

Краткие сообщения

04

К вопросу об источнике апокампа

© Э.А. Соснин,^{1,2} В.А. Панарин,¹ В.С. Скакун,¹ В.Ф. Тарасенко^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Томский государственный университет,
634055 Томск, Россия

e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2017 г.)

Объектом работы является апокамп — новый тип плазменной струи, которая формируется от яркого отростка, возникающего на месте изгиба канала высоковольтного импульсно-периодического разряда в условиях, когда электроды имеют емкостную развязку с землей. Предмет работы — выявление отличительных свойств отростка в сравнении с апокампом. Экспериментально выявлены отличия в спектрах отростка и плазменной струи — апокампа — в воздухе при нормальных условиях. Подтверждены результаты наших предыдущих исследований, согласно которым апокамп является волной ионизации. Экспериментально продемонстрирован запуск гелиевой плазменной струи от отростка импульсно-периодического разряда в режиме формирования апокампа. Показано, что отросток импульсного высоковольтного разряда в режиме с апокампом является сильно разогретой и проводящей электрический ток средой.

DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46030.2302

Введение

В 2016 г. в воздухе атмосферного давления, а затем в смесях инертных газов с добавками электроотрицательных газов при давлениях до одной атмосферы был открыт новый тип плазменной струи — апокамп (от греч. *αλβ* — от и *καμπη* — изгиб, поворот), который был зафиксирован в воздухе и инертных газах с добавками электроотрицательных газов при величинах давлений до одной атмосферы [1–3]. Как показано на рис. 1, *a*, апокамп представляет собой плазменную струю 9 (или несколько струй), которую порождает яркий отросток 8, формирующийся на месте изгиба канала высоковольтного импульсно-периодического разряда 7 между двумя электродами. По крайней мере один из электродов 2 — высоковольтный и выполнен в форме острия, а другой 3 находится под плавающим потенциалом.

Апокамп отличается от известных источников плазменных струй атмосферного давления [4–8] упрощенной конструкцией, сравнительной легкостью образования в воздухе атмосферного давления и в смесях с электроотрицательными газами (при давлениях меньше атмосферы) и тем, что для его формирования не нужна принудительная прокачка газа через разрядную зону.

Высокоскоростная съемка апокампа 9 в нормальных условиях (по давлению и температуре) выявила [2,9], что он представляет собой совокупность так называемых „плазменных пуль“, движущихся со скоростью от 100 до 220 km/s, на распространение которых конвекция не оказывает существенного влияния. За счет высокой скорости движения и высокой частоты повторения

импульсов визуально они наблюдаются как одна или несколько плазменных струй, хотя по существу они дискретны. Каждая „пуля“ представляет собой след от движения волны ионизации.

Остается еще много вопросов о механизме формирования феномена. В частности, не ясной остается природа отростка 8 (рис. 1, *a*), служащего источником апокампа. Именно в этой зоне формируется феномен. Оценка температуры отростка, согласно [10], дала величину между 1300 и 1000°С.

В настоящей работе мы уточняем данные о спектральном составе излучения в отростке, подтверждаем то, что апокамп является волной ионизации, и экспериментально доказываем, что в области отростка канала импульсно-периодического разряда в отличие от формируемой им плазменной струи имеет место перенос электрического тока.

1. Экспериментальная установка и методы измерений

Эксперименты проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, *b*. Источник высоковольтных импульсов 1 и повышающий трансформатор 2 обеспечивали на выходе на холостом ходу импульсы напряжения положительной полярности с частотой f от 16 до 50 kHz, длительность импульса $\tau = 1.5–2.5 \mu\text{s}$ и амплитуду напряжения до 13 kV. Импульсы подавались на разрядный промежуток длиной d , образованный двумя острыми электродами 2 и 3 из нержавеющей стали. В большинстве экспериментов

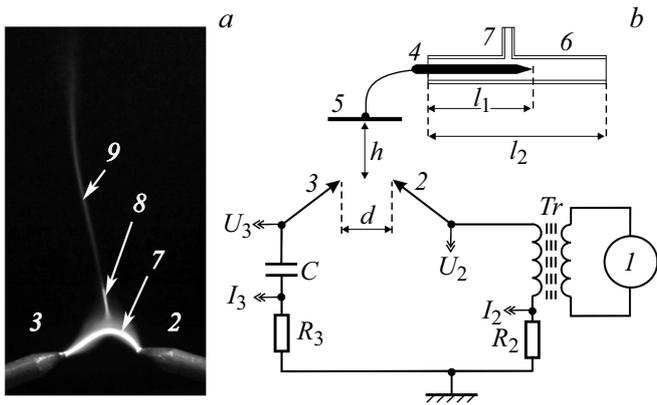


Рис. 1. Внешний вид разряда, инициирующего формирование апокампа (а), и схема экспериментальной установки (b): 1 — источник импульсного напряжения положительной полярности; 2 — электрод; 3 — электрод с развязкой на землю через емкость $C = 11.65$ pF; 4 — стержневой электрод; 5 — круглый коллектор тока; 6 — кварцевая трубка с вводом для подачи газа; 7 — канал импульсно-периодического разряда; 8 — яркий отросток; 9 — апокамп; $R_2 = 3.6 \Omega$; $R_3 = 1 \Omega$; $l_1 = 75$ mm; $l_2 = 100$ mm.

$d = 9.2$ mm. Электрод 3 был соединен с высоковольтным выходом импульсного трансформатора, а электрод 4 имел емкостную развязку с заземлением через конденсатор C . На рис. 1, b также показаны места регистрации временного хода напряжения и тока на электродах (U_2 , U_3 , I_2 , I_3).

Для изучения отростка над разрядным промежутком на высоте h размещался круглый коллектор 5 для сбора тока. На коллектор (в зависимости от величины h) происходила утечка тока, что смогло приводить к зажиганию плазменной струи атмосферного давления в расположенной над ним классической сборке для получения плазменных струй в инертных газах. Она включала кварцевую трубку с внутренним диаметром 7 mm, в один из концов которой был герметично помещен острый электрод 4 (длиной $l_1 = 75$ mm), а другой был открыт и служил соплом для формирующейся плазменной струи. Инертный газ He подавался в трубку через патрубок 7 со скоростью 2–3 l/min. Таким образом описанная установка позволяла нам, варьируя высоту коллектора над зоной, в которой формируется апокамп, менять утечку тока на коллектор и визуально отслеживать интенсивность этой утечки с помощью длины плазменной струи.

Для каждой величины h с помощью фотокамеры Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной кадровой съемки с частотой ~ 6.4 fr/s проводилась съемка внешнего вида разряда и гелиевой плазменной струи. Затем проводилась их статистическая обработка.

Кроме того, проводилась регистрация спектров. Для этого использовали спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 nm, спек-

тральная полуширина аппаратной функции ~ 1.33 nm). Сигнал на него подавали от оптоволокну с известным спектром пропускания с размещенной на нем коллимирующей линзой с фокусным расстоянием 30 mm. Линзу располагали на различных высотах h .

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана экспериментальная установка в работе. Прямое замыкание на коллектор тока разряда, инициирующего апокамп, ведет к зажиганию гелиевой плазменной струи 10, имеющей максимальную длину $L = 5.4 \pm 0.7$ mm. С ростом высоты h длина гелиевой струи уменьшается, так как показано на рис. 3. Доверительные интервалы построены для вероятности 90%. Видно, что на высотах примерно до 2 cm длина гелиевой плазменной струи меняется статистически незначимо, но последующее увеличение $h > 2$ cm приводит к резкому сокращению длины плазменной струи в гелии. Здесь

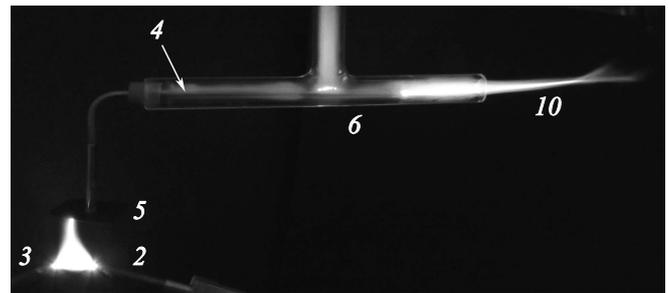


Рис. 2. Экспериментальная установка во время испытаний: 2, 3 — электроды; 5 — коллектор тока; 6 — кварцевая трубка, заполненная гелием; 10 — гелиевая плазменная струя.

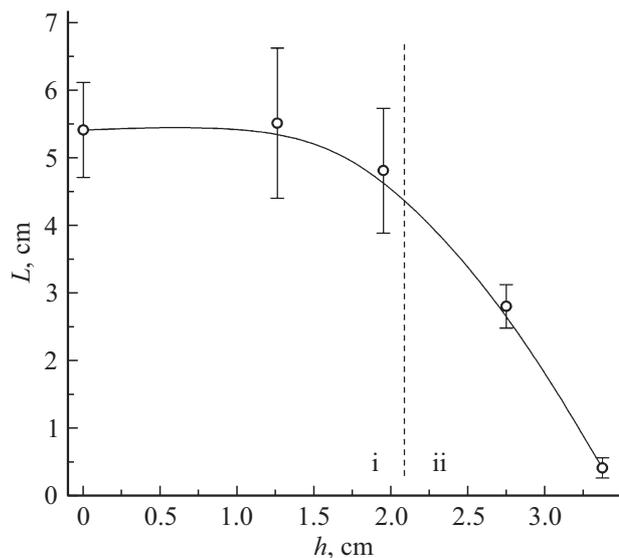


Рис. 3. Зависимость длины гелиевой плазменной струи L от расстояния h при $d = 9$ mm, $f = 49$ kHz: i) зона, в которой длина гелиевой струи изменяется незначимо; ii) зона, в которой длина струи существенно сокращается.

последняя точка ($h = 3.7$ см) соответствует коронному свечению с острия электрода *б* (тусклая точка свечения, привязанная к концу электрода *б*).

Таким образом, экспериментально показано, что отросток канала высоковольтного импульсного разряда (8 на рис. 1, *а*) обладает свойствами проводника тока, а сам апокамп уже нет. Последнее соответствует установленному ранее факту [2,7] о том, что апокамп — это волна ионизации, но не лавина носителей заряда.

На рис. 4 показаны спектры излучения импульсного разряда (7 на рис. 1, *а*), отростка (8 на рис. 1, *а*) и гелиевой плазменной струи (10 на рис. 2). Видно, что спектр разряда, инициирующего апокамп, содержит полосы $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$, $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$ и богаче, чем спектр отростка. Такой спектр соответствует слабочной стадии разрядов в воздухе и азоте [11]. Известно, что интенсивные молекулярные полосы азота свидетельствуют о том, что в плазме в избытке образуются возбужденные молекулы и ионы азота $N_2(A)$, $N_2(B)$, $N_2(C)$, $N_2(a)$, $N_2^+(B)$ [12]. Заселение состояний $N_2(A)$ происходит в силу сравнительно низкой величины энергии возбуждения (6.17 eV) для реакции $e + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e'$ и благодаря столкновениям колебательно-возбужденных молекул азота $N_2(v_1) + N_2(v_2) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$. Кроме того, происходит частичное заселение состояния $N_2(B)$. То, что в спектре самым интенсивным является излучение второй положительной системы азота $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, означает, что температура электронов в этих условиях близка к оптимальной для заселения состояния $N_2(C)$.

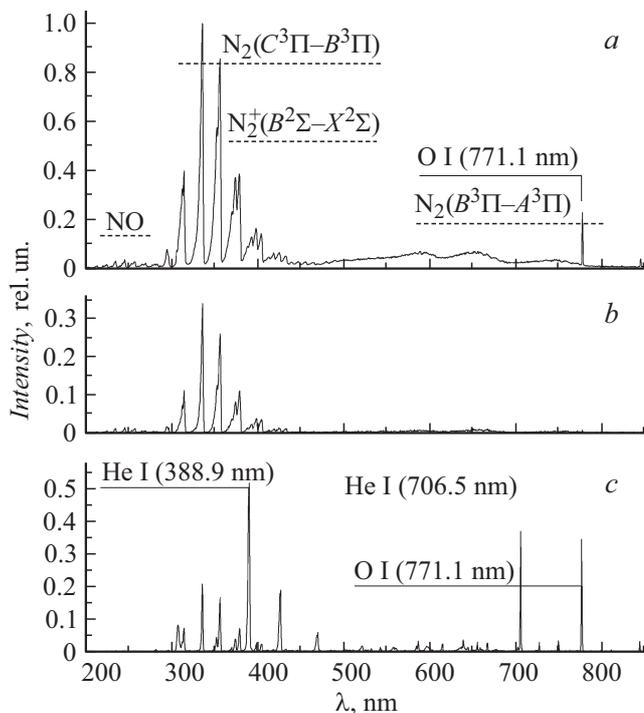


Рис. 4. Спектры излучения канала импульсного разряда при $h = 0$ мм (*а*), отростка $h \sim 20$ мм (*б*) и гелиевой плазменной струи (*с*) при $d = 9.2$ мм, $h = 20$ мм, $f = 49$ кГц.

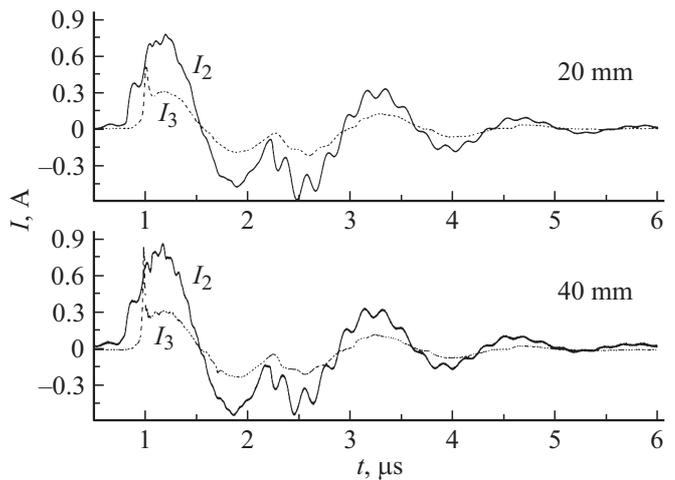


Рис. 5. Временной ход величины тока при $d = 9.2$ мм, $h = 10$ мм, $f = 53$ кГц.

Спектр гелиевой плазменной струи вблизи сопла содержит резонансные линии атома He (переходы $3d-2p$ и $3s-2p$), Ne (переходы $3p-2s$), а также линии кислорода на переходах $3p^5P-3s^5S^o$ и $3p^3P-3s^3S^o$. Его состав не менялся при различных величинах h .

Были сделаны расчеты мощности, выделяемой в цепи разряда по осциллограммам, полученным при $h = 20$ и 40 мм, т.е. в тех случаях, когда коллектор собирает ток с отростка и не перекрывается с ним. Оказалось, что в случае, когда отросток касается коллектора тока, в электрической цепи выделяется примерно на 15% больше энергии, чем в случае, когда коллектор касается только апокампа.

Токи в обоих случаях почти не меняются на разных высотах (рис. 5). Значит в одном случае энергия тратится на создание апокампа, а в другом — на зажигание гелиевой плазменной струи.

Заключение

1. Экспериментально продемонстрирован запуск гелиевой плазменной струи от отростка импульсно-периодического разряда в режиме формирования апокампа.
2. Отмечены отличия в спектрах отростка и плазменной струи — апокампа — в воздухе, при нормальных условиях.
3. Экспериментально доказано, что электрический ток переносится только в области отростка канала импульсно-периодического разряда, а апокамп является волной ионизации. Показано, что существует критическая высота h_s отростка, выше которой переносимый ток пренебрежимо мал. Эта величина статистически соответствует длине отростка канала импульсно-периодического разряда. При разведении коллектора от

отростка вкладываемая в разряд энергия тратится на формирование апокампа.

Таким образом, отросток импульсного высоковольтного разряда в режиме с апокампом является проводящей электрический ток и сильно разогретой ($\sim 1000\text{--}1300^\circ\text{C}$) средой. На этом основании можно выдвинуть гипотезу о том, что отросток является аналогом коронного разряда, но развивается не с острия металлического электрода, а в месте усиления напряженности поля канала разряда. В дальнейшем мы планируем проверить это предположение.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3.

Список литературы

- [1] Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 5. С. 92–95.
- [2] Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 12. С. 857–860.
- [3] Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 2017. Т. 122. № 2. С. 15–22.
- [4] Belmonte T., Arnoult G., Henrion G., Gries T. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. N 36. P. 363001.
- [5] Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. N 6. P. 064001.
- [6] Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B., Ostrikov K. // Phys. Reports. 2016. Vol. 630. N 4. P. 1–84.
- [7] Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Печеницин Д.С., Кузнецов В.С. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 151–154.
- [8] Naidis G.V., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44. N 12. P. 3249–3253.
- [9] Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Baksht E.Kh., Tarasenko V.F. // Eur. Phys. J. D. 2017. Vol. 71. P. 25.
- [10] Андреев М.В., Кузнецов В.С., Скакун В.С., Соснин Э.А., Панарин В.А., Тарасенко В.Ф. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 32–36.
- [11] Deng X.L., Nikiforov A.Yu., Vanraes P., Leys Ch. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. N 2. doi: 023305. 10.1063/1.4774328.
- [12] Akishev Y., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N. // J. Phys. Conf. Series. 2010. Vol. 257. N 1. P. 012014.