

4. Dubois P., Rosset S., Niklaus M., Dadras M. Metal Ion Implanted Compliant Electrodes in Dielectric Electroactive Polymer (EAP) Membranes // *Advances in Science and Technology*. – 2008. – Vol. 61. – P. 18–25.

5. Kawashita M., Araki R., Takaoka G. H. Surface structure and apatite-forming ability of silicone rubber substrates irradiated by cluster ion beams // *Bioceramics*. – 2008. – V. 20. – P. 1–2.

6. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, G. Yu. Yushkov, I. G. Brown Upgraded vacuum arc ion source for metal ion implantation // *Review of scientific instruments*. – 2012. – V.83.

7. Motori A., Montanari G.C., Saccani A., Patuelli F. Electrical conductivity and polarization processes in nanocomposites based on isotactic polypropylene and modified synthetic clay // *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. – 2007. – V. 45. – P. 705–713.

## О ДИНАМИКЕ ИСТЕЧЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ УГЛЕРОДНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

*А.Я. Пак, к.т.н.,*

*И.И. Шаненков, аспирант гр. А4-45,*

*К.Н. Шатрова, студент гр. 5А1Д*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,*

*тел.(3822)-705-014*

*E-mail: Swordi@list.ru*

**Введение.** Получение ультрадисперсных материалов в высокоскоростных струях электроразрядной плазмы является многообещающим методом [1]. Его достоинством является возможность реализации сверхвысокой скорости охлаждения плазмы порядка  $10^7$  К/с, что позволяет получать редкие метастабильные в том числе, высокотемпературные кристаллические фазы [2-5]. Особый интерес среди них представляют кристаллические модификации нитрида углерода [6-8], которые могут применяться в качестве фотокатализаторов получения водорода из воды [9-14]. Согласно диаграммам состояний [15, 16] и мнения [17] перспективным путем получения гипотетических фаз нитрида углерода является генерация плазмы, содержащей атомы углерода и азота в условиях ограниченного объема и высоких давлений. В настоящей работе предложено решение этого вопроса путем реализации соударения высокоскоростных струй углеродсодержащей электроразрядной плазмы. Струи генерируются сильноточным импульсным коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ).

**Экспериментальная часть.** Подробно принцип действия ускорителя описан в работе [5]. Электропитание КМПУ1 и КМПУ2 осуществлялось от двух автономных накопителей энергии с  $C_1=C_2=12$  мФ при  $U_{зар}=2,75$  кВ. Расстояние между срезами УК составило  $l_{cc}=83$  мм. Процесс проводился в азотной атмосфере при давлении  $P_0=0,1$  атм. и комнатной температуре.

Энергетические параметры рабочего цикла КМПУ  $i(t)$ ,  $u(t)$  определялись с использованием цифровых осциллографов Tektronix TDS 1012 и Tektronix TDS 2012. Посредством умножения зависимостей  $i(t)$ ,  $u(t)$  строилась кривая мощности разряда  $p(t)$ , интегрированием которой определялся закон потребления энергии  $w(t)$ .

Динамика истечения сверхзвуковых плазменных потоков исследовалась по кадрам, полученным при помощи высокоскоростной фотоустановки ВФУ-1.

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 1 приведены типичные осциллограммы рабочего цикла обоих ускорителей. В таблице 1 приведены основные исходные данные (емкость ЕНЭ  $C$ , зарядное напряжение  $U_{зар}$ , расстояние между срезами стволов  $L_{сс}$ , давление азота в реакторе  $P_0$ , средние значения максимальных величин энергетических характеристик (максимальное напряжение на электродах  $U_m$ , ток импульса  $I_m$ , мощность разряда  $P_m$ , полная подведенная энергия  $W$ , удельная подведенная энергия на единицу объема УК  $W/V_{ук}$ ) и средняя по серии скорость на срезе ствола  $V_c$ .

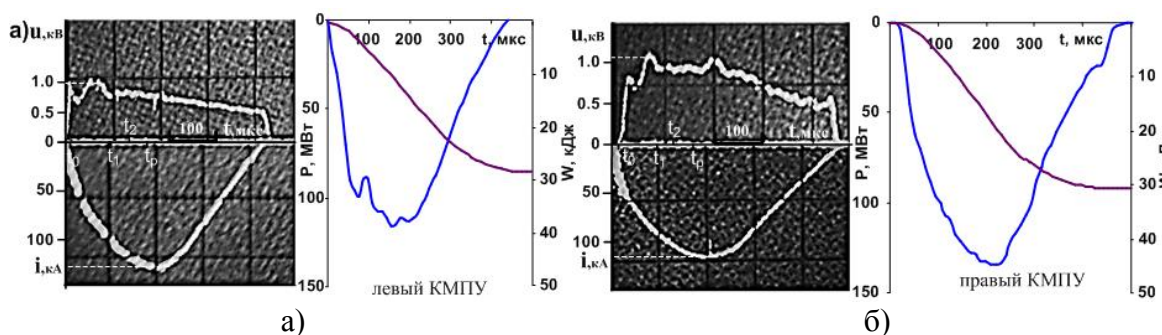


Рис. 1. Типичные осциллограммы  $u(t)$ ,  $i(t)$  а), кривые  $p(t)$  и  $w(t)$  б) плазменного выстрела одного из двух встречно направленных КМПУ.

Таблица 1. Средние значения основных параметров плазменных выстрелов КМПУ.

$P_0$ , атм	$L_{сс}$ , мм	$C$ , мФ	$U_{зар}$ , кВ	$U_m$ , кВ	$I_m$ , кА	$P_m$ , МВт	$W$ , кДж	$W/V$ , кДж/см <sup>3</sup>	$V_c$ , км/с
0,5	83	12	2,75	1,05	117,3	115,5	28,4	1,66	2,90

На рисунке 2 приведена типичная фотограмма истечения и взаимодействия двух встречных плазменных струй, генерируемых двумя синхронно работающими КМПУ. Сопоставление фотограмм и осциллограмм обеспечивалось с помощью искрового разрядника, срабатывание которого в заданный момент времени  $t_p$  фиксировалось на кадрах фотосъемки. В случае, показанном на рис. 2, выход ударных волн происходит практически одновременно и индуцированный скачок уплотнения формируется практически в центре промежутка между срезами стволов.

На представленной фотограмме хорошо видно образование индуцированного скачка уплотнения с повышенными  $P, t$ -параметрами, который возникает сразу после начала взаимодействия фронтов ударных волн встречных струй. В течение  $\sim 10,0$  мкс между выравнивающимися фронтами встречных ударных волн существует темная область, которая в дальнейшем начинает ярко светиться за счет повышения давления и температуры. Возникает индуцированный скачок уплотнения, в который поступает материал струи, а скорость массопереноса

переходит из сверхзвуковой в дозвуковую. Дискообразная область уплотнения, увеличивается в диаметре.

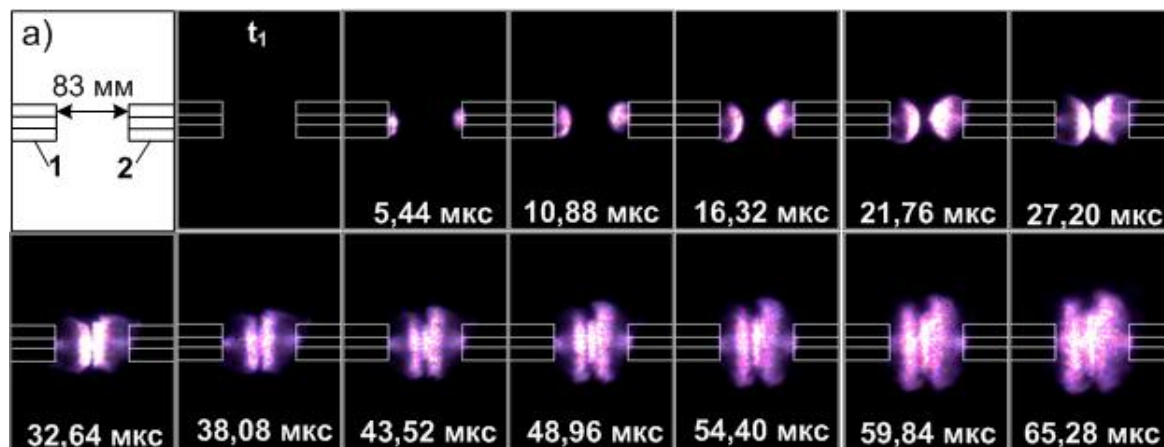


Рис. 2. Типичная фотограмма истечения и взаимодействия двух встречных плазменных струй.

Давление и температура в ней могут быть выше, чем в скачке уплотнения головных ударных волн каждой струи. Далее из индуцированного скачка уплотнения начинается сверхзвуковой разлет в азимутальной плоскости, перпендикулярной общей оси ускорительных каналов со скоростью превышающей скорость струй, истекающих из УК ускорителей. Время существования индуцированного скачка уплотнения составляет порядка 10-100 мкс. Поэтому существующие в ней  $P, t$ -параметры можно считать квазистационарными.

**Выводы.** Установка на основе двух КМПУ позволяет реализовать встречное взаимодействие гиперскоростных потоков плазмы, что в свою очередь, позволяет обеспечить квазистационарный режим истечения, в ходе которого плазма удерживается в мало изменяющемся объеме в пространстве между срезами стволов вдали от конструктивных элементов реактора.

*Авторы благодарят своего научного руководителя профессора Сивкова Александра Анатольевича. Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.*

### Список литературы:

1. Патент № 2431947 РФ. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель.
2. Sivkov A.A., Pak A.Y. On possible synthesis and crystalline structure of nanodisperse  $C_3N_4$  carbon nitride // Technical Physics Letters. – 2011. – Vol. 37. – № 7. – P. 654–656.
3. Sivkov A.A., Naiden E.P., Pak A.Y. Dynamic synthesis of ultradispersed crystalline phases of the C-N system // Journal of Superhard Materials. – 2009. – V. 31. – № 5. – P. 300–305.

4. Sivkov A.A., Pak A.Y., Nikitin D.S., Rakhmatullin I.A., Shanenkov I.I. Plasmodynamic synthesis of nanocrystalline structures in the C-N system // *Nanotechnologies in Russia*. – 2013. – V. 8. – № 7–8. – P. 489–494.
5. Pak A., Sivkov A., Shanenkov I., Rahmatullin I., Shatrova K. Synthesis of ultrafine cubic tungsten carbide in a discharge plasma jet // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – V. 48. – P. 51–55.
6. Goglio G., Foy D., Demazeau G. State of Art and recent trends in bulk carbon nitrides synthesis // *Materials Science and Engineering R*. – 2008. – № 58. – P.195–227.
7. Widlow I., Chung Y.-W. Synthesis and characterization of carbon nitride thin films // *International Materials Reviews*. – 2002. – V. 47. – № 3. – P.153–167.
8. Badzian A., Badzian T., Roy R., Drawl W. Silicon carbonitride, a new hard material and its relation to the confusion about ‘harder than diamond’  $C_3N_4$  // *Thin Solid Films*. – 1999. – № 354. – P.148–153.
9. Xu X., Liu G., Randorn C., Irvine J.T.S. g- $C_3N_4$  coated  $SrTiO_3$  as an efficient photocatalyst for  $H_2$  production in aqueous solution under visible light irradiation // *International Journal of hydrogen energy*. – 2011. – V. 36. – P.13501–13507.
10. Cui Y., Zhang J., Zhang G., Huang J., Liu P., Antonietti M., Wang X. Synthesis of bulk and nanoporous carbon nitride polymers from ammonium thiocyanate for photocatalytic hydrogen evolution // *Journal of Material Chemistry*. – 2011. – V. 21. – P.13032–13039.
11. Yan H., Chen Y., Xu S. Synthesis of graphitic carbon nitride by directly heating sulfuric acid treated melamine for enhanced photocatalytic  $H_2$  production from water under visible light // *International Journal of hydrogen energy*. – 2012. – V. 37. – P.125–133.
12. Kim M., Hwang S., Yu J.-S. Novel ordered nanoporous graphitic  $C_3N_4$  as a support for Pt-Ru anode catalyst in direct methanol fuel cell // *Journal of Material Chemistry* – 2007. – V. 17. – P. 1656–1659.
13. Hara Y., Minami N., Itagaki H. Synthesis and characterization of high-surface area tungsten carbides and application to electrocatalytic hydrogen oxidation // *Applied Catalysis A*. – 2007. – V. 323. – P.86–93.
14. Thomas A., Fischer A., Goettmann F., Antonietti M., Muller J.-O., Schlogl R., Carlsson J.M. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts // *Journal of Material Chemistry*. – 2008. – V. 18. – P. 4893–4908.
15. Одинцов В.В., Пепекин В.И. Оценка условий термодинамической стабильности и перспективы синтеза ковалентного нитрида углерода // *Доклады Академии наук*. – 1995. – Т. 343. – №2. – С. 210–213.
16. Fang L., Ohfuji H., Shinmei T., Irifune T. Experimental study on the stability of graphitic  $C_3N_4$  under high pressure and high temperature // *Diamond and Related Materials*. – 2011. – V. 20. – P.819–825.
17. Корсунский Б.Л., Пепекин В.И. На пути к нитриду углерода // *Успехи химии*. – 1997. – Т. 66. – №11. – С. 1003–1014.