

УДК 533.9.011(031)

И.И. ФАЙРУШИН\*\*, И.Г. ДАУТОВ\*, Н.Ф. КАШАПОВ\*\*

## РАСЧЕТ ЭКЗОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ МИКРОЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА В РАВНОВЕСНОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ

Получены формулы для расчета выхода экзоэлектронов из сферических пылевых частиц в равновесной пылевой плазме атмосферного давления. Установлено, что при дроблении пылевых частиц на более мелкие со-вокупный выход электронов увеличивается.

**Ключевые слова:** пылевая плазма, экзоэлектронная эмиссия, микрочастица.

Термин «экзоэлектронная эмиссия, или эффект Крамера» стал употребляться, когда обнаружилось, что различные металлические и неметаллические кристаллы обладают способностью испускать электроны после механических воздействий на них, в частности после разрывов и дроблений. Экзоэмиссию отличает испускание электрона с поверхности вещества при отсутствии внешнего электрического поля [1, 2]. В процессах плазменно-дугового нанесения различных функциональных покрытий частицы конденсированного вещества (пылевые частицы) вводятся в поток низкотемпературной газоразрядной дуговой плазмы. Находясь в струе плазмы, частицы ускоряются, нагреваются и наносятся на поверхность изделия. При соударении с поверхностью материала, на которое происходит напыление, частица может разделиться на более мелкие по размерам пылевые частицы, вследствие чего происходит дополнительная эмиссия экзоэлектронов этими частицами в окружающую плазму. Дополнительные электроны вызывают изменение степени ионизации и проводимости плазмы. Таким образом, для более корректного описания параметров плазмы в процессах нанесения функциональных покрытий необходимо принимать во внимание явление экзоэлектронной эмиссии из пылевых частиц.

Низкотемпературную газоразрядную дуговую плазму атмосферного давления, содержащую пылевые частицы, можно рассматривать как равновесную пылевую плазму [3–9]. При температуре окружающего газа от 1000 до 3000 К твердые или жидкые частицы конденсированного вещества (пылевые частицы) заряжены положительно в результате электронной эмиссии с их поверхности, и поэтому газовая фаза содержит свободные электроны, а концентрация ионизованных атомов газа остается пренебрежимо малой по сравнению с концентрацией электронов и нейтральных атомов. В работе [4] решено сферически-симметричное самосогласованное уравнение Пуассона – Больцмана для потенциала  $\phi$  электрического поля в равновесной пылевой плазме атмосферного давления

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left( n_{e0} e^{\frac{q\phi}{kT}} - n_i \right),$$

где  $r$  – текущая координата от центра частицы;  $q$  – абсолютное значение заряда электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $n_{e0}$  – концентрация валентных электронов в центре частицы, где принимается, что  $\phi = 0$ ;  $n_i$  – концентрация ионов пылевой частицы. Там же получена следующая формула для расчета выхода электронов из сферической пылевой частицы:

$$N_e = \frac{4\pi \cdot R \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot k \cdot T \cdot E}{q^2}, \quad (1)$$

где  $N_e$  – количество электронов, вышедших из пылевой частицы;  $R$  – радиус пылевой частицы;  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности частицы, которая определяется из соотношения

$$E(R) = \frac{kT}{qR} \frac{\left( \left( \frac{a\lambda - 1}{a\lambda + 1} \right) e^{a(2\lambda - 1)} (a + 1) - e^a (a - 1) \right) \left[ e^a (a - 1) + e^{-a} (a + 1) \right]}{2a \left( e^a (a - 1) - (a + 1) \left( \frac{a\lambda - 1}{a\lambda + 1} \right) e^{a(2\lambda - 1)} + 1 + \left( \frac{a\lambda - 1}{a\lambda + 1} \right) e^{2a\lambda} \right)}. \quad (2)$$

Здесь  $a = R \cdot q \sqrt{\frac{n_{e0}}{kT \epsilon \epsilon_0}}$ ;  $\lambda = \frac{l}{R}$ ,  $l$  – половина среднего расстояния между центрами двух соседних пылевых частиц.

Как видно из формул (1) и (2), выход электронов имеет зависимость от радиуса частицы. Таким образом, данные формулы могут быть использованы для исследования влияния изменения размеров частиц на эмиссию электронов из пылинок при различных значениях температуры окружающего газа, рода частиц и расстояния между ними, т.е. для установления количественных зависимостей экзоэлектронной эмиссии от основных параметров равновесной пылевой плазмы.

Рассмотрим случай, когда данная частица разделяется на множество мелких частиц. Пусть исходная частица имеет форму шара, радиус которого  $R_1$ , а концентрация валентных электронов  $n_{e0} = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Обозначим буквой  $s$  число частиц, на которые разделяется исходная частица. С целью упрощения задачи предположим, что получаемые частицы также имеют форму шара, радиус которых будет  $R$ .

Пусть  $z$  будет числом экзоэлектронов, выходящих из пылевой частицы при её делении на  $s$  частей. Тогда

$$z = s \cdot N_e - N_{e1}, \quad (3)$$

где  $N_{e1}$  – число электронов, вышедших из исходной частицы радиусом  $R_1$ , а  $N_e$  определяется по формуле (1). На рис. 1 показана зависимость числа экзоэлектронов от  $s$ , рассчитанная по формуле (3), где кривые 1, 2 и 3 соответствуют температурам 500, 1000 и 1500 К. Как видно, с ростом  $s$  число экзоэлектронов увеличивается. Этот результат согласуется с основными выводами экспериментальных работ [2, 10]. Так, например, при делении исходной частицы на 1000 частей при температуре 1000 К число экзоэлектронов достигает  $3 \cdot 10^4$ . На рис. 2 показана зависимость числа экзоэлектронов от  $T$ , где кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям  $s = 10, 100$  и  $1000$ . Из рис. 2 видно усиление экзоэлектронной эмиссии с повышением температуры. Данный эффект находит экспериментальное подтверждение и носит название термостимулированной экзоэлектронной эмиссии [10].

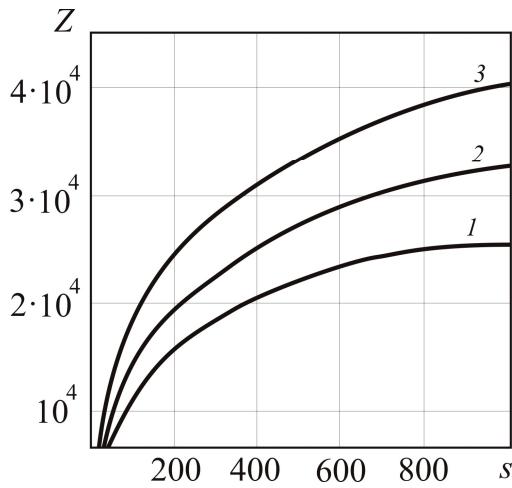


Рис. 1. Зависимость числа экзоэлектронов от числа частиц, на которые разделяется исходная частица

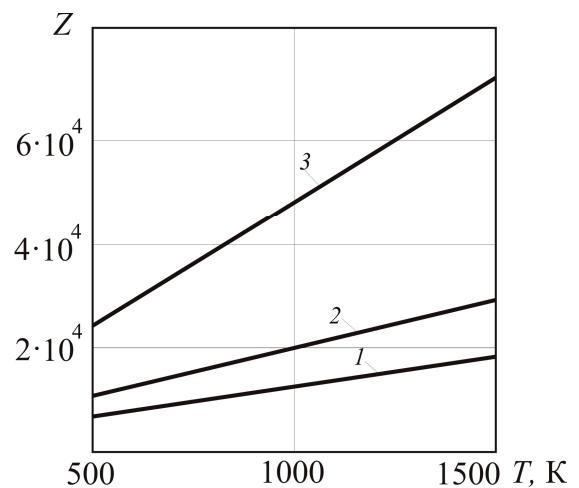


Рис. 2. Зависимость числа экзоэлектронов от температуры

Полученные результаты могут быть использованы для расчетов параметров технологических процессов, где проявляется экзоэлектронная эмиссия, в частности в процессах плазменно-дугового нанесения функциональных покрытий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев Ю. В., Месяц Г. А. Автоэлектронные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982. – 27 с.
2. Экзоэлектронная эмиссия / под ред. Н.И. Кобозева. – М.:ИЛ, 1962. – 306 с.
3. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы: учеб. пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 528 с.
4. Даутов Г. Ю., Сабитов Ш. Р., Файрушин И. И. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2007. – № 1. – С. 29–32.
5. Даутов Г. Ю., Даутов И. Г., Файрушин И. И. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2009. – № 1. – С. 57–59.
6. Даутов И. Г., Марданшин Р. М., Файрушин И. И., Ашрапов Т. Ф. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 3. – С. 143–148.
7. Даутов И. Г., Кашапов Н. Ф., Марданшин Р. М., Файрушин И. И. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 4. – С. 134–136.
8. Vishnyakov V. I. // Phys. Rev. E. – 2012. – V. 85. – P. 026402 ()
9. Vishnyakov V. I. // Phys. Rev. E. – 2006. – V. 74. – P. 036404 ()
10. Минц Р. И., Мильман И. И., Крюк В. И. // УФН. – 1976. – Т. 119. – Вып. 4.

\*Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Россия

Поступила в редакцию 30.12.13.

\*\*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия  
E-mail: fairushin\_ilnaz@mail.ru