до 10 ms. Процесс может прерваться на любой стадии или затянуться и закончиться переходом диффузного разряда в контрагированный.

Вольт-амперные характеристики разряда

Статические вольт-амперные характеристики разряда, т. е. зависимости $U(I)$, снимались при условии, что скорость изменения I составляет величину $\partial I/\partial T \leq 2 \text{ A/s}$. Применительно к условиям экспериментов это означает, что за одну секунду величина тока меняется приблизительно не более чем на 20%. Представленные динамические характеристики $U(I)$ соответствуют условию, когда скорость изменения тока равна $\partial I/\partial T > 100 \text{ A/s}$.

Типичные статическая и динамическая характеристики разряда $U(I)$ представлены на рис. 5. Динамические $U(I)$ характеристики находились путем сопоставления осциллограмм пульсаций I и U . Пульсации I величиной до 50% длительностью приблизительно 10^{-2} s создавались с помощью источника пульсирующего напряжения в цепи питания разряда. В условиях экспериментов дифференциальное статическое сопротивление разряда имело величину, равную $-5 \Omega \leq (\partial U/\partial I)_{\text{ст}} \leq 15 \Omega$. В отличие от статического динамическое дифференциальное сопротивление имело положительное значение $(\partial U/\partial I)_{\text{дин}} = 15 \div 80 \Omega$.

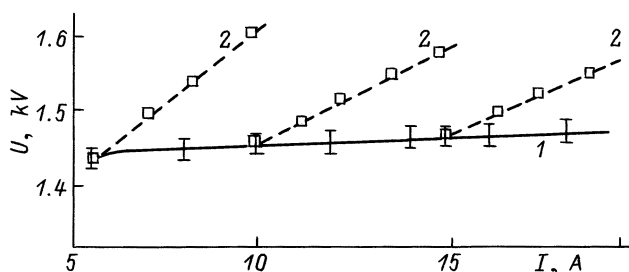


Рис. 5. Статические 1 и динамические 2 характеристики разряда $U(I)$.

Влияние характеристик цепи и источника на эффект устойчивости разряда

Практически трудно проводить эксперименты при малых частотах перехода разряда в контрагированную форму, когда частота перехода составляет один час и менее. Поэтому создавались условия, при которых частота перехода разряда в контрагированную форму была большой и составляла величину от $0.3-0.1 \text{ min}^{-1}$. При малой вероятности контракции разряда проводилась контрольная проверка.

Получение длительного (десять часов без перехода в контрагированную форму) разряда было возможным при условии, что характеристики его цепи питания определяются активными и индуктивными элементами. В тех установках, где электроды присоединялись непосредственно к индуктивно-емкостному фильтру (т. е. не через балластный резистор), разряд был ненадежным. В частности, подключение к электродам $L-C$ -контура с величиной емкости около $10 \mu F$ вносило резкие дестабилизирующие эффекты — вероятность контракции разряда возрастала в 10–100 раз. В принципе этого и следовало бы ожидать из анализа $U(I)$ характеристик. Однако неожиданным является тот факт, что в этом случае оказывалось иногда возможным существование относительно длительного (продолжительностью около 1 h) разряда.

На одну и ту же нагрузку поочередно включались два источника: а) источник на базе индуктивно-емкостного преобразователя с жесткой обратной связью по току с частотой преобразования переменного тока в постоянный 50 Hz; б) источник с отрицательной обратной связью по току с частотой преобразования переменного тока в постоянный 50 Hz, выходное сопротивление источника 12Ω . В экспериментах не удалось обнаружить различия в частотах перехода разряда в контрагированную форму.

Источник с отрицательной обратной связью по току с выходным сопротивлением около 12Ω подключался к электродам через резистор величиной 30Ω или непосредственно. Не замечено влияния резистора на частоту перехода разряда в контрагированную форму.

В цепь питания разряда вводилась индуктивность величиной от 0 до 1 H. Не замечено влияния индуктивности на частоту перехода разряда в контрагированную форму.

Изучалось влияние пульсаций тока на частоту контракций разряда. Пульсации тока либо специально вводились путем применения источника пульсирующего напряжения, либо создавались путем применения специальных схем выпрямления тока. В экспериментах частота пульсаций менялась в пределах 50–300 Hz, амплитуда пульсаций составляла величину 1–50%. Влияния пульсаций на частоту перехода разряда в контрагированную форму не замечено.

В отлаженных электроразрядных устройствах зафиксирована длительность работы разряда без перехода в контрагированную форму 70 h. Это ограничение было связано с прекращением исследований.

Заключение

Из полученных результатов следует: а) с точки зрения устойчивости разряд не может рассматриваться как автономный, т. е. устойчивость является совокупным свойством разряда и цепи его питания, включая источник питания; б) устойчивость разряда должна рассматриваться с учетом его статических и динамических характеристик $U(I)$.

Показано, что стабильный разряд может быть реализован путем применения источников тока с нежесткой внешней $U(I)$ характеристикой, причем с медленной обратной связью по току, т. е. при низких частотах (50 Hz) преобразования переменного тока в постоянный.

Работа выполнена с использованием средств гранта РФФИ № 98-02-17936.

Список литературы

- [1] Волков В.Л., Денисенко А.А., Закревский С.И. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 6. № 2. С. 2234–2236.
- [2] Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шепеленко А.А. // Применение лазеров в народном хозяйстве. М.: Наука, 1986. С. 53–62.
- [3] Jernndo C.E., Rowe C.Y., Swift-Hook D.J. // J. Phys. D. 1975. Vol. 8. N 14. L179–L182.
- [4] Eteleus K.G. // Intern. J. Electronics. 1977. Vol. 142. N 2. P. 105–110.
- [5] Голов В.К., Иванченко А.И., Крашенинников В.В. и др. // Изв. СО АН СССР. 1986. Сер. техн. Т. 10. Вып. 2. С. 87–91.
- [6] Воронцов С.С., Иванченко А.И., Крашенинников В.В. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 1. С. 2287–2292.
- [7] Иванченко А.И., Шепеленко А.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 1. С. 2043–2050.
- [8] Купренок В.И., Климентьев С.И., Марусяк Н.В. и др. // Опт.-мех. пром-сть. 1984. № 2. С. 8–10.
- [9] Bergman J., Ose E., Triebel W. // Experimentell Technik der Physik. 1986. Bd 34. N 1. S. 17–25.
- [10] Акишев Ю.С., Высикайло Ф.Н., Пономаренко В.В. // ТВТ. 1980. Т. 18. № 2. С. 266–272.
- [11] Велихов Е.П., Пашкин С.В. // УФН. 1982. Т. 137. № 1. С. 117–146.
- [12] Иванченко А.И., Солоухин Р.И. и др. // Газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1977. С. 112–134.