

УДК 537.525.5

В.П. Фролова, Н.А. Прокопенко, П.П. Кизириди

Генерация ионных пучков в вакуумном дуговом ионном источнике с двухкомпонентным катодом

Ионные источники находят широкое применение для пучковой модификации свойств различных поверхностей методом «металлургической» ионной имплантации. Использование в вакуумных дуговых источниках металлических ионов многокомпонентных катодов позволяет получать пучки сложного состава, что расширяет их технологические возможности. В работе представлены исследования параметров широкоапертурного ионного пучка, генерируемого в вакуумном дуговом ионном источнике с двухкомпонентным катодом из медно-хромового композита. Показано, что распределение зарядовых состояний ионов меди и хрома в пучке зависит от их соотношения в материале катода, а доли этих ионов в пучке соответствуют их атомарному содержанию в катоде.

Ключевые слова: вакуумный дуговой ионный источник, многокомпонентные ионные пучки, медно-хромовый композит.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-119-122

Вакуумные дуговые ионные источники ионов металла [1–4] широко используются для улучшения свойств поверхности [5–7]. Применение многокомпонентных катодов позволяет получать в таких источниках пучки ионов сложного состава [8, 9], что расширяет технологические возможности этих устройств.

Бинарные соединения металлов отличаются высокой прочностью, коррозионной стойкостью при высоких теплопроводности и электропроводности, причем эти свойства сохраняются до температуры уровня 1000 К [10]. Вместе с тем в расплавленном состоянии эти металлы практически не смешиваются, а следовательно, не образуют сплава в широком диапазоне соотношения их концентраций [11]. В нормальных условиях соединение меди и хрома находится в состоянии твердого раствора, в котором эти элементы распределены неравномерно: хром образует в медной матрице отдельные «островки», имеющие, в зависимости от его концентрации, размеры от 20 (3% хрома) до 500 нм (50% хрома), которые при высокой концентрации хрома (> 50%) сливаются между собой, образуя слоистую структуру [12].

При «металлургической» ионной имплантации проникновение ускоренного иона в поверхность твердого тела происходит вследствие его высокой кинетической энергии. Поэтому медь и хром в поверхностном неравновесном сплаве, полученном методом ионной имплантации, могут иметь однородное распределение атомов по поверхности. Получение таких слоев представляется важным для ряда практических применений, где основным элементом воздействия выступает поверхность, например для электродов вакуумного выключателя [13]. Получение таких имплантированных слоев возможно с помощью ионного пучка вакуумного дугового источника с композитным катодом на основе меди и хрома [8]. Вместе с тем практическое применение таких пучков требует проведения детального исследования его параметров и масс-зарядового состава. Экспериментальному изучению этого вопроса посвящена настоящая работа.

Методика и техника эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки на базе вакуумного дугового ионного источника Mevva-V.Ru [2] представлена на рис. 1. Разряд зажигался между торцом цилиндрического катода диаметром 6,3 мм, выполненного из композита на основе CuCr, и полым анодом с внутренним диаметром 14 см. Расстояние между катодом и перфорированным торцом анода, являющимся эмиссионным электродом многоапертурной ускоряющей ионно-оптической системы, составляло 15 см. В качестве материалов катода использовались два композита с различным соотношением доли атомов меди и хрома. Первый, в котором доли атомов меди и хрома были одинаковы, и второй, в котором доля меди составляла 70%, а хрома – 30% (далее – CuCr-50/50 и CuCr-70/30 соответственно).

Инициирование импульса тока дуги с амплитудой в сотни ампер и длительностью 250 мкс осуществлялось вспомогательным разрядом по поверхности керамики, разделяющей «поджигающий» электрод и катод, при приложении между этими электродами импульса напряжения амплитудой 14 кВ и длительностью около 10 мкс. При горении разряда плазма материала катода заполняла анодную полость, и с её поверхности, ограниченной эмиссионным электродом, велся отбор ионов [14] и формировался ускоренный ионный пучок диаметром 10 см. Максимальное ускоряющее напряжение ионного источника составляло 60 кВ. Масс-зарядовый состав этого пучка анализировался при помощи времяпролетного масс-спектрометра [15]. Рабочее давление в экспериментах, обеспечиваемое криогенной высоковакуумной и безмасляной форвакуумной откачками, составляло уровня 10^{-6} Торр.

Результаты и их обсуждение

Осциллограммы импульса ионного тока на подвижный магнитоизолированный цилиндр Фарадея, который в своем центральном положении регистрировал около 1/7 от полного тока пучка, и соответствующего этому импульсу импульса тока дуги представлены в случае катода CuCr-50/50 на рис. 2. При приведенном на рис. 2 токе дуги амплитудой около 800 А амплитуда полного тока ионного пучка составляла около 1 А.

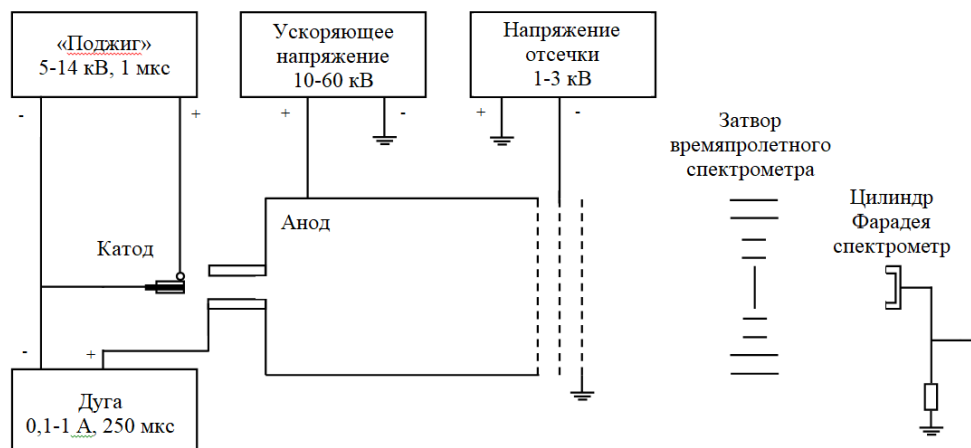


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки на базе вакуумного дугового ионного источника Mevva-V.Ru

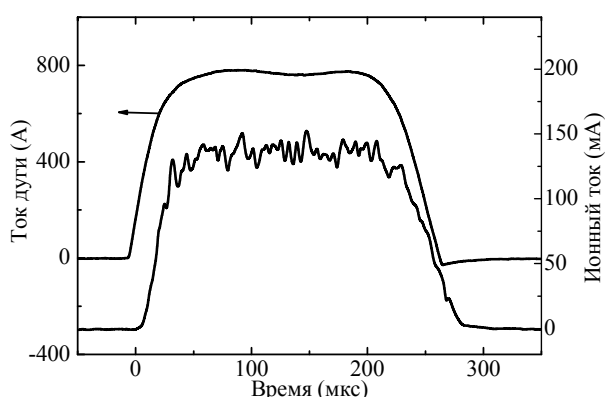


Рис. 2. Ток разряда и соответствующий ему ионный ток пучка на цилиндр Фарадея для сплава меди и хрома CuCr-50/50

Масс-зарядовый спектр состава ионного пучка в случае катода CuCr-50/50, при ускоряющем напряжении 30 кВ и амплитуде тока дуги 800 А, измеренный через 150 мкс после начала импульса, представлен на рис. 3. Видно, что максимальные зарядовые состояния ионов как меди, так и хрома достигали $3+$, а их минимальные зарядовые состояния были $-1+$. Следует отметить, что вследствие низкого остаточного давления в пучке практически отсутствуют ионы газовых примесей [16].

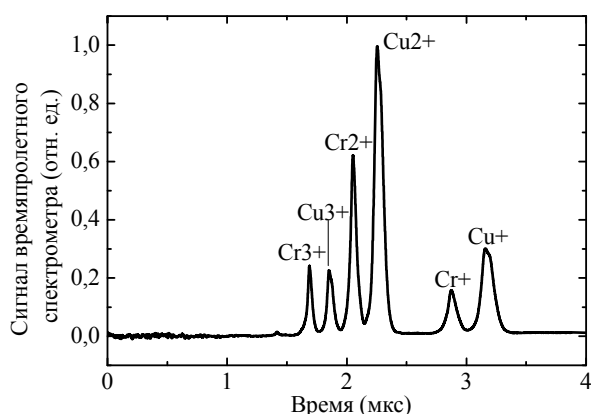


Рис. 3. Спектр состава ионного пучка в случае катода CuCr-50/50. Ток дуги – 800 А. Момент измерения – через 150 мкс после начала импульса

Зависимости среднего зарядового состояния ионов меди и хрома в пучке для двух материалов катодов представлены на рис. 4. Из зависимостей следует, что в начальный момент импульса пучка доля более высокозарядных ионов больше. По-видимому, это связано с более высоким напряжением горения разряда в начальный период импульса разряда. В дальнейшем, после примерно 150 мкс горения разряда, все зависимости выходят в насыщение и состав ионного пучка практически не изменяется.

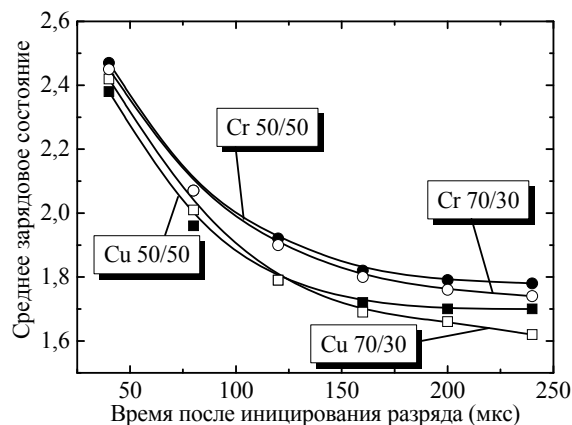


Рис. 4. Зависимости средней зарядности ионов меди и хрома в пучке от длительности после начала импульса для катодов из CuCr-50/50 и CuCr-70/30. Амплитуда тока дуги 500 А

Отметим также, что средний заряд ионов каждого элемента, а соответственно и распределение ионов этого элемента по зарядовым состояниям, слабо изменяется при изменении материала катода. Это свидетельствует о том, что распределение ионов по зарядовым состояниям в основном определяется не соотношением этих элементов в катоде, а напряжением горения разряда, а следовательно, температурой электронов разряда и распределением потенциалов многократной ионизации каждого элемента. Это объясняет факт отсутствия в первые 50 мкс после начала импульса пучка ионов Cu^{4+} , но наличия в нем ионов Cr^{4+} : потенциал ионизации первых ионов – 75,5 эВ, вторых – 54,4 эВ [17], и температуры

электронов разряда даже в начале импульса недостаточно для появления в ней заметной доли ионов Cu^{4+} [18].

Относительная доля иона каждого типа в пучке определялась по площади его пика, нормированной на зарядность, отнесенной к сумме нормированных площадей пиков всех типов ионов. Зависимости отношения количества ионов (в частицах) меди и хрома в пучке от тока разряда представлены на рис. 5.

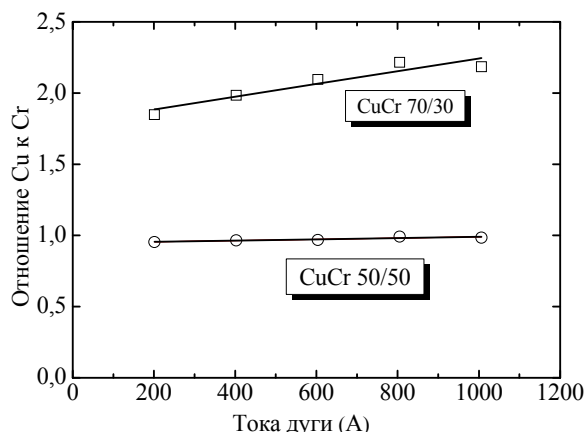


Рис. 5. Зависимости отношения меди к хрому в ионном пучке от тока разряда для катодов CuCr-50/50 и CuCr-70/30. Момент измерения состава ионного пучка – 150 мкс после инициирования дуги, остаточное давление – $1 \cdot 10^{-6}$ Торр

Из зависимостей следует, что в случае катода CuCr-50/50 отношение ионов меди к хрому равно 1:1 во всем диапазоне токов и совпадает с отношением атомов этих элементов в материале катода. В случае катода CuCr-70/30 при увеличении тока дуги доля ионов меди к хрому увеличивается, но в среднем составляет 2,1:1, что также близко (2,3:1) к указанному выше отношению. Таким образом, можно утверждать, что доля ионов меди и хрома в пучке вакуумного дугового ионного источника с композитным катодом на основе этих элементов определяется стехиометрическим составом катода.

Заключение

На примере катодов на основе медно-хромового композита показано, что в пучке вакуумного дугового ионного источника с катодами, выполненными из двух элементов, соотношение ионов этих элементов соответствует их атомарному соотношению в материале катода, а среднее зарядовое состояние ионов каждого элемента в пучке определяется распределением потенциалов многократной ионизации этого элемента. В вакуумном дуговом источнике с катодами на основе медно-хромового композита получены широкоапертурные (100 см^2) импульсные (250 мкс) ионные пучки с током уровня 1 А при ускоряющем напряжении до 60 кВ, которые могут использоваться для создания а поверхности твердого тела слоев меди и хрома с гомогенным распределением атомов этих элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-38-00350 мол.а.

Литература

1. Brown I. Some Vacuum-Arc-Based Plasma and Ion Beam Tools for Surface Modification // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 7–13.
2. Current status of plasma emission electronics: II hardware / A.S. Bugaev, A.V. Vizir, V.I. Gushenets et al. // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 139–156.
3. Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field / A.G. Nikolaev, E.M. Oks, P.M. Schanin, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 1996. – Vol. 67, No. 3. – P. 1213–1215.
4. The «TITAN» ion source / S.P. Bugaev, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, P.M. Schanin, G.Y. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 1994. – Vol. 65, No. 10. – P. 3119–3125.
5. Фазовое состояние титановых материалов после имплантации ионами алюминия / И.А. Курзина, Н.А. Попова, М.П. Калашников и др. // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11-3. – С. 112–119.
6. Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application / A. Nikolaev, E.M. Oks, K. Savkin et al. // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201, No. 19-20. – P. 8120–8122.
7. Current status of plasma emission electronics: I. Basic physical processes / V.I. Gushenets, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, N.G. Rempe // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 123–138.
8. Generation of multicomponent ion beams by a vacuum arc ion source with compound cathode / K.P. Savkin, Yu.G. Yushkov, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Vol. 81, No. 2. – P. 02A501.
9. Angular distribution of ions in vacuum arc plasma with single-element and composite cathode / A.G. Nikolaev, G.Y. Yushkov, K.P. Savkin, E.M. Oks // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 8. – P. 1923–1928.
10. Шухардина С.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. – М.: Наука, 1979. – 248.
11. Chakrabarti D.J. The Cr-Cu (Chromium-Copper) system / D.J. Chakrabarti, D.E. Laughlin // Journal of Phase Equilibria. – 1984. – Vol. 5, No. 1. – P. 59–68.
12. URL: <https://www.plansee.com/en/products/components/electrical-contacts/copper-chromium-cucr.html> (дата обращения: 27.11.2018).
13. The features of 0.4 kV motor interruption by a vacuum contactor with different contact materials / A.M. Chaly, A.T. Chalaya, I.N. Poluyanov, V. Poluyanov // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV): Proceedings XVIII international symposium. – Eindhoven, Netherlands, 1998. – Vol. 2. – P. 435–438.
14. «ТИТАН» – источник газовых и металлических ионов на основе контрагированного разряда и вакуумной дуги / С.П. Бугаев, Е.М. Окс, П.М. Щанин, Г.Ю. Юшков // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 37, № 3. – С. 53–65.
15. Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization / V.I. Gushenets, A.G. Nikolaev, E.M. Oks et al. // Review of Scientific Instruments. – 2006. – Vol. 77, No. 6. – P. 063301.
16. Николаев А.Г. Влияние остаточного газа на зарядовое распределение ионов в плазме вакуумного дугового разряда / А.Г. Николаев, Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68, № 9. – С. 24–28.
17. Calculated ionization potentials for multiply charged ions / T.A. Carlson, C.W. Nestor, N. Wasserman, J.D. McDowell // Atomic data. – 1970. – Vol. 2. – P. 63–99.
18. Фролова В.П. Генерация многозарядных и многокомпонентных импульсных ионных пучков на основе сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2018. – 135 с.

Фролова Валерия Петровна

Мл. науч. сотр. ТУСУР*, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН**

*Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050

**Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055

Тел.: +7 (382-2) 49-17-76

Эл. почта: Frolova_Valeria_90@mail.ru

Прокопенко Никита Андреевич

Аспирант ИСЭ СО РАН

Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055

Тел.: +7 (382-2) 49-17-76

Эл. почта: nick08_phantom@mail.ru

Кизириди Павел Петрович

Мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН

Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055

Тел.: +7 (382-2) 49-17-76

Эл. почта: kiziridi_pavel@mail.ru

Frolova V.P., Prokopenko N.A., Kiziridi P.P.

Generation of ion beams in a vacuum arc ion source with a two-component cathode

Ion sources are widely used for beam modification of the various surfaces properties by the method of «metallurgical» ion implantation. Use of metallic ions of multicomponent cathodes in vacuum arc sources allows to obtain complex composition beams, which expands their technological capabilities. This paper presents studies of a wide-aperture ion beam parameters generated in a vacuum arc ion source with a two-component cathode of a copper-chromium composite. It is shown that charge states distribution of copper and chromium ions in a beam depends on their ratio in the cathode material, and the fractions of these ions in the beam correspond to their atomic content in the cathode.

Keywords: vacuum arc ion source, multicomponent ion beams, copper-chromium composite.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-119-122

References

1. Brown I. Some Vacuum-Arc-Based Plasma and Ion Beam Tools for Surface Modification. *Doklady TUSUR*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 7–13 (in Russ.).
2. Bugaev A.S., Vizir A.V., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Burachevsky Yu.A., Burdovitsin V.A., Osipov I.V., Rempe N.G. Current status of plasma emission electronics: II hardware. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, no. 2, pp. 139–156.
3. Nikolaev A.G., Oks E.M., Schanin P.M., Yushkov G.Yu. Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field. *Review of Scientific Instruments*, 1996, vol. 67, no. 3, pp. 1213–1215.
4. Bugaev S.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Schanin P.M., Yushkov G.Y. The «TITAN» ion source. *Review of Scientific Instruments*, 1994, vol. 65, no. 10, pp. 3119–3125.
5. Kurzina I.A., Popova N.A., Kalashnikov M.P. et al. Phase state of titanium materials after implantation with aluminum ions. *Isvestiia vusshikh ychebnich zavedenii. Fizika*, 2011, vol. 54, no. 11-3, pp. 112–119 (in Russ.).
6. Nikolaev A., Oks E.M., Savkin K., Yushkov G.Yu., Brenner D.J., Johnson G., Randers-Pehrson G., Brown I.G., MacGill R.A. Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, no. 19-20, pp. 8120–8122.
7. Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G. Current status of plasma emission electronics: I. Basic physical processes. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, no. 2, pp. 123–138.

8. Savkin K.P., Yushkov Yu.G., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu. Generation of multicomponent ion beams by a vacuum arc ion source with compound cathode. *Review of Scientific Instruments*, 2010, vol. 81, no. 2, pp. 02A501.

9. Nikolaev A.G., Yushkov G.Y., Savkin K.P., Oks E.M. Angular distribution of ions in vacuum arc plasma with single-element and composite cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 8, pp. 1923–1928.

10. Shuchardina S.V. *Dvoynye I mnogokomponentnye sistemy na osnove medi*. Moskva, Nauka, 1979. 248 p. (in Russ.).

11. Chakrabarti D.J., Laughlin D.E. The Cr-Cu (Chromium-Copper) system. *Journal of Phase Equilibria*, 1984, vol. 5, no. 1, pp. 59–68.

12. URL: <https://www.plansee.com/en/products/components/electrical-contacts/copper-chromium-cucr.html> (assessed: 27 November 2018).

13. Chaly A.M., Chalaya A.T., Poluyanov I.N., Poluyanov V. The features of 0.4 kV motor interruption by a vacuum contactor with different contact materials. *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Proceedings XVIII international symposium, Eindhoven, Netherlands, 1998, vol. 2, pp. 435–438.

14. Bugaev S.P., Oks E.M., Shchanin P.M., Yushkov G.Y. «Titan» a source of gas and metal ions based on a contracted discharge and vacuum arc. *Russian Physics Journal*, 1994, vol. 37, no. 3, pp. 245–254.

15. Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M. et al. Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization. *Review of Scientific Instruments*, 2006, vol. 77, no. 6, pp. 063301.

16. Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu. Effect of residual gas on the ion charge distribution in vacuum arc discharge plasmas. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 43, no. 9, pp. 1031–1034.

17. Carlson T.A., Nestor C.W., Wasserman N., McDowell J.D. Calculated ionization potentials for multiply charged ions. *Atomic data*, 1970, vol. 2, pp. 63–99.

18. Frolova V.P. Generatsiia mnogozaryadnykh I mnogokomponentnykh impulsnykh ionnykh puchkov na osnove silnotochnoi vakyymnoi dugi miklosekundnoi glitelnosti [Generation of multiply charged and multicomponent pulsed ion beams based on a high-current microsecond vacuum arc. Cand. Diss.] Tomsk, 2018. 135 p. (in Russ.).

Valeria P. Frolova

Junior Researcher, University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)*, Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS**

*40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

**2/3, Akademicheskoy av., Tomsk, Russia, 634055

Phone: +7 (382-2) 49-17-76

Email: Frolova_Valeria_90@mail.ru

Nikita A. Prokopenko

PhD student, Institute of High Current Electronics SB RAS 2/3, Akademicheskoy av., Tomsk, Russia, 634055

Phone: +7 (382-2) 49-17-76

Email: nick08_phantom@mail.ru

Pavel P. Kiziridi

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS 2/3, Akademicheskoy av., Tomsk, Russia, 634055

Phone: +7 (382-2) 49-17-76

Email: kiziridi_pavel@mail.ru