

04.1

Самоорганизация газоразрядной плазмы в SF₆ и смесях на его основе

© В.В. Аполлонов, С.Ю. Казанцев[¶]

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

[¶] E-mail: kazan@kapella.gpi

Поступило в Редакцию 5 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 5 февраля 2019 г.

Принято к публикации 11 февраля 2019 г.

Показано, что особенности динамики формирования самоиницирующегося объемного разряда в газовых смесях на основе SF₆ могут быть объяснены с помощью эктонной модели формирования катодных пятен и эффекта ограничения плотности тока, обусловленного процессами диссоциации молекулярных компонентов газовой смеси.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.09.47708.17727

Объемный самостоятельный разряд в смесях SF₆ с водородом и углеводородами привлекает внимание исследователей в связи с тем, что эти газы составляют рабочую среду нецелых HF(DF)-лазеров [1–5]. Особенностью SF₆, а также ряда других сильно электроотрицательных газов и смесей на их основе является возможность реализации в этих средах объемного разряда в форме самоиницирующегося объемного разряда (СИОР) [5], что позволяет при средних давлениях получать значительные объемы газоразрядной плазмы без использования специальных устройств предьонизации [1,6]. Ряд исследований указывает на то, что при зажигании наносекундного разряда в газовых смесях на основе SF₆ наблюдается возникновение упорядоченных плазменных структур [7,8]. Целью настоящей работы является исследование возможности применения методов синергетики и неравновесной термодинамики [9–11] для анализа закономерностей формирования СИОР в сильно электроотрицательных газах.

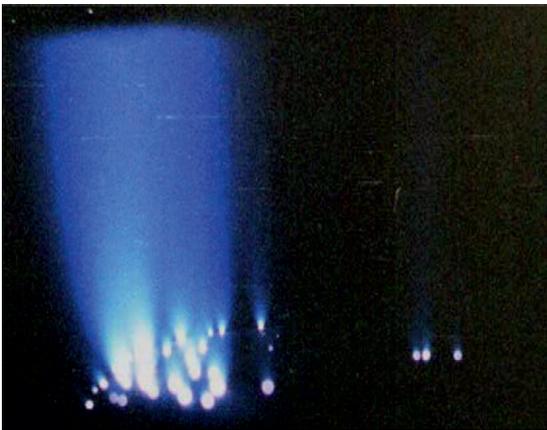
На рисунке показаны интегральные фотографии СИОР в смеси SF₆ с этаном при формировании в разрядном промежутке (РП) прямоугольных импульсов тока заданной длительности [5,6]. Длительность разряда указана под фотографией. СИОР зажигается первоначально в зоне максимального усиления электрического поля на краю РП (либо в области подсветки катода УФ-излучением) в виде одного или нескольких диффузных каналов, прорастающих из катодных пятен (КП). Свечение разряда в остальной части РП в этот момент времени не регистрируется. Диффузный канал является типичным примером диссипативной структуры (ДС), существующей благодаря подводу энергии от внешнего источника. Результаты экспериментов [5,12] указывают на то, что КП и привязанные к ним каналы возникают за наносекундные времена (< 20 ns); увеличение объема, занимаемого плазмой разряда, происходит дискретно, посредством образования новых ДС. Поперечный размер ДС уменьшается с ростом давления смеси [12], а повышение температуры газа T_g приводит к дополнительной

филаментации разряда и формированию новых ДС в области нагрева [8]. Подсветка РП и катода УФ-излучением от внешнего источника при длительности разрядного импульса T_{dis} > 150 ns не влияет на устойчивость СИОР и число образующихся ДС N_s, которое удовлетворяет следующему соотношению [5]:

$$N_s = A + B w_{in} U_{qs} / d. \quad (1)$$

Здесь w_{in} = ∫ j(t)E(t)dt — удельный энергосклад в плазму СИОР, j — плотность тока, E — напряженность электрического поля в РП, U_{qs} — напряжение на РП в квазистационарной стадии горения разряда, d — межэлектродное расстояние, а A и B — константы, зависящие от состава газовой смеси, материала и состояния поверхности катода [5]. Таким образом, СИОР в SF₆ и смесях на его основе демонстрирует поведение, характерное для систем, в которых происходят процессы самоорганизации. Известно [9–11], что для того, чтобы в открытой неравновесной системе возникли ДС, необходимо выполнение двух условий: во-первых, в системе должны быть процессы, приводящие к развитию неустойчивости; во-вторых, в системе должны также существовать механизмы отрицательной обратной связи, в результате которых возникающая неустойчивость должна подавляться. Покажем, что оба эти условия реализуются в объемном разряде, зажигаемом в газовых смесях на основе SF₆.

Неустойчивость, обуславливающая рождение ДС, по-видимому, вызвана эктоном [13]. В условиях высоких пробойных электрических полей, характерных для газовых смесей на основе сильно электроотрицательных газов, вблизи микронеровностей катода и диэлектрических включений электрическое поле достигает значений E ~ 10⁷ V/m, при которых наблюдается взрывная электронная эмиссия [14]. Результаты экспериментов [5,6] показывают, что на поверхности катода в месте локализации КП образуются кратеры и число КП растет при увеличении на поверхности катода локальных центров с


 $T_{dis} = 40 \text{ ns}$

 $T_{dis} = 210 \text{ ns}$

 $T_{dis} = 350 \text{ ns}$

Фотографии СИОР в системе плоских электродов, полученных при формировании в РП прямоугольного импульса тока амплитудой $\sim 250 \text{ A}$ с длительностью T_{dis} . Смесь $\text{SF}_6:\text{C}_2\text{H}_6 = 10:1$ с общим давлением 4.4 kPa , межэлектродное расстояние $d = 4 \text{ cm}$, диаметр катода 4.5 cm .

повышенной электронной эмиссией, например, за счет пескоструйной обработки поверхности или нанесения тонких диэлектрических пленок. К росту плотности ДС в разряде (при фиксированном давлении SF_6) приводит

также увеличение в смеси $\text{SF}_6:\text{C}_2\text{H}_6$ парциального давления C_2H_6 , что также можно объяснить увеличением вероятности рождения эктона вследствие снижения работы выхода электрона при адсорбции углеводородов на поверхности металлического катода [13]. Легко показать, что с учетом увеличения количества участков с повышенной электронной эмиссией из-за адсорбции молекул C_2H_6 функциональная зависимость количества ДС, образующихся при зажигании СИОР в смеси $\text{SF}_6:\text{C}_2\text{H}_6$, от парциального давления C_2H_6 будет следующей:

$$N_s \approx N_{sp}^0 + bK_a P_{\text{C}_2\text{H}_6} / (1 + P_{\text{C}_2\text{H}_6} K_a). \quad (2)$$

Здесь b и K_a — константы, зависящие от состояния поверхности и материала катода. Экспериментальные зависимости N_s от парциального давления C_2H_6 , полученные на различных электродных системах [5,6], с очень хорошей точностью аппроксимируются выражением (2).

Механизмом отрицательной обратной связи, который препятствует развитию контрагированного канала, после формирования КП на электродах является „эффект ограничения плотности тока“ [5], обусловленный уменьшением проводимости неконтрагированного плазменного канала при увеличении электрической энергии, вводимой в канал. Уменьшение тока, протекающего через диффузный канал, в отличие от [15] определяется процессами в объеме РП. Результаты исследований [6] убедительно доказали, что в рабочих смесях нецепных HF(DF)-лазеров основными механизмами ограничения плотности тока СИОР являются диссоциация SF_6 (и других компонентов рабочей смеси) электронным ударом и процессы электрон-ионной рекомбинации.

Неустойчивость, вызванная быстрым формированием КП, и эффект ограничения плотности тока обуславливают характерные для СИОР самоорганизующиеся процессы перераспределения плотности тока по РП. Известно, что рождение и гибель ДС в открытой неравновесной системе определяются функцией диссипации [9,10]. Функция диссипации при протекании разрядного тока описывается в соответствии с [11] следующим выражением (интеграл берется по всему объему РП):

$$\sigma = \frac{\int E j dV}{T_g}. \quad (3)$$

По теореме Пригожина этот функционал должен иметь экстремальное значение при условии выполнения ограничений, накладываемых законами сохранения заряда и энергии [9]. Рассмотрим, как будет реагировать система при изменении параметров, например при повышении температуры. Очевидно, что j или E , согласно выражению (3), должны будут также увеличиться. Однако поскольку общий ток должен сохраниться (он задан электрической схемой накачки), увеличение плотности тока в канале будет сопровождаться соответствующим уменьшением площади поперечного сечения ДС. Именно это и наблюдается в экспериментах [8]. Так,

в области нагретого газа появляются новые ДС. Из анализа выражения (3) и общей теории самоорганизации открытых систем [10,11] легко получить функциональную зависимость числа ДС, образующихся в разряде, от параметров разрядного импульса. Известно, что для функционирования ДС скорость производства энтропии в ней должна компенсироваться оттоком энтропии через внешние границы [11]. Скорость производства энтропии пропорциональна объему ДС, а снижение энтропии пропорционально площади поверхности ДС, поэтому начиная с некоторой величины удельного энерговклада неравновесной системе оказывается выгоднее образовать новую ДС, чем увеличивать размер ДС. Видна аналогия с живыми организмами, где клетка для поддержания своего существования также должна выводить избыток энтропии и, достигнув критического размера, начинает делиться [11]. Именно это и наблюдается в экспериментах [5,12], когда с увеличением энерговклада линейно увеличивалось число плазменных каналов (см. выражение (1)).

Таким образом, результаты работы подтверждают то, что особенности развития СИОР в газовых смесях на основе SF_6 обусловлены процессами самоорганизации ДС, представляющих собой плазменные диффузные каналы. Феноменологическая теория термодинамики неравновесных систем может быть с успехом использована для анализа функциональной зависимости количества формирующихся в разряде структурных образований от параметров разряда: энерговклада в плазму разряда, температуры, давления и состава газовой смеси.

Список литературы

- [1] *Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 24. С. 60–63.
- [2] *Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 2. С. 136–138.
- [3] *Федотов О.Г., Фомин В.М.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. В. 2. С. 258–264.
- [4] *Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 4. С. 341–345.
- [5] *Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфуллин А.В., Фирсов К.Н.* // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 3. С. 207–214.
- [6] *Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Kononov I.G., Podlesnykh S.V.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. N 38. P. 384003.
- [7] *Ретин П.Б., Реньев А.Г.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 5. С. 128–130.
- [8] *Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. N 21. P. 215205.
- [9] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [10] *Кернер Б.С., Осипов В.В.* // УФН. 1990. Т. 160. № 9. С. 1–73.
- [11] *Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В.* Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2005. 212 с.
- [12] *Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфуллин А.В., Фирсов К.Н.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 2. С. 95–100.
- [13] *Месяц Г.А.* // УФН. 1995. Т. 165. № 6. С. 601–626.
- [14] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 252 с.
- [15] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 6. С. 82–85.