

УДК 621.3843.62

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ ПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ИНЖЕКТОРЕ

Видманов А. С., Сёмкин Н. Д.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара

Для изучения влияния микрометеоритов и космического мусора на материалы и элементы конструкции космического аппарата используются электростатические и электродинамические ускорители [1]. В качестве ускоряемого объекта в таких ускорителях используют частицы с диаметрами 0,1-100 мкм. Микрочастицы, перед тем как попасть в тракт ускорителя, заряжаются в инжекторе. Известны различные виды инжекторов данного типа [1].

При полёте микрочастицы к острию иглы напряжённость электростатического поля на поверхности частицы возрастает, что приводит к возникновению автоэлектронной эмиссии (холодная эмиссия) с поверхности подлетающей частицы. Автоэлектроны, ускоренные в сильном электрическом поле, могут вызвать ряд физических процессов, таких как разогрев поверхности катода (микрочастица) и/или анода (острие иглы), взрыв из-за джоулевого тепла микроострия на поверхности катода и ионизация остаточного газа. Все эти процессы ведут к заполнению промежутка частица-игла плазмой и возникновению микроарзряда.

Рассмотрим процесс зарядки микрочастицы в результате автоэлектронной эмиссии с её поверхности.

Плотность тока автоэлектронной эмиссии сильно зависит от напряжённости электрического поля на поверхности частицы и описывается уравнением Фаулера-Нордгейма [2]:

$$j_e = \frac{1,54 \cdot 10^{-6}}{t^2(y)} E_p^2 \varphi^{-1} \exp \left[\frac{6,83 \cdot 10^9 \varphi^{1,5}}{E_p} \Theta(y) \right] \quad (1)$$

где $\Theta(y)$ – функция Нордгейма; E_p – напряжённость поля на поверхности частицы; φ – работа выхода материала (эВ); $y=3,79 \cdot 10^{-5} E_p^{-0,5} \Phi^{-1}$; $t(y)=1,041 \div 1,095$; $\Theta(y)=0,93-0,966y^2$.

Для расчёта будем использовать упрощённую формулу:

$$j_e \approx 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{E_p^2}{\varphi} \exp \left[4,39 \varphi^{-0,5} - \frac{2,28 \cdot 10^9 \cdot \varphi^{1,5}}{E_p} \right], \quad (2)$$

где j_e , E_{out} , φ измеряются в А/м², В/м и эВ, соответственно.

Для определения характерных времен процессов зарядки и величины заряда, получаемого микрочастицей, решим систему уравнений, описывающих движение частицы и изменение её заряда в области иглы зарядного электрода инжектора. При этом будем считать, что микрочастица движется вдоль оси иглы зарядного электрода.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} = \frac{q_p}{m_p} \cdot \bar{E}_{outx}, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dq_p}{dt} = S_e \cdot j_e; \end{array} \right. \quad (4)$$

где m_p – масса частицы; x – координата частицы вдоль оси иглы; E_{outx} – вектор напряжённости поля вдоль оси иглы.

Уравнение (3) описывает динамику движения микрочастицы под действием электростатического поля, уравнение (4) – динамику изменения заряда частицы.

На рисунке 1 показано изменение плотности тока, на рисунке 2 – изменение скорости в зависимости от времени для частицы радиуса 1мкм с начальным зарядом $q_0 = -10^{-17}$ Кл.

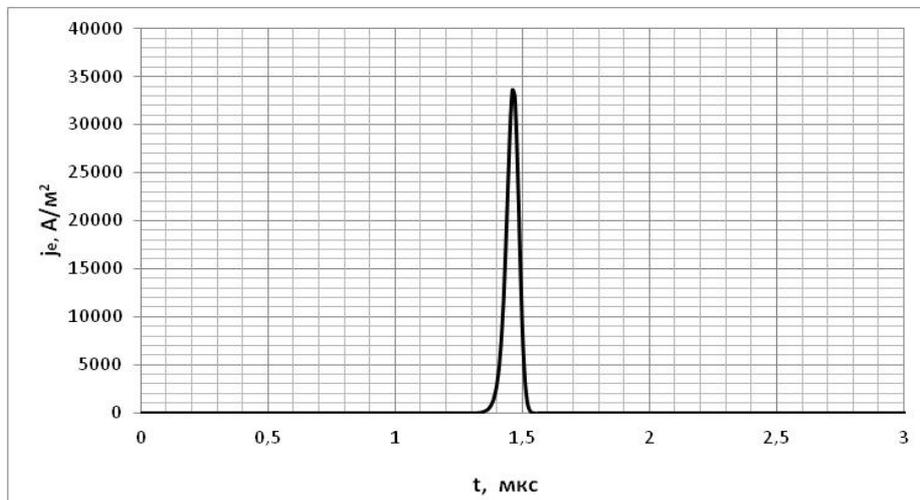


Рис. 1. Изменение плотности тока автоэлектронной эмиссии

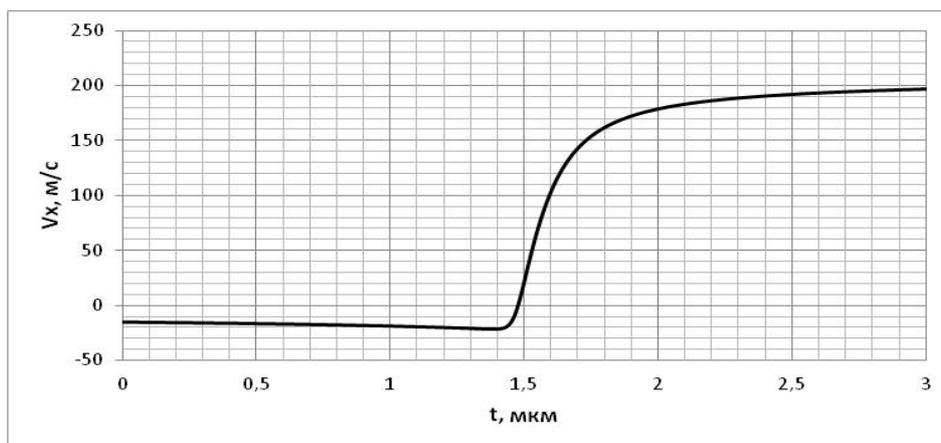


Рис. 2. Изменение скорости движения частицы

Библиографический список

1. Сёмкин, Н. Д., Пияков А. В., Погодин А. П. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях // Прикладная физика. – 2008. – №4. – С. 153 -163.
2. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.