

04;10

Гистерезис вольт-амперной характеристики непрерывного электроионизационного разряда в потоке азота

© А.П. Аверин

Владимирский государственный университет
E-mail: laser@vpti.vladimir.ru

Поступило в Редакцию 11 июля 2005 г.
В окончательной редакции 2 сентября 2005 г.

Экспериментально показано наличие гистерезиса вольт-амперной характеристики непрерывного разряда, контролируемого электронным пучком, в потоке азота. Высказано предположение о том, что при переходе горения разряда из режима ионизационной камеры в электроионизационный происходит переход от ламинарного пограничного слоя на поверхности катода к турбулентному.

PACS: 52.80.Dy

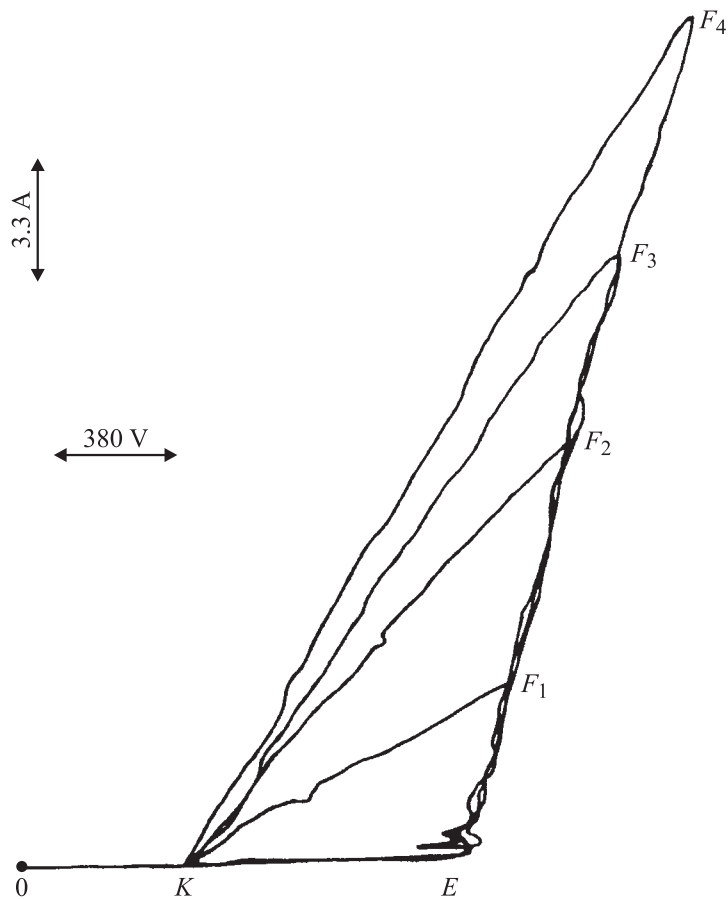
Как известно, в тлеющем самостоятельном разряде, зажигаемом в отпаянных системах, гистерезис наблюдается только в разряде переменного тока ($\nu \approx 10^2$ Hz) [1]. Вольт-амперная характеристика, снимаемая при постоянной полярности электродов, лишена гистерезисных явлений. Электроионизационный разряд (иначе — разряд, контролируемый электронным пучком), так же как и тлеющий самостоятельный, носит объемный характер, в его катодном слое также происходит ударная ионизация. Однако из-за большой мощности внешнего ионизатора (электронного пучка), благодаря чему и возможен электроионизационный разряд, непрерывный режим осуществляется только при прокачке газа между электродами разрядной камеры. В противном случае из-за развития ионизационно-перегревной неустойчивости происходит шнурование разряда, и он теряет объемный характер. Совокупность сходства и различий непрерывных электроионизационного и самостоятельного тлеющего разрядов ставит задачу об изучении вида вольт-

амперной характеристики электроионизационного разряда. Экспериментальному решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Описание установки и полученные результаты. Эксперименты проводились на разрядной камере электроионизационного CO_2 -лазера [2,3], содержащей плоские прямоугольные медные электроды с размерами разрядной области: расстояние между электродами — 10 см; длина — 100 см; ширина — 20 см. Электронный пучок вводился через круглые отверстия в одном из электродов (обычно он являлся анодом). Газовый поток перпендикулярен току разряда и был направлен вдоль широкой стороны электродов. Ток через разрядный промежуток и напряжение на электродах разрядной камеры измерялись посредством шунта и делителя напряжения соответственно. Вольт-амперная характеристика регистрировалась посредством двухкоординатного самопишущего прибора ЛКД4-003.

На рисунке представлено непосредственное изображение снимаемой с помощью самопишущего прибора вольт-амперной характеристики разряда в потоке азота при давлении 50 Torr, скорости газового потока 100 m/s и плотности тока электронного пучка $6 \cdot 10^{-6}$ A/cm². Энергия электронов пучка составляла 190 keV. Напряжения на электродах U увеличивалось от нуля до некоторого предпробойного значения (точка поворота F_4), затем уменьшалось до нуля и вновь поднималось. Точки поворота F_1, F_2, F_3 также соответствуют началу уменьшения напряжения. Рисунок наглядно демонстрирует гистерезис вольт-амперной характеристики.

Обсуждение результатов. При возрастании напряжения от нуля до значения U_E разряд горит в режиме ионизационной камеры, теория которого была дана Томсоном [4]. При напряжении на электродах U_E (точка E на вольт-амперной характеристике) происходит переход горения разряда от режима ионизационной камеры в электроионизационный режим. Из рисунков видно, что переход включает в себя падающую ветвь вольт-амперной характеристики [2]. Электроионизационный разряд отличается от режима ионизационной камеры на несколько порядков большей мощностью внешнего ионизатора (электронного пучка) [5]. В силу этого возникает качественно новое состояние разряда, когда в объеме разряда электроны создаются внешним ионизатором, а в катодном слое их рождение обусловлено самостоятельной ионизацией, поэтому на участке EF вольт-амперной характеристики происходит резкое возрастание тока через разрядный промежуток. Участок FK



Вольт-амперная характеристика электроионизационного разряда в потоке азота.

соответствует последовательному уменьшению напряжения на электродах и не совпадает с EF , т.е. на вольт-амперной характеристике электроионизационного разряда наблюдается гистерезис.

Как известно, гистерезис наблюдается в тех случаях, когда состояние системы в данный момент времени определяется внешними условиями не только в этот же момент, но и в предшествующие.

Наглядным подтверждением этого является гистерезис вольт-амперной характеристики самостоятельного тлеющего разряда переменного тока — отставание величины разрядного тока от его равновесного значения, соответствующего значению параметра E/p в данный момент времени. Здесь ионная компонента электрического тока из-за меньшей подвижности μ_+ ионов по сравнению с подвижностью μ_e электронов не успевает за изменениями напряженности электрического поля ($\mu_+/\mu_e \approx 10^{-2}$). В нашем случае, при плавном изменении напряжения на электродах, этого не происходит.

Наиболее существенным отличием горения самостоятельного тлеющего разряда в отпаянных системах от непрерывного электроионизационного является то, что горение последнего происходит в потоке газа. Поэтому гистерезис вольт-амперной характеристики непрерывного электроионизационного разряда обусловлен, по всей видимости, совокупностью взаимосвязанных электрических и газодинамических процессов, происходящих в разрядной области. Причем эта взаимосвязь должна носить нелинейный характер. Требование нелинейности вытекает из стационарности разряда как на участке EF , так и на участке FK вольт-амперной характеристики. Только при наличии нелинейных процессов возможно решение соответствующих дифференциальных уравнений, когда при одном и том же напряжении на электродах реализуются различные значения тока. В этой связи особый интерес представляет прикатодная область разряда, на которую приходится заметная доля приложенного к электродам напряжения (до 30%). В ней формируется эмитирующий слой, в котором происходит ударная ионизация газа, и в ней же происходит образование вязкого пограничного слоя. При реализующихся в разрядной области значениях числа Рейнольдса ($Re = v \cdot L/\nu \approx 3 \cdot 10^5$, где v — скорость газового потока на входе в разрядную область, L — ширина электрода в направлении потока, ν — кинематическая вязкость) движение газа в пограничном слое вполне может носить турбулентный характер. Дифференциальные уравнения гидродинамического течения газа в турбулентном пограничном слое носят нелинейный характер, и самосогласованная система дифференциальных уравнений гидро- и электродинамики может дать решения, адекватно описывающие гистерезис вольт-амперной характеристики непрерывного электроионизационного разряда в потоке азота.

Следует отметить, что независимо от положения точки поворота на восходящей ветви вольт-амперной характеристики (точки F_1, F_2, F_3, F_4

на рисунке) переход в режим ионизационной камеры происходил при одном и том же значении напряжения ($U_K \approx 500 \text{ V}$). Возможно, это связано с тем, что в режиме ионизационной камеры существует ламинарный погранслои. При переходе в электроионизационный режим горения разряда (точка E на рисунке), в погранслое происходит переход к турбулентному режиму. Обратный переход, естественно, более затруднен и происходит при меньшем значении приложенного к электродам напряжения. Его величина, вероятно, определена минимальным значением приэлектродных падений напряжения, при которых еще возможно горение электроионизационного разряда.

Список литературы

- [1] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. М.: Гостехиздат, 1952.
- [2] Аверин А.П., Глотов Е.П., Данилычев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 9. С. 405–408.
- [3] Аверин А.П. Канд. дис. М.: МФТИ, 1991. 106 с.
- [4] Thomson J.J., Thomson G.P. Conduction of Electricity through Gases. V. 1. London: Cambridge Univ. Press, 1928.
- [5] Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А. и др. // Квантовая электроника. 1971. № 3. С. 121–122.