

УДК 621.385

PACS: 52.50.Dg

Апокамп на основе барьерного разряда в смесях ксенона и криптона с молекулярным хлором

Э. А. Соснин, В. А. Панарин, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, В. С. Кузнецов

В смесях Хе-Cl₂ и Kr-Cl₂ получены плазменные струи (апокампы), образующиеся на изгибе канала импульсно-периодического барьерного разряда. Сделана оценка скорости распространения волны ионизации апокампа, лежащая в диапазоне от единиц до сотен км/с. Показано, что добавка электроотрицательного газа к инертным газам (Хе и Kr) определяет формирование апокампа.

Ключевые слова: апокамп, плазменная струя, ксенон, криптон, хлор.

Введение

Источники плазменных струй широко используются в науке и различных приложениях [1–3]. В 2016 г. был открыт новый источник плазменных струй, в котором плазменная струя формируется в местах изгиба канала импульсно-периодического разряда в воздухе атмосферного давления [4–6] и распространяется перпендикулярно каналу разряда. Явление было названо апокампом (от греч. αλό – «от» и κάμψη – «изгиб», «поворот»), т. е. плазменной струей, формируемой от изгиба разрядного канала. В [7] апокамп был получен при пониженных давлениях воздуха ($5 < p < 760$ Торр). В этих условиях при величинах напряжения ~ 10 кВ длина апокампа составляет единицы-десятки сантиметров.

Предварительные эксперименты со смесями инертных газов с воздухом или азотом позволили предположить, что одним из условий формирования апокампа является наличие в смеси, возбуждаемой импульсным разрядом, электроотрицательных газов [8]. Для проверки этой гипотезы

было предложено исследовать режим с апокампом в смесях криптона или ксенона с молекулярным хлором.

В данной работе впервые сообщается о создании источника плазменной струи на основе апокампа в смесях Хе-Cl₂ и Kr-Cl₂.

Экспериментальная установка и методики измерений

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а. Для формирования апокампа необходимо зажечь импульсно-периодический разряд (его далее будем называть основным) между двумя электродами, один из которых был соединен с импульсным трансформатором, а второй находился под плавающим потенциалом [4–8]. Использовались цилиндрические электроды 1 и 2, которые были покрыты барьерами 4 и 5 из кварцевых трубок, запаянных на концах и имеющих диаметр 5 мм. В [4–8] барьеры не применялись, основной разряд зажигался непосредственно между металлическими электродами. Однако использование барьеров из кварца на несколько порядков увеличивает срок службы рабочей смеси, содержащей молекулярный хлор [9]. Величина разрядного промежутка составляла $d \sim 8$ мм. Электроды помещались в цилиндрическую колбу с внутренним диаметром 5 см. Колба была изготовлена из кварца с известным спектральным пропусканием. Для зажигания основного разряда давление газовой смеси снижали до нескольких десятков-сотен Торр, а на электрод 1 от генератора 6 подавали импульсы напряжения положительной полярности. Электрод 2 соединялся с заземленным электро-

Соснин Эдуард Анатольевич^{1,2}, ведущий научный сотрудник.

Панарин Виктор Александрович, инженер.

Скакун Виктор Семенович¹, старший научный сотрудник.

Тарасенко Виктор Федотович^{1,2}, зав. лабораторией.

Кузнецов Владимир Сергеевич^{1,2}, техник.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, Томск, просп. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет.

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36.

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

Статья поступила в редакцию 18 января 2017 г.

© Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф., Кузнецов В. С., 2017

дом генератора через конденсатор величиной $C = 10$ пФ. Генератор обеспечивал импульсы напряжения положительной полярности с длительностью импульса на полувысоте $\tau_{1/2} \sim 1,5$ мкс, перестраиваемой частотой следования импульсов f от 2 до 53 кГц, амплитудой до 13 кВ и фронтом импульса $\sim 0,8$ мкс.

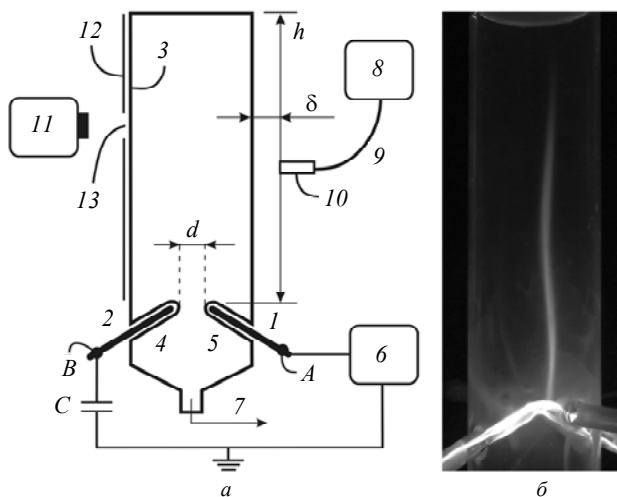


Рис. 1. Схема установки (а) и внешний вид плазменной струи с апокампом (б): 1, 2 – электроды; 3 – кварцевая колба с внутренним диаметром 5 см; 4, 5 – кварцевые барьеры для электродов; 6 – генератор; 7 – патрубок для подачи и напуска смесей; 8 – спектрометр; 9 – оптоволоконный световод; 10 – коллиматор; 11 – фотодиод; 12 – экран с отверстием 13.

Были исследованы смеси с соотношениями $\text{Xe}(\text{Kr})/\text{Cl}_2 = (200 \div 15)/1$ при давлениях от 300 до 15 Торр. Здесь и далее используются объёмные соотношения компонентов смеси. Для откачки и напуска смесей использовали патрубок 7.

Фотография внешнего вида плазменной струи, сформированной на частоте $f = 53$ кГц в смеси $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 100/1$ при $p = 30$ Торр показана на рис. 1, б. Снимки получены с помощью фотокамеры Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной покадровой съемки при времени экспозиции $1/8$ с. Апокамп «прорастает» от места изгиба основного канала, расположенного на поверхности диэлектрических барьеров. Визуально свечение разряда было менее ярким, чем в работах [4–7], что объясняется различиями в спектральном составе излучения. Для регистрации спектров излучения из различных частей колбы использовали сборку, включающую в себя оптоволоконно с известным спектром пропускания, коллимирующую линзу 10 с фокусным расстоянием 30 мм и спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции $\sim 1,33$ нм). В экспериментах линза позволяла собирать излучение из пятна диа-

метром до 5 мм. Она располагалась на расстоянии δ от поверхности колбы и перемещалась по высоте колбы h , при этом величина $h = 0$ мм соответствовала основному разряду, а апокамп развивался вдоль оси кварцевой камеры.

С помощью осциллографа TDS 3034 (Tektronics, Inc.) снимали временной ход импульсов напряжения, тока разряда и сигнал с фотодиода. Импульсы напряжения регистрировались в точках А и В (рис. 1, а) с помощью емкостных делителей напряжения, а импульсы тока – токовым шунтом, установленным за конденсатором C , соединенным с точкой В.

Кроме того, с помощью фотодиода 11 PD025 (Photek) в диапазоне длин волн от 200–400 нм регистрировали временной ход излучения на различных высотах h и отступах δ . Поток излучения диафрагмировали с помощью экрана 12 с отверстием 13. Величину энергетической светимости излучения измеряли фотоприемником HAMAMATSU H8025-222 с известной спектральной чувствительностью.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования выявили следующие факты.

1. С уменьшением давления длина, яркость и стабильность апокампа увеличиваются. Оптимальные с этой точки зрения давления смеси были типичными для эксиламп емкостного и барьерного разрядов [9–11]. Следует отметить, что в чистых инертных газах – Кг и Хе – вместо апокампа наблюдаются классические столбы тлеющего разряда низкого давления, либо, при повышении давления, разряд переходит в искровую стадию. Это подтверждает важность присутствия электроотрицательного газа в исследуемой смеси для формирования апокампа. Подобные результаты по влиянию другого электроотрицательного газа кислорода были получены нами при изучении апокампа в воздухе, где содержится примерно 21 % кислорода, и, для сравнения, в азоте. В азоте при атмосферном давлении возникновение апокампа было затруднено. Однако даже при небольших добавках воздуха (~ 1 %) и прочих равных условиях апокамп начинал формироваться. Как мы считаем, электроотрицательный газ при формировании апокампа уменьшает концентрацию электронов в колбе, что затрудняет формирование тлеющего разряда во всём её объеме. Поэтому добавки электроотрицательных газов облегчают формирование апокампа. Предыонизация газа осуществляется за счет ВУФ- и УФ-излучения из основного разряда.

2. Пример спектра излучения апокампа в смеси Кг- Cl_2 показан на рис. 2. Для обоих использованных смесей спектры содержат широкополос-

ное ультрафиолетовое излучение молекул KrCl^* и XeCl^* (интенсивная полоса $\text{V}_{1/2}-\text{X}_{1/2}$ с максимумом на $\lambda = 222$ и 308 нм и менее интенсивные полосы $\text{D}_{1/2}-\text{X}_{1/2}$, $\text{D}_{1/2}-\text{A}_{1/2}$, $\text{C}_{3/2}-\text{A}_{3/2}$) и сравнительно слабые линии атомарных переходов инертных газов ($\text{Xe I} - 823,1, 828,0, 881,9$ нм; $\text{Kr I} - 758,7, 760,1, 810,4$ нм). Такие спектры типичны для эксиламп барьерного и емкостного разряда [9, 10]. В смесях с большим содержанием инертного газа ($\text{Xe}/\text{Cl}_2 = (200 \div 100)/1$) было заметно сине-зеленое свечение кварцевой стенки колбы в местах касания апокампа и в области основного разряда. Оно вызвано люминесценцией кварца под действием ВУФ излучения димеров Xe_2^* (континуум с максимумом интенсивности на $\lambda = 172$ нм), которое тоже формируется в смесях $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ [12, 13].

Интенсивность как молекулярных полос, так и атомарных линий уменьшается в осевом направлении колбы по мере удаления от основного разряда по гиперболическому закону.

3. Измерения временного хода импульсов излучения на различных высотах h с привязкой к току основного разряда I выявили наличие задержки сигнала Δ фототока по сравнению с сигналам

лом от основного разряда. Пример задержки, полученной на высоте 18 см диода $I(\text{PD})$ относительно тока основного разряда I в смеси $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 30/1$ при $p = 30$ Торр и частоте 53 кГц показан на рис. 3. Наличие задержки и отсутствие излучения после прохождения фронта апокампа объясняется тем, что плазменная струя не является сплошной, а состоит из т. н. «плазменных пуль» [1, 2, 5, 14–16], имеющих высокую скорость распространения. Так, съёмка апокампа в воздухе атмосферного давления с помощью CCD-камеры показала, что плазменная струя распространяется в виде волны ионизации со скоростью фронта до 200 км/с [5]. Зная задержку Δ фототока и высоту h , можно приблизительно оценить скорость распространения фронта волны ионизации в колбе как $v \sim (h/\Delta)$. Полученные значения скоростей приведены в таблице. Видно, что скорость распространения фронта волны ионизации падает с ростом давления. Кроме того, вблизи основного разряда скорость фронта волны ионизации выше, чем на удалении от него. Аналогичные закономерности были получены при распространении «плазменных пуль» в воздушной среде [1, 2, 5].

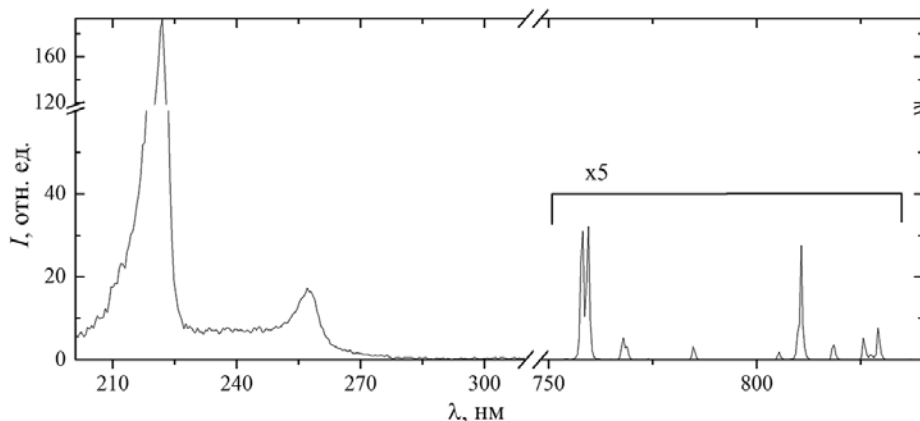


Рис. 2. Спектр излучения апокампа в смеси $\text{Kr}/\text{Cl}_2 = 30/1$ при $p = 30$ Торр, $h = 20$ мм, $\delta = 10$ мм, $f = 53$ кГц.

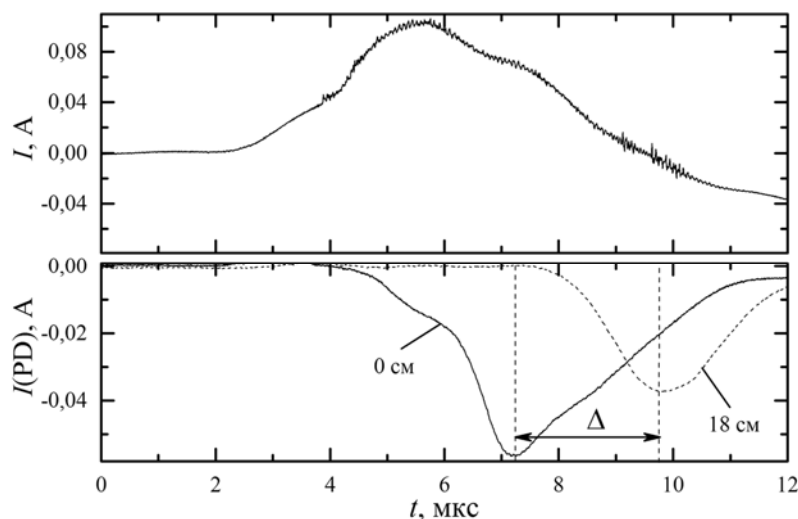


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда и импульсов излучения апокампа на различных высотах от основного разряда синхронизированные во времени. Δ – задержка сигнала с фотодиода $I(\text{PD})$ на высоте $h = 18$ см относительно сигнала из области основного разряда. Смесь $\text{Xe}/\text{Cl}_2 = 30/1$, $p = 30$ Торр, $f = 53$ кГц, $\delta = 45$ мм.

Таблица

Оценки скорости распространения волны ионизации апокампа до различных расстояний h от основного разряда при изменении давления смесей криптона и ксенона с хлором ($f = 53$ кГц, $\delta = 45$ мм)

Смесь и объёмное соотношение компонентов	Давление p , Торр	Высота h , мм	Оценка скорости v , км/с
Xe/Cl ₂ = 30/1	15	80	154
		150	59
	30	60	82
		90	7
		10	16
Kr/Cl ₂ = 30/1	15	85	170
	30	125	70

Заключение

В настоящей работе в смесях Хе-Cl₂ и Kr-Cl₂ впервые получены плазменные струи (апокампы), образующиеся на изгибе канала импульсно-периодического барьерного разряда. Экспериментально показано, что добавка электроотрицательного газа к инертному газу способствует формированию апокампа. Продемонстрирована возможность создания источника ультрафиолетового излучения на основе апокампа в средах, типичных для эксиламп емкостного и барьерного разрядов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

ЛИТЕРАТУРА

- Lin L., Wang Q. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. Vol. 35. No. 6. P. 925.
- Lu X., Naidis G. V., Laroussi M., Reuter S., Graves D. B., Ostrikov K. // Physics Reports. 2016. Vol. 630. No. 4. P. 1.
- 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.
- Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 5. С. 92.
- Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бакут Е. Х. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. Вып. 12. С. 857.
- Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. А., Тарасенко В. Ф. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 32.
- Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 855.
- Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 2. С. 15.
- Ломаев М. И., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Штиц Д. В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 21. С. 27.
- Ломаев М. В., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Штиц Д. В., Ерофеев М. В. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201.
- Sosnin E. A., Tarasenko V. F., Lomaev M. I. UV and VUV excilamps. – Saarbrücken: Deutschland / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. P. 318.
- Schreiber A., Kühn B., Arnold E., Schilling F.-J., Witzke H.-D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 3242.
- Avtaeva S. V., Sosnin E. A., Saggi B., Panarin V. A., and Rahmani B. // Plasma Physics Reports. 2013. Vol. 39. No. 9. P. 768.
- Teschke M., Kedzierski J., Finantu-Dinu E. G., Korzec D., Engemann J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. No. 2. P. 310.
- Lu X., Laroussi M. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. No. 6. P. 063302.
- Lacoste D. A., Bourdon A., Kuribara K., Urabe K., Stauss S., Terashima K. // Plasma Sources Sci. Tech. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 062006.

Formation of an apokamp in the dielectric barrier discharge in mixtures of xenon and krypton with molecular chlorine

E. A. Sosnin^{1,2}, V. A. Panarin¹, V. S. Skakun¹, V. F. Tarasenko^{1,2}, and V. S. Kuznetsov^{1,2}

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia

² Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Received January 18, 2017

The apokamp as a plasma jets formed on bending of the channel pulse-periodic barrier discharge has been obtained in mixtures of Xe-Cl₂ and Kr-Cl₂. The estimation of the propagation velocity of the apokamp ionization wave gives values in the range from units to hundreds of km/s. It has been shown that the addition of electronegative gas to inert gas facilitates the apokamp formation.

Keywords: apokamp, plasma jet, xenon, krypton, chlorine.

REFERENCES

1. L. Lin and Q. Wang, Plasma Chem. Plasma Process., **35**, 925 (2015).
2. X. Lu, G. V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D. B. Graves, and K. Ostrikov, Physics Reports, **630** (4), 1 (2016).
3. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsyn, and V. S. Kuznetsov, Tech. Phys., **61**, 789 (2016).
4. V. S. Skakun, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsyn, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, Russ. Phys. J., **59**, 707 (2016).
5. E. A. Sosnin, V. S. Skakun, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsyn, V. F. Tarasenko, and E. Kh. Baksht, JETP Letters., **103**, 761 (2016).
6. M. V. Andreev, V. S. Kuznetsov, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. A. Panarin, and V. F. Tarasenko, Prikl. Fiz., No. 6, 32 (2016).
7. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, and V. F. Tarasenko, Atmospheric and Oceanic Optics, **29**, 855 (2016).
8. V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, Optics and Spectroscopy, **122**, 168 (2017).
9. M. I. Lomaev, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, Tech. Phys. Lett., **25**, 858 (1999).
10. M. I. Lomaev, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko, D. V. Shitts, and M. V. Erofeev, Phys. Usp. **46**, 193 (2003).
11. E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko, and M. I. Lomaev, *UV and VUV Excilamps*. (Saarbrücken, Deutschland / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012). P. 318.
12. A. Schreiber, B. Kühn, E. Arnold, F.-J. Schilling, and H.-D. Witzke, J. Phys. D: Appl. Phys., **38**, 3242 (2005).
13. S. V. Avtaeva, E. A. Sosnin, B. Saghi, V. A. Panarin, and B. Rahmani, Plasma Physics Reports, **39**, 768 (2013).
14. M. Teschke, J. Kedzierski, E. G. Finantu-Dinu, D. Korzec, and J. Engemann, IEEE Trans. Plasma Sci., **33**, 310 (2005).
15. X. Lu and M. Laroussi, J. Appl. Phys., **100**, 063302 (2006).
16. D. A. Lacoste, A. Bourdon, K. Kuribara, K. Urabe, S. Stauss, and K. Terashima, Plasma Sources Sci. Tech., **23**, 062006 (2014).