

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 539.01.07

И. Н. Ефимов, доктор технических наук, профессор;*Е. А. Морозов*, доктор технических наук

Чайковский технологический институт (филиал)

Ижевского государственного технического университета

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ТОКА
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Рассмотрена возможность значительного увеличения тока жидкометаллического автоэмиссионного ионного источника на основе использования линейно протяженного анода.

Ключевые слова: ионный источник, ионная пушка, автоэмиссионный ионный источник

Научный эксперимент и промышленные технологии, использующие прецизионное воздействие на поверхность материала высокоэнергетичных ионных потоков, заинтересовывают в значительном повышении рабочих параметров используемых ионных источников [1].

Важнейшими параметрами, характеризующими ионный источник, является значение получаемого ионного тока, а также его отношения к эмитирующему ионы объему (поверхности) или, что то же, яркость источника. В настоящее время наибольшую яркость имеют жидкометаллические автоэмиссионные источники ионов [2], в основе которых лежит эффект эмиссии ионов с поверхности жидкого металла под действием сильного электростатического поля. Такие источники позволяют получить ионные потоки с энергией 4–10 кэВ, током до 100 мкА и размером фокусного пятна ионов на поверхности менее 0,5 мкм. Другим важным достоинством указанных источников является высокая однородность по энергетическому составу ионов в пучке.

В данной работе исследована возможность значительного повышения тока источника без существенного уменьшения его яркости. Известные конструкции жидкометаллических ионных источников устроены следующим образом (рис. 1). Игла (1) с радиусом закругления 1–10 мкм, проходящая через прилегающий капилляр (2), другим концом погружена в резервуар с жидким металлом (3). Материал иглы выбран таким образом, чтобы жидкий металл смачивал его, но не вступал в химическую реакцию. Вследствие действия капиллярных сил металл движется вверх по выступающему концу иглы к ее вершине. На небольшом расстоянии от конца иглы располагается вытягивающий электрод. Между иглой (анодом) и вытягивающим электродом (катодом) (4) создается разность потенциалов от 4 до 10 кВ. Вблизи конца острия концентрируются значительные потоки электростатического поля, которые приводят к эмиссии заряженных ионов с поверхности пленки жидкого металла. Ионы вытягиваются через круглое отверстие в катоде и создают ионный поток (5) с указанными выше параметрами.

Из приведенных в работе [2] результатов следует, что увеличение разности потенциалов ведет к приблизительно линейному возрастанию тока ионного источника. Поэтому технически достижимые значения используемого потенциала не могут привести к значительному возрастанию тока.

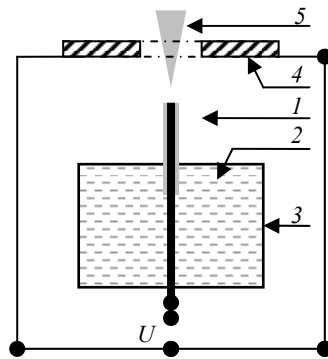


Рис. 1. Схема жидкометаллического ионного источника: 1 – игла (анод); 2 – капилляр; 3 – резервуар с жидким металлом; 4 – вытягивающий электрод (катод); 5 – поток ионов

Другим способом повышения тока является увеличение площади излучающей поверхности анода при тех же значениях ее яркости. Однако увеличение радиуса закругления острия иглы ведет к уменьшению поверхностной плотности потока электростатического поля на поверхности острия и, как следствие, к уменьшению яркости источника, вплоть до полного прекращения эмиссионного эффекта. Очевидно, что основная причина снижения эмиссионного эффекта заключается в квадратичном увеличении площади эмитирующей поверхности при линейном возрастании длины кромки отверстия катода, где сосредоточена основная часть его заряда. Следовательно, требуется найти способ линейного увеличения площади эмитирующей поверхности и характерной длины кромки отверстия катода. Этого можно достичь, используя конструкцию линейно протяженного жидкометаллического ионного источника, в котором вместо иглы используется тонкая пластина в виде лезвия бритвы. Вытягивающее отверстие катода в этом случае должно быть выполнено в виде прямоугольника, расположенного над кромкой лезвия.

Проанализируем приведенные эвристические соображения. Для этого исследуем возможность протекания эмиссионного эффекта с пленки жидкого металла на закруглении кромки лезвия. Хотя сам механизм ионизации недостаточно ясен [2], в качестве условия начала эмиссии можно предположить достижение критической плотности заряда на поверхности металла. Покажем, что использование пластины вместо иглы, при прочих равных условиях, не приводит в первом приближении к существенному уменьшению плотности заряда на эмитирующей поверхности. Для этого предварительно уточним упомянутое равенство условий. Будем предполагать равными радиусы закругления иглы и кромки лезвия для эмитирующих электродов. Далее, будем считать равными разности потенциалов между электродами, а также расстояния от закруглений иглы и кромки лезвия до кромки отверстия катода.

Допустим, что острие иглы представляет собой полусферу радиуса R с поверхностью площади S_1 , а кромка лезвия – полуцилиндр того же радиуса R , длиной Z и площадью боковой поверхности S_2 . Пусть E_1, E_2 – напряженности поля, а Q_1, Q_2 – заряды на выбранных поверхностях. Если в качестве допущения пренебречь потоком вектора напряженности через торцы полуцилиндра, а также учесть, что внутри металла поток поля равен нулю, то на основании закона Гаусса для электростатического поля на поверхности закругления иглы и кромки лезвия можно записать:

$$\int_{S_1} E_1 ds = \frac{Q_1}{\varepsilon_0}, \quad \int_{S_2} E_2 ds = \frac{Q_2}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная.

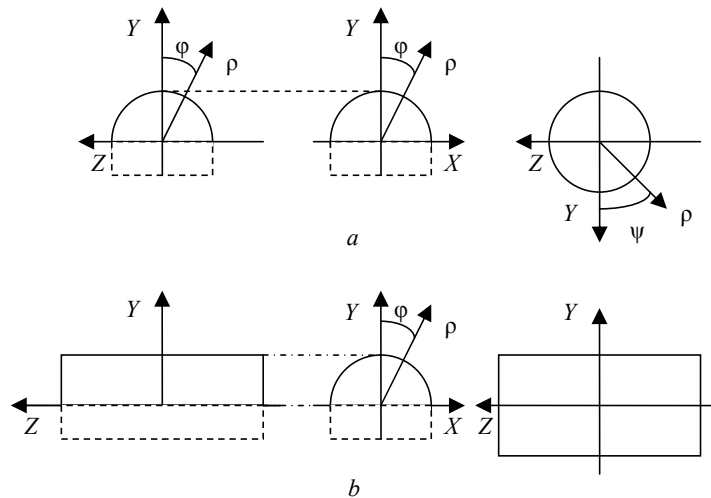


Рис. 2. Сферическая система координат для полусферы a и цилиндрическая система координат полуцилиндра b

Для случая интегрирования по поверхности полусферы выбираем сферическую систему координат (ρ, φ, ψ) (рис. 2, a), для интегрирования по поверхности полуцилиндра выбираем цилиндрическую систему координат (ρ, φ, z) (рис. 2, b) с осью OZ , направленной вдоль оси цилиндра и началом в его центре.

Считаем, что системы согласованы, т. е. начала координат и координатные линии ρ, φ в них совпадают.

Поскольку анод представляет собой поверхность металла, то напряженность поля на поверхностях S_1, S_2 будет иметь перпендикулярное направление. Далее, из соображений симметрии следует, что распределение напряженности на поверхности обоих анодов при фиксированном радиусе R будет функцией только угла φ :

$$E_1 = E_1(R, \varphi),$$

$$E_2 = E_2(R, \varphi).$$

Принимая во внимание равенство приложенной к электродам разности потенциалов, получим:

$$E_1(R, \varphi) = E_2(R, \varphi) := E(\varphi).$$

С учетом выбранных систем координат, из выражений (1) следует:

$$\int_{S_1} E_1 ds = \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} E(\varphi) R d\varphi \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} R d\psi = \pi R \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} E(\varphi) R d\varphi = \frac{Q_1}{\varepsilon_0}$$

$$\int_{S_1} E_2 ds = \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} E(\varphi) R d\varphi \int_{-0,5Z}^{0,5Z} z dz = Z \cdot \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} E(\varphi) R d\varphi = \frac{Q_2}{\epsilon_0}.$$

Найдем отношение зарядов на анодах:

$$\frac{Q_2}{Z} = \frac{Q_1}{\pi \cdot R}.$$

Определим среднюю поверхностную плотность зарядов в случае сферической и цилиндрической поверхности:

$$\sigma_1 = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{Q_1}{2 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad \sigma_2 = \frac{Q_2}{S_2} = \frac{Q_2}{\pi \cdot R \cdot Z}.$$

Таким образом, с учетом принятых допущений, отношение значений средней плотности заряда на поверхности анода, выполненного в форме острого иглы, и анода, выполненного в форме кромки лезвия, в принятом приближении, составляет

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64.$$

Следовательно, плотности имеют один и тот же порядок, что подтверждает результат, полученный выше на основе качественного анализа.

Учитывая техническую возможность значительного повышения разности потенциалов, по сравнению с приведенными выше значениями, можно с большой долей вероятности утверждать о получении эмиссионного эффекта с пленки жидкого металла на кромке лезвия анода.

В заключение заметим, что в рамках принятых допущений линейно протяженный жидкометаллический ионный источник, выполненный на основе использования анода в форме лезвия, будет обладать той же яркостью, что и источник, выполненный на основе иглы. Отсюда следует возрастание тока ионного источника пропорционально площади излучаемой поверхности анода в 10^3-10^5 раз, в зависимости от линейной протяженности пластины анода.

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь : энциклопедия / редкол.: Д. М. Алексеев (зам. гл. ред.) [и др.] ; гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Совет. энцикл., 1983. – 928 с.
2. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / М. П. Сих, Д. Бриггс, Д. К. Ривьер ; пер. с англ. В. И. Раховского, И. С. Реза. – М. : Мир, 1987. – 598 с.

* * *

I. N. Efimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chaikovsky Technological Institute, Branch of Izhevsk State Technical University

E. A. Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chaikovsky Technological Institute, Branch of Izhevsk State Technical University

On Possibility of Considerable Increase of Liquid-Metal Ion Source Current

The possibility of considerable increase of liquid-metal field-emission ion source current on a basis of linear-oblong anode is considered.

Keywords: ion source, ion gun, field-emission ion source

Получено 13.03.10