

Феномен апокампического разряда¹⁾

Э. А. Соснин²⁾, В. С. Скакун, В. А. Панарин, Д. С. Печеницин, В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 2 марта 2016 г.

После переработки 18 апреля 2016 г.

Открыто новое явление, состоящее в том, что при импульсно-периодическом искровом разряде в воздухе и нормальных условиях место изгиба плазменного канала становится источником одной или нескольких диффузных струй, имеющих длину (при заданном напряжении) до 4–6 см и направленных поперек плазменного канала. Явление названо апокампическим разрядом (апокампом). Спектр излучения апокампа содержит в основном полосы электронно-колебательных переходов второй положительной системы молекулярного азота. Экспериментально выявлены условия формирования апокампа и установлено, что он состоит из сгустков плазмы, движущихся от плазменного канала при каждом импульсе со скоростью около 220 км/с.

DOI: 10.7868/S0370274X16120055

1. Тот или иной вид электрического разряда в газах формируется в характерных для него условиях газовой среды (состав, давление газов, наличие примесей и т.д.) и возбуждения (различные параметры импульсов напряжения и тока, материал и геометрия электродов и пр.). Варьируя параметры импульса возбуждения, можно перейти от коронного разряда к тлеющему и от тлеющего к искровому, соответственно, при этом параметры плазмы разряда изменяются [1–4]. Например, при импульсном пробое газоразрядных промежутков, имеющих величину $d \geq 1$ см и давлениях $p \geq 1$ атм, если напряжение на промежутке выше пробивного, преимущественно формируется искровой разряд [1].

Изучая условия формирования плазменных струй атмосферного давления в воздухе и азоте при возбуждении импульсами высокого напряжения микросекундной длительности, мы обнаружили [5, 6], что при импульсно-периодическом разряде перпендикулярно месту изгиба яркого плазменного канала формируется протяженная диффузная струя. Явление было названо апокампическим разрядом или апокампом (от греч. “από” – “от” и “κάμπη” – “изгиб, поворот”), т.е. разряд, формирующийся на изгибе.

Название было дано с учетом правил терминологической работы для вводимых в оборот научных терминов [7].

В настоящей работе сообщается об экспериментальном наблюдении обнаруженного феномена апокампа и приведены условия его формирования.

2. Схема установки для наблюдения апокампа представлена на рис. 1. Источник высоковольтных

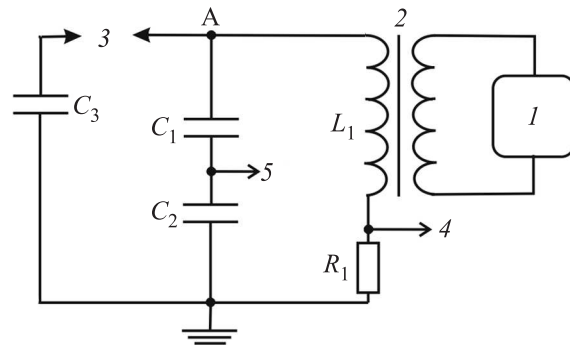


Рис. 1. Схема установки для получения апокампа: 1 – генератор; 2 – трансформатор; 3 – разрядный промежуток; 4, 5 – регистрация тока и напряжения, соответственно. $R_1 = 3.6$ Ом, $C_1 = 0.92$ пФ, $C_2 = 1832$ пФ, $C_3 = 3.1$ пФ, $L_1 = 10.4$ мГн

импульсов 1 и повышающий трансформатор 2 обеспечивали на выходе на холостом ходу импульсы напряжения положительной полярности с частотой f от 16 до 96 кГц, длительность импульса $\tau = 1.5$ – 2.5 мкс и амплитуду напряжения до 13 кВ. Импульсы подавались на электроды, образующие разрядный промежуток 3 длиной $0.5 \leq d \leq 1.2$ см. Один из электродов был соединен с высоковольтным выходом импульсного трансформатора, а второй с конденсатором C_3 . Конденсатор C_3 был необходим для

¹⁾См. дополнительные материалы к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru.

²⁾e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

сохранения высокого напряжения на искровом промежутке.

Импульсы напряжения регистрировали в точке А (рис. 1) с помощью емкостного делителя напряжения (C_1, C_2). Импульсы тока фиксировали токовым шунтом, собранным на чип-резисторах (R_1). Соответствующие сигналы по каналам 4 и 5 подавали на осциллограф TDS 224 (Tektronics, Inc.).

Для регистрации спектра излучения разряда использовали сборку из коллимирующей линзы с фокусным расстоянием 30 мм, оптоволокну с известным спектром пропускания и спектрометра HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной п.з.с.-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции ~ 1.33 нм).

Для регистрации формы разряда использовалась фотокамера Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной покадровой съемки с частотой ~ 6.4 кадра/с, а также четырехканальная CCD-камера HSFC-PRO (PCO AG) с минимальной длительностью одного кадра 3 нс.

3. Процесс формирования апокампа был следующим. При подаче на разрядный промежуток импульсов напряжения на высоковольтном электроде зажигается классический коронный разряд, имеющий форму слабосветящегося конуса, не соприкасающегося с противоположным электродом. После кратковременного замыкания разрядного промежутка отрезком проводника образуется ярко светящийся канал, по внешнему виду соответствующий искровому разряду. Плазма разряда быстро разогревается (см. также результаты моделирования в [8]), и вокруг него формируется рассеянное свечение, что связано с конвективным вытеснением разогретых газов из токового канала. Одновременно канал начинает изгибаться, и в месте изгиба образуется одна или несколько светящихся струй (рис. 2а) – собственно апокамп. Форма струй может быть игловидной, а может быть конической. Насколько можно судить по фотографической съемке, струи, если их несколько, отталкиваются друг от друга, что свидетельствует о наличии в них электронов, движущихся в одном направлении. Длина струй в оптимальных условиях достигала 6 см.

Мы варьировали геометрию разрядного промежутка, материал электродов (нержавеющая сталь, медь, вольфрам) и их взаимное расположение. Во всех случаях наблюдалось появление апокампа. Наклоняя электродную систему, можно менять ориентацию апокампа с “вертикальной” на наклонную (рис. 2б) и горизонтальную. Это свидетельствует о

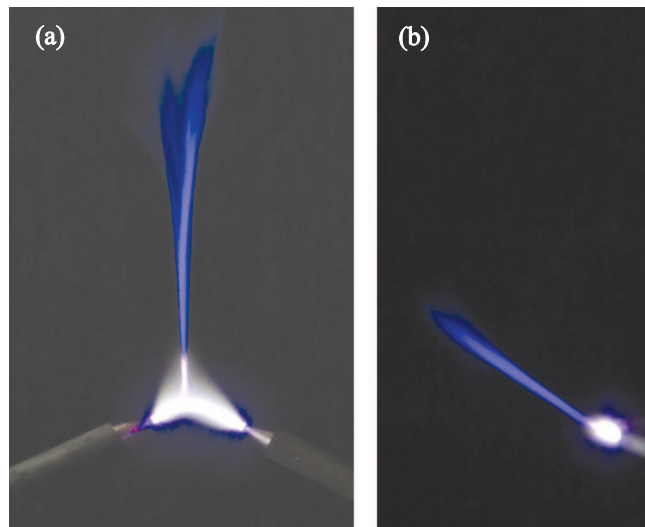


Рис. 2. (Цветной онлайн) Внешний вид плазменного канала с апокампом в воздухе: $f = 50$ кГц, $d = 1$ см, нормальные условия

том, что в формировании апокампа конвективный поток газа, нагретого в плазменном канале, не играет основной роли.

При повышении амплитуды напряжения на электродах с 9 до 13 кВ и/или частоты следования импульсов до 96 кГц, в ряде опытов наблюдалось появление двух-трех изгибов на плазменном канале. Это приводило к формированию в местах максимальной кривизны не одного, а нескольких апокампов. Но в этом случае их длина и интенсивность свечения были в несколько раз меньше длины и интенсивности одиночного апокампа, показанного на рис. 2а.

На рис. 3 представлены результаты регистрации апокампа CCD камерой в воздухе при $f = 16$ кГц и $d = 1$ см. Видно, что в наносекундном масштабе времени апокамп представляет собой набор т.н. “плазменных пуль” [8], движущихся от места формирования – плазменного канала. С удалением от плазменного канала контур “плазменных пуль” постепенно размывается и наблюдается уменьшение интенсивности свечения. На рис. 3с видны три светящихся области, что связано с началом распада апокампа. По смещению “пули” на полученных кадрах была определена ее скорость, которая составила примерно 220 км/с. Эта величина существенно больше скорости конвективного движения газа.

Отметим, что для стабилизации положения апокампа при его фотографировании CCD-камерой, искровой разряд между электродами был помещен в изогнутую трубку из кварца с отверстием. Это привело к уменьшению длины апокампа, но остальные его свойства не изменились.

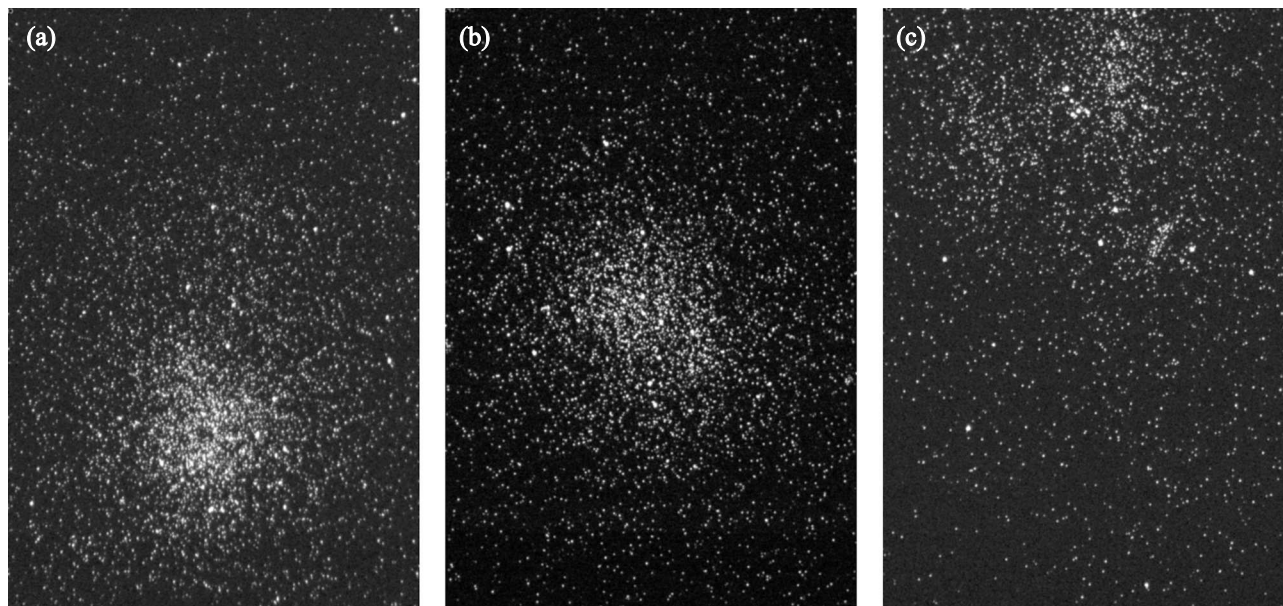


Рис. 3. Динамика разлета плазмы апокампа, направленного снизу вверх: (а) – Фотография плазмы у места изгиба плазменного канала, излучение которого было экранировано, за первые 10 нс после ее появления. (б) – Фотография плазмы в интервале времени 10–20 нс. (с) – Фотография плазмы в интервале времени 20–30 нс. Размер кадра по вертикали – 11.1 мм. Экспозиция всех трех кадров – 10 нс, паузы между кадрами нет

Исследования показали, что средняя длина апокампа зависит от амплитуды напряжения U_A на высоковольтном электроде (точка А, рис. 1), и наблюдается пороговый характер его формирования. При открытом искровом разряде (без кварцевой трубки) апокампы формировались скачкообразно, начиная с $U_A \cong 9$ кВ. С последующим ростом напряжения длина апокампа увеличивалась. Однако при $U_A \geq 10$ –11 кВ длина апокампа переставала расти, и вместо одной диффузной струи появлялось несколько струй и/или одиночная струя разделялась на несколько струй.

Спектр излучения апокампа содержит интенсивные полосы, соответствующие электронно-колебательным переходам второй положительной системы молекулярного азота N_2 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) и сравнительно слабые линии переходов первой положительной системы иона N_2^+ ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g$). Известно, что такой спектр наблюдается при диффузном разряде в воздухе [4]. В спектре плазменного канала интенсивность указанных переходов была в два и более раза выше, чем в апокампе, и, кроме того, в диапазоне 420–700 нм наблюдались линии атомарных переходов, которых в спектре апокампа нет.

Для оценки температуры плазменного канала, являющегося источником апокампа, в него вносили различные вещества и наблюдали за тем, происходит

ли их воспламенение или плавление. В частности, удавалось добиться оплавления конца нихромовой проволоки длиной 20 мм и диаметром 0.1 мм (температура плавления нихрома 1100–1400 °С).

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения для двух режимов разряда при $C_3 = 3.1$ пФ.

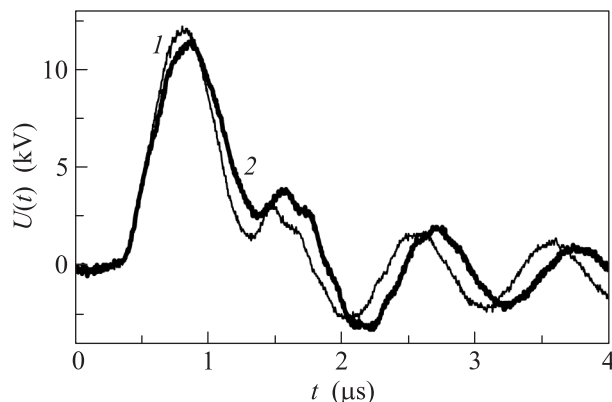


Рис. 4. Осциллограммы напряжения для режима холостого хода (1) и апокампа (2): $f = 50$ кГц, $d = 1.1$ см, геометрия “острие–острие”

Осциллограмма 1 на рис. 4 демонстрирует холостой ход, когда газоразрядный промежуток не замкнут. Отметим, что в этих условиях на высоковольтном электроде формируется коронный разряд. Осциллограмма 2 на рис. 4 соответствует разряду с апокампом

пом. Видно, что при замыкании промежутка искровым каналом и образовании апокампа напряжение уменьшается.

4. Обобщая полученные данные, можно выделить следующие особенности обнаруженного феномена:

1. Апокамп всегда привязан к месту изгиба плазменного канала, и его образование не зависит от формы и материала электродов основного разряда.

2. На появление апокампа критически влияет амплитуда напряжения U_A . Длина апокампа может достигать 4–6 см, что делает его похожим на полученную нами в [5, 6] плазменную струю атмосферного давления в воздухе или азоте. Если шунтировать конденсатор C_3 на землю через резистор, апокамп не формируется.

3. Высокоскоростная съемка и изменение ориентации электродов показали, что струи апокампа формируются как набор “плазменных пуль”, на распространение которых конвекция не оказывает существенного влияния.

4. Можно предположить, что генерация убегающих электронов [9, 10] имеет место при формировании апокампа. Так в работе [11] рентгеновское излучение было зарегистрировано при коронном разряде и микросекундном фронте импульсов напряжения.

Авторы благодарны проф. Б.Н. Пойзнеру за помощь с выбором термина для обозначения изучаемого нами феномена.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-29-00052).

1. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Издательский дом “Интеллект”, Долгопрудный (2009), с. 736.
2. D. Z. Pai, G. D. Stancu, D. A. Lacoste, and Ch. O. Laux, *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 045030 (2009).
3. D. Z. Pai, D. A. Lacoste, and Ch. O. Laux, *J. Appl. Phys.* **107**, 093303 (2010).
4. T. Shao, V. F. Tarasenko, Ch. Zhang, M. I. Lomaev, D. A. Sorokin, P. Yan, A. V. Kozurev, and E. Kh. Baksht, *J. Appl. Phys.* **11**, 023304 (2012).
5. Э. А. Соснин, В. А. Панарин, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, Д. С. Печеницин, В. С. Кузнецов, *ЖТФ* **86**, 151 (2016).
6. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsin, and V. S. Kuznetsov, *SPIE* **9810**, 98101 (2015).
7. А. В. Суперанская, Н. В. Подольская, Н. В. Васильева, *Общая терминология: Терминологическая деятельность*, ЛКИ, М. 4-е изд., 288 (2014).
8. G. V. Naidis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 234017 (2008).
9. В. Ф. Тарасенко, С. И. Яковленко, В. М. Орловский, А. Н. Ткачев, С. А. Шунайлов, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 737 (2003).
10. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Д. В. Белоплотов, А. Г. Бураченко, И. Д. Костыря, М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка, Д. А. Сорокин, *Письма в ЖЭТФ* **102**, 388 (2015).
11. В. Ф. Тарасенко, И. Д. Костыря, Д. В. Рыбка, *Рентгеновское излучение при коронном разряде в воздухе атмосферного Давления*, в кн. *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления*, под ред. В. Ф. Тарасенко, СТТ, Томск (2015), с. 467.