

катодной струе при ее движении в дрейфовом промежутке.

С учетом всех отмеченных факторов можно полагать, что фактический ток многозарядных ионов непосредственно за анодом действительно на два порядка превосходит наблюдаемые величины и при амплитуде разрядного тока 10 кА составляет около 100 А, при этом число многозарядных ионов в импульсе достигает, соответственно, 10^{15} .

Заключение

Полученные результаты показывают, что низковольтный вакуумный искровой разряд может быть использован для нескольких приложений. Во-первых, в качестве источника плазмы для нанесения покрытий, свойства которых зависят от скорости ионов в процессе нанесения, в частности, для углеродных алмазоподобных пленок [12]. Кроме того, можно использовать такой источник для ассистированного плазменного напыления, при этом быстрая компонента (с энергией ионов до 10 кэВ) служит для обработки пленки, нанесенной основной компонентой.

Наконец, его можно использовать в качестве источника многозарядных ионов металлов для

первой ступени мощных ионных ускорителей. В этом случае большая величина среднего ионного заряда обеспечивает достижение ионами высоких энергий даже при умеренных ускоряющих напряжениях.

Литература

1. Brown I. G. Vacuum arc ion sources// Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. № 10. P. 3061.
2. Yushkov G. Y., Anders A., Oks E. M., Brown I. G.// J. Appl. Phys. 2002. V. 88. № 10. P. 5618.
3. Лунев В. М., Овчаренко В. Д., Хороших В. М.// ЖТФ. 1977. Т. 47. № 7. С. 1486.
4. Корон Е. Д., Плюмто А. А.// Там же. 1970. Т. 40. № 12. С. 2534.
5. Корон Е. Д., Плюмто А. А.// Там же. 1971. Т. 41. № 5. С. 1055.
6. Astrakhansev N. V., Krasov V. I., Paperny V. L.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2514.
7. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Paperny V. L.// Ibid. 1997. V. 30. № 4. P. 922.
8. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Паперный В. Л.// ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1404.
9. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Krinberg I. A., Paperny V. L.// Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. № 3. P. 313.
10. Месяц Г. А. Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука. 2000. — 424 с.
11. Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю.// ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 24.
12. Scheibe H.-J., Schultrich B., Ziegele H., Siemroth P.// Proc. XVIIth International symposium on discharge and electrical insulation in vacuum, Berkeley. USA. 1996. V. 2. P. 941.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Flow of the multiply charged metallic ions from low voltage vacuum spark

S. P. Gorbunov, V. I. Krasov, V. L. Paperny
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

A flow of cathode jet ions from a low voltage vacuum spark with discharge current being within a range of 1–10 kA has been studied experimentally. It was found that the plasma flow consists from two ion components. The main part presents the slow ions with the velocity under low discharge currents being closed to one of vacuum arcs. Velocity of the fast ion component is a few times more than one of the slow ions. Both the mean velocities and peaks of signals of both ion components increase with the discharge current. The fast ion component corresponds to beams of the multiply charged ions, that have been found by the authors earlier and their total amount approaches 10^{13} ions per a pulse at the mean ion charge being $Z = +9$ for copper ions.

УДК 533.9

Взрыв проволоки в воде. Результаты анализа порошка

В. П. Кортхонджия, В. Я. Кинцурашвили, Ц. И. Квирикашвили
Институт физики им. Э. Л. Андроникашвили Академии наук Грузии, Тбилиси, Грузия

Показано, что при взрыве проволоки в воде, когда имеет место экзотермическая химическая реакция, из-за выделения большого количества тепла происходит термическая ионизация продуктов реакции. Создается плотная плазма, и в системе образуется энергия, которая равна или больше энергии, запасенной в конденсаторной ба-

тареe вначале, и ее величина зависит от энергии, запасенной в конденсаторной батарее. Проведен анализ порошка, образующегося после взрыва проволоки в воде.

Электрический взрыв проволоки в воде мощным импульсом тока — один из способов создания импульсного давления [1, 2]. Как правило, материал проволоки вступает в химическую реакцию с водой, при этом образуются оксиды материала взрываваемой проволоки. Поскольку эти химические реакции с водой являются экзотермическими, выделяется большое количество тепла. Температура продуктов химической реакции порядка 10^4 К. Происходит термическая ионизация продуктов реакции, образуется плотная плазма. Последняя поляризуется, и в системе образуется энергия, которая больше или равна энергии, запасенной в конденсаторной батарее [3]. Численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения разряда дают значения, сопоставимые с энергией системы, которую она приобрела после взрыва проволоки. Этот эффект зависит от массы на единицу длины проволоки. В случае взрыва в воде молибденовой проволоки с массой $m = 0,44$ г эффект имеет место, а при $m = 0,22$ г эффект отсутствует — численное интегрирование осциллограмм тока и напряжения разряда дает значение энергии, равное энергии, запасенной в конденсаторной батарее (рис. 1).

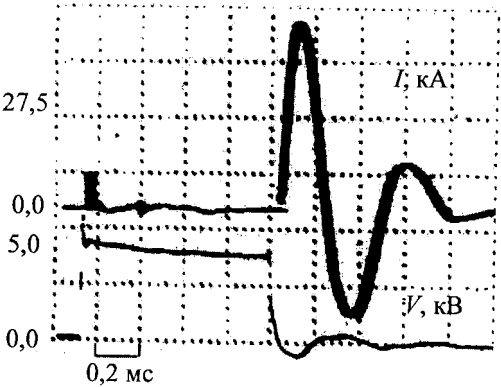


Рис. 1. Взрыв молибденовой проволоки массой 0,22 г в воде, $V = 5,0$ кВ

Интересно выяснить зависимость этой энергии $\Delta = E^z - E_0$, где E^z — энергия, полученная в результате численного интегрирования осциллограмм тока и напряжения разряда; E_0 — энергия, запасенная в конденсаторной батарее.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока и напряжения разряда при взрыве молибденовой проволоки в воде. Когда в конденсаторной батарее запасена энергия $E_0 = 24,0$ кДж, величина $\Delta = E^z - E_0 = 36,8$ кДж, а при $E_0 = 30,4$ кДж $\Delta = 47,0$ кДж. То же самое происходит при взрыве вольфрамовой проволоки в воде.

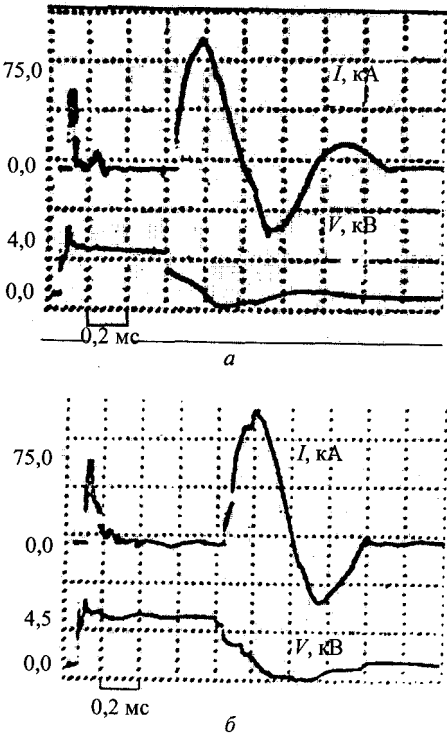


Рис. 2. Взрыв вольфрамовой проволоки в воде: а — $E_0 = 24,0$ кДж, $\Delta E = 36,8$ кДж; б — $E_0 = 30,4$ кДж, $\Delta E = 47,0$ кДж

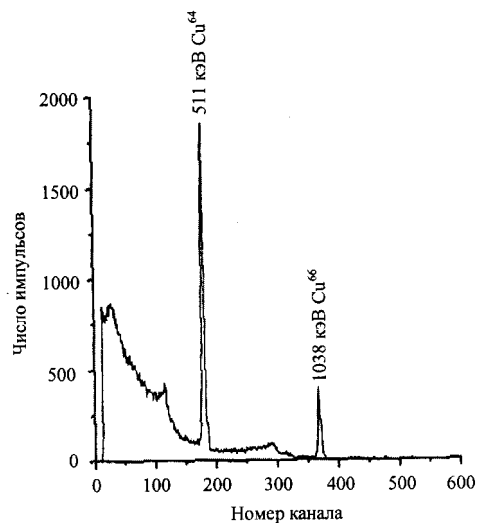
Следовательно, эта энергии растет с ростом энергии, запасенной в конденсаторной батарее.

Были проведены масс-спектрографический и нейтронно-активационный анализы порошка, образующегося после взрыва проволоки в дистиллированной воде. В таблице приведены результаты масс-спектрографического анализа порошка, полученного после взрыва свинцовой полоски в дистиллированной воде. Образовались новые атомы — алюминий, кремний, фосфор, хром, железо, медь, вольфрам, которых не было во взрываваемой свинцовой полоске. Аналогичное явление при взрыве титановой проволоки в дистиллированной воде при несколько отличающихся условиях наблюдалось в работе [4].

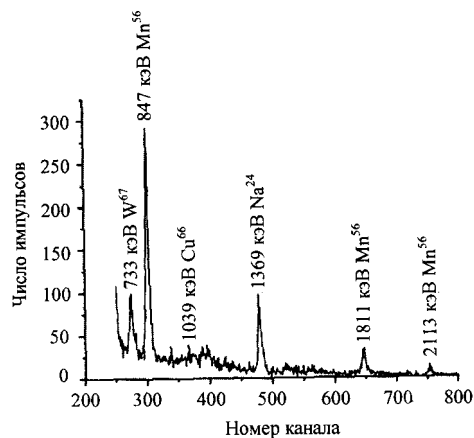
Элемент	Масса в полоске Pb, мкг/см ²	Концентрация масс в порошке, полученном после взрыва свинца
Al	0,2	1,82 %
Si	1,2	0,46 %
P	1,456	1,04 %
Ca	0,89	871,1 ppm
Ti		397,2 ppm
Cr		0,252 %
Mn		315,0 ppm
Fe	1,124	1,532 %
Ni		765,2 ppm
Cu	0,36	0,964 %
Zn		627,8 ppm
W		0,233 %
*O		14,063 %
Pb	1274,0	79,34 %

На рис. 3 и 4 приведены результаты нейтронно-активационного анализа взрыва в дистиллированной воде медной и вольфрамовой проволоки, соответственно. Образовались атомы на-

трия, алюминия, марганца, тантала, вольфрама в случае взрыва медной проволоки в воде и атомы алюминия, марганца, меди, тантала — в случае взрыва вольфрамовой проволоки в воде.



а

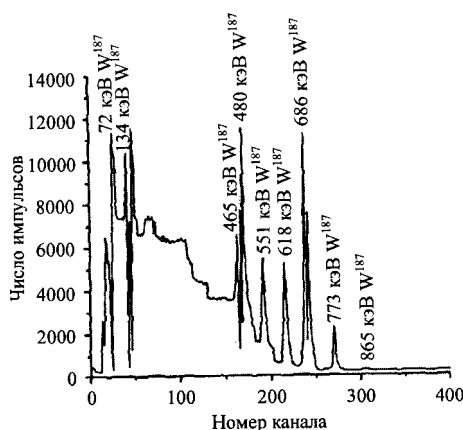


б

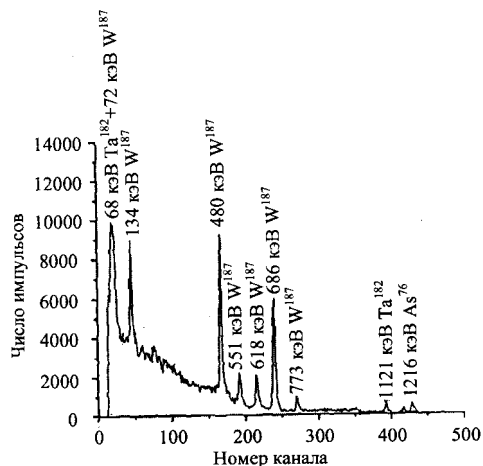
Рис. 3. Результаты нейтронно-активационного анализа взрыва меди в воде:

а — спектр медной проволоки; б — спектр порошка, полученный после взрыва меди.

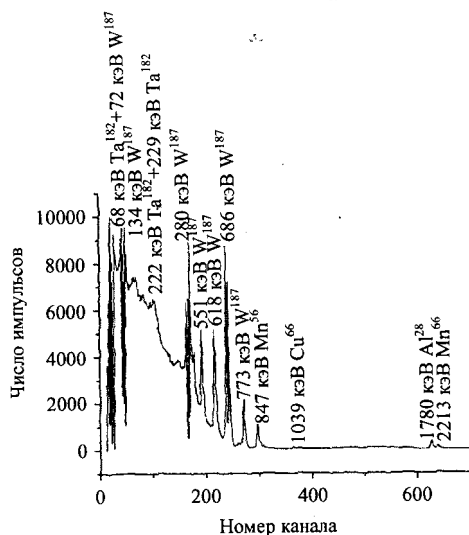
Спектр б получен через 4 ч после облучения порошка



а



б



в

Рис. 4. Результаты нейтронно-активационного анализа взрыва вольфрама в воде:

а — спектр вольфрамовой проволоки; б, в — спектры порошка, полученные после взрыва вольфрама.

Спектр б получен через 24 ч после облучения порошка, спектр в — через 2 ч после облучения порошка

Выводы

Облучение проволок и порошков, полученных после взрыва в дистиллированной воде, производилось одновременно. Облучение нейтронами производилось с помощью нейтронного разнотелителя с потоком тепловых нейтронов порядка $3 \cdot 10^6$ нейтр/см²·с. Подбиралось время облучения проволок, а время выдержки порошка до анализа определялось так, чтобы получить максимальную информацию.

Была взорвана вольфрамовая проволока в воздухе. На рис. 5 приведены осциллограммы тока и напряжения разряда. Их численное интегрирование дает $E^{\Sigma} = 30,0$ кДж до $t = 0,4$ мс, когда напряжение обращается в нуль.

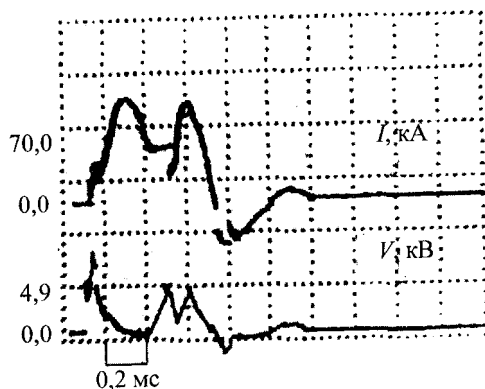


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения взрыва вольфрама в воздухе. $E_0 = 36,0$ кДж

Этот результат отличается от того, что имеет место при взрыве той же проволоки в воде. Как и в случае взрыва в воде, при взрыве в воздухе имеют место химическая реакция и поляризация плазмы, но при взрыве в воде происходят другие явления, чем и вызвана разница между этими двумя результатами.

При взрыве проволоки в воде:

- в разряде выделяется больше энергии, чем запасено в конденсаторной батарее. Эта энергия растет с ростом энергии, запасенной в конденсаторной батарее;
- эффект выделения большей энергии, чем запасено в конденсаторной батарее, имеет пороговый характер. Если масса на единицу длины взрывающейся в воде проволоки меньше определенного значения, в разряде выделяется та же энергия, которая запасена в конденсаторной батарее;
- при взрыве проволоки в воде образуются новые атомы, которых не было в материале взрывающейся проволоки.

Авторы приносят благодарность
проф. З. Саралидзе, доктору физ.-мат. наук
В. Бережиани, доктору физ.-мат. наук
Л. И. Уруцкоеву за конструктивную критику
и полезную дискуссию.

Литература

1. Кортхонджия В. П., Мдивнишвили М. О., Тактакишвили М. И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 41—43.
2. Кортхонджия В. П., Мдивнишвили М. О. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 13. С. 10—14.
3. Кортхонджия В. П. // Там же. 2003. Т. 29. Вып. 19. С. 13—20.
4. Уруцкоев Л. И., Ликсонов В. И., Циноев В. Г. // Прикладная физика. 2000. № 4. С. 83—100.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Explosion of a wire in water. Results of the analysis of a dust

V. P. Kortkhonjia, V. Ya. Kintsurashvili, Ts. I. Kvirikashvili
Institute of Physics, Tbilisi, Georgia

It is shown that at explosion of a wire in water, when the exothermic chemical reaction takes place, there is a thermal ionization of reaction products because of education of a great many of heat. The dense plasma is formed, and the system gains energy, which is about or more than energy accumulated in the bank of capacitors in the beginning. The quantity of this energy depends on the energy accumulated in the bank of capacitors. Account is taken of a dust generated after explosion of the wire in water.