ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА “МИФИ”, 2021, том 10, № 5, с. 390–396

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.523.3

ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА

© 2021 г.
К. М. Ерохин[1], В. А. Загайнов[1,*], Н. П. Калашников[1,], В. В. Максименко[1]**

[1] *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия*

**e-mail: vzagaynov@yandex.ru*

***e-mail: kalash@mephi.ru*

Поступила в редакцию 23.11.2021 г.
После доработки 29.12.2021 г.
Принята к публикации 30.12.2021 г.

В работе рассматривается процесс распыления атомов проводящего материала при коронном разряде. В частности, приводится пример коронного разряда на поверхности серебра (Ag). Диффузионный аэрозольный спектрометр (ДАС) регистрировал появление частиц серебра в нанометровой области размеров. Был исследован спектр размеров образованных частиц. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что частицы имеют конденсационное происхождение, а источник – атомы, возгоняемые из сплошного металла в результате взаимодействия электрического разряда с поверхностью. Для выявления механизма появления частиц были сделаны оценки концентрации атомов Ag, которые испускались поверхностью металла в результате столкновения электронов с поверхностью металла. Для оценки взаимодействия налетающего заряда с поверхностными атомами металла использовалось предположение о возникновении индуцированного заряда в металле. В нерелятивистском приближении был рассчитан импульс, передаваемый налетающей частицей узлам кристаллической решетки, находящимся у поверхности. На основании этого было рассчитано сечение взаимодействия налетающей частицы с атомом металла и коэффициент распыления металлической поверхности. В предлагаемом приближении не учитываются коллективные взаимодействия, которые также вносят вклад в наблюдаемый эффект. Сопоставление полученных результатов экспериментов с теоретическими оценками позволили сделать вывод о том, что возгонка атомов металла происходит не из-за теплового нагрева поверхности, а индивидуального взаимодействия заряда с узлом кристаллической решетки.

Ключевые слова: коронный разряд, индуцированный заряд, возгонка металла, нуклеация частиц

DOI: 10.1134/S2304487X21050059

ВВЕДЕНИЕ

Процессы обмена между конденсированным и газообразным состоянием вещества вызывают научный интерес и в то же время используются на практике, поэтому они играют ключевую роль в фазовых переходах. При этом считается, что испарение и возгонка происходят классическим образом – при любом распределении по энергиям имеется достаточно атомов, которые превышают энергию связи в конденсированном состоянии, и эти атомы могли перейти в газовую фазу. Однако экспериментальные данные, полученные при электрических разрядах: коронном, искровом, дуговом, показывают, что при этих процессах не происходит нагревания поверхности конденсированного состояния. Классическое описание процессов испарения и возгонки не объясняет данного явления.

Цель настоящей работы – найти объяснение процесса испарения или возгонки при явлениях электрического разряда. В качестве основания для этой работы были взяты экспериментальные данные, полученные при образовании частиц нанометрового диапазона размеров в результате коронного разряда.

Коронный разряд – это электрический разряд, при котором выделяется настолько малая энергия, что нельзя говорить о сколько-нибудь заметном нагревании поверхности. При этом были решены задачи, связанные с анализом экспериментальных данных, взаимодействием заряженных частиц с поверхностью проводника, возбуждением коллективных поверхностных колебаний и взаимодействием этих возбуждений с ионами кристаллической решетки.

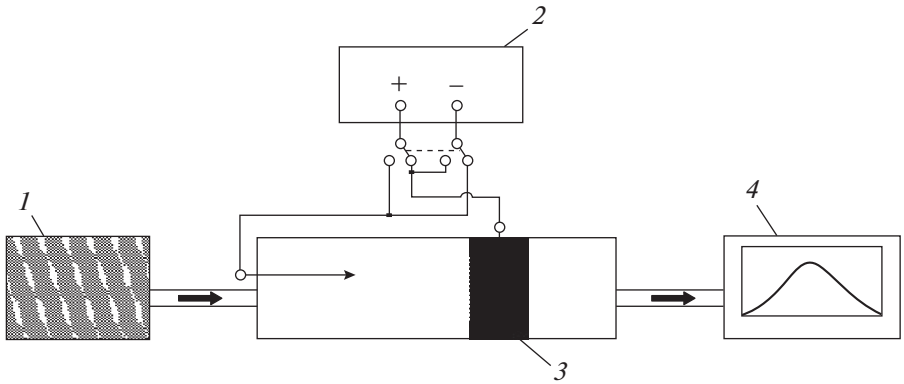

Рис. 1. Принципиальная схема установки.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРА (Ag)

В состав экспериментальной установки входит герметизированный объем в виде стеклянной трубки, в которой помещены два электрода (рис. 1).

К этим электродам прикладывается высокое напряжение – до 10 кВ. Один из электродов (коронирующий или активный) заострен – имеет выступ с очень малым радиусом кривизны, вокруг которого возникает электрическое поле с высокой напряженностью. Через эту трубку пропускается поток воздуха (0.5 литра в минуту) или другого газа при нормальном давлении. Затем этот поток пропускается через диффузионный аэрозольный спектрометр (ДАС 2702) [1, 2] для исследования дисперсного состава этого потока. ДАС измеряет спектр размеров частиц в диапазоне от 3 нм до 5 мкм и концентрацию частиц до 10^5 см$^{-3}$.

При проведении экспериментов оказалось, что:

1) Коронный разряд возникает при напряжениях 3–10 кВ в зависимости от газа носителя (воздух, азот, аргон) и материала электрода. При увеличении напряжения свыше 10 кВ коронный разряд переходит в искровой, это зависит и от конкретной геометрии электродов.

2) При возникновении коронного разряда образуются частицы, размеры которых от 3 до 100 нм со средним размером 15–20 нм в зависимости от прилагаемых напряжений и возникающих токов.

3) Концентрация и размеры образующихся частиц пропорциональны силе тока в коронном разряде. Ток коронного разряда изменяется от 1 до 10 мкА.

4) Характерные параметры распределения по размерам образующихся частиц принципиально не меняются при смене полярности разряда.

Типичное распределение по размерам частиц, возникающих в зоне коронного разряда при экспериментальных условиях, описанных выше, представлено на рис. 2.

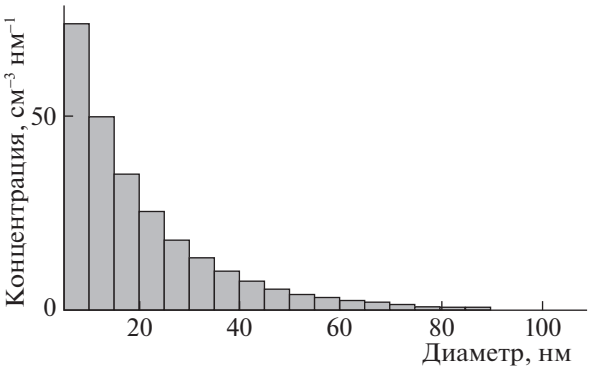

Рис. 2. Распределение частиц серебра по размерам. Аналогичные распределения получены для других металлов: меди, молибдена, вольфрама и других металлов.

Подобные распределения были получены для частиц серебра, железа, молибдена, вольфрама, углерода, при условии, что электрод был изготовлен из графита. Чувствительность спектрометра ограничена 3 нм. Это означает, что частицы с размером 3 нм регистрируются с эффективностью 50%, а более мелкие вообще не регистрируются. Поэтому гистограмма распределения по размерам не ограничивается 3 нм, частицы меньше этого размера не регистрируются прибором и эта часть шкалы размеров в настоящее время недоступна. При увеличении разности напряжений и соответствующем увеличении тока увеличивается размер частиц и их концентрация.

Исследования показали, что распределения по размерам частиц не зависят ни от материалов электродов, ни от газов-носителей, т.е. они носят универсальный характер. Эти зависимости определяются только током и напряжением между электродами.

По силе тока коронного разряда можно определить верхнюю границу потока атомов металла

из кристалла в объем, где затем из этих атомов и молекул образуются частицы, регистрируемые спектрометром. По концентрации частиц и их распределению по размерам можно определить количество вещества электрода, которые участвовали в образовании частиц. Сопоставление этих величин показывают, что эффективность конденсации составляет 10^{-2}–10^{-3}, это означает, что каждый из 100–1000 атомов или молекул участвует в образовании частиц, или, что только небольшая доля ионов и электронов вызывает выбивание атомов или молекул электродов из кристаллической решетки.

2. КАЧЕСТВЕННОЕ РАССМОТРЕНИЕ ВЫБИВАНИЯ ИОНА РЕШЕТКИ

Как известно [3], “**поле,** создаваемого точечным **падающим** зарядом $q_0 = Z_1 e$, расположенным вне проводящей среды, заполняющей полупространство, представляет **суперпозицию** полей точечного заряда $q_0 = Z_1 e$ и фиктивного заряда-изображения q, в рамках электростатики (применение электростатики требует, чтобы скорость налетающей частицы была бы меньше характерных скоростей электронов матрицы, т.е. $v < v_F$ (если падает электрон, то $\varepsilon_0 < \varepsilon_F$) индуцированные падающей частицей (электроном или ионом) с зарядом $q_0 = Z_1 e$ заряды на поверхности металла можно заменить единственным зарядом-изображением

$$q = -\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} q_0, \tag{1}$$

где диэлектрическая проницаемость металла в высокочастотной области имеет вид

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad (\omega_0 = \sqrt{4\pi n_0 e^2/m}). \tag{2}$$

Тогда сила взаимодействия (притяжения) иона решетки с падающей частицей q_0 и зарядом-изображением q' равна сумме двух сил (см. рис. 3)

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$F_{\text{рез}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(x^2 + b^2)} \cos\theta + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(x^2 + b^2)} \cos\theta, \tag{3}$$

где x – расстояние падающей частицы до плоской поверхности металла; b – прицельный параметр (рис. 3); $\cos\theta = \dfrac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}}$.

На рис. 3 введены следующие обозначения:

$$q_1 = Z_1 e; \quad q = -\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} q_1; \quad \cos(\theta) = \frac{b}{\sqrt{(Vt)^2 + b^2}}$$

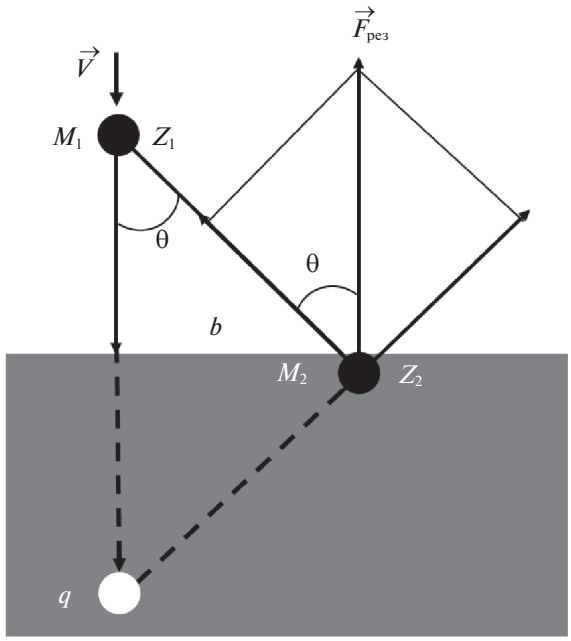

Рис. 3. Метод изображений.

Таким образом, для результирующей силы взаимодействия $F_{\text{рез}}$ имеем

$$F_{\text{рез}} = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(v^2 t^2 + b^2)^{3/2}} b, \tag{4}$$

где $x = vt$ – расстояние от падающей частицы до плоской поверхности металлического образца.

Используя второй закон Ньютона, можно найти полный передаваемый импульс при соударении падающей частиц с ионом на плоской поверхности металлического образца

$$\Delta P = \int_0^\infty F_{\text{рез}} dt = \int_0^\infty \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(v^2 t^2 + b^2)^{3/2}} b\, dt = \frac{2\varepsilon Z_1 Z_2 e^2}{\varepsilon + 1} \frac{1}{bv}. \tag{5}$$

Отсюда следует, что переданная иону решетки энергия равна

$$\Delta E = \frac{\Delta P^2}{2m_2} = \frac{(2\varepsilon)^2 Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v^2 (\varepsilon + 1)^2} \frac{1}{b^2}, \tag{6}$$

где прицельный параметр b изменяется в пределах от b_{max}, когда минимальная переданная энергия равна энергии связи иона в металлической решетке $\Delta E_{min} = \varepsilon_{CB}$, до b_{min}, при лобовом соударении падающей частицы с ионом решетки

$$\Delta E_{max} = \frac{4 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \frac{m_1 v^2}{2} \approx \frac{4 m_1}{m_2} E_1. \tag{7}$$

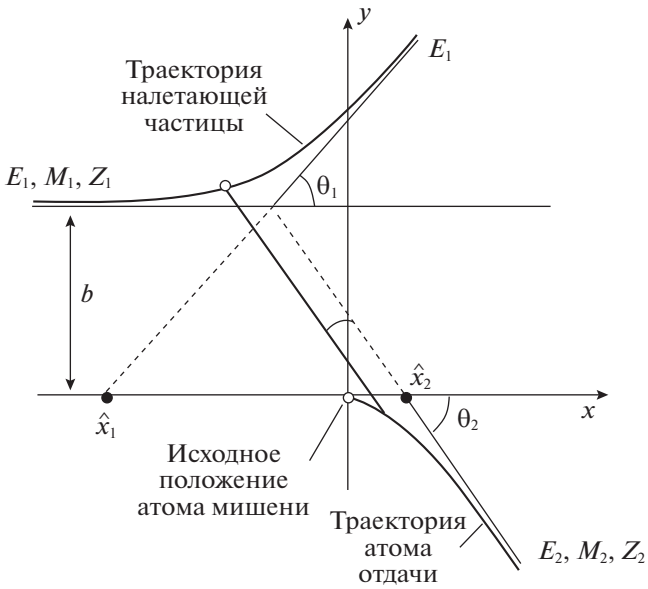

Рис. 4. Иллюстрация кинематики парного столкновения частицы (Z_1, m_1, v_1, $E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}$) и частицы ($Z_2$, m_2, v_2, $E_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2}$). (Индекс 1 служит для обозначения бомбардирующей частицы, а индекс 2 – для обозначения величин, относящихся к рассеивателю.)

В классической механике дифференциальное поперечное сечение $d\sigma$ [4] для соударений с прицельным параметром между b и $b + db$ равно $\sigma = 2\pi b db$. Следовательно, выражение для полного поперечного сечения имеет вид:

$$\sigma_{\text{полн}} = \frac{(2\varepsilon)^2 \pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v^2 (\varepsilon + 1)^2} \frac{1}{\varepsilon_{\text{св}}}, \text{ или}$$

$$\sigma_{\text{полн}} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{E_1 \varepsilon_{\text{св}}} \frac{m_1}{m_2} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon + 1)^2}. \quad (8)$$

Оценим среднюю передаваемую энергию

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{\int \Delta E d\sigma}{\sigma_{\text{полн}}} = \varepsilon_{\text{св}} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \sim \varepsilon_{\text{св}} \ln \frac{\Delta E_{max}}{\varepsilon_{\text{св}}}. \quad (9)$$

3. МЕХАНИЗМ ПРЯМОГО ВЫБИВАНИЯ АТОМОВ МИШЕНИ БОМБАРДИРУЮЩИМИ ЧАСТИЦАМИ

Физическое распыление имеет место, если причиной распыления является кинетическая энергия падающих частиц. Рассмотрим кинематику парного соударения в лабораторной системе координат, следуя основополагающей работе [4]. Налетающая частица характеризуется зарядом Z_1, массой m_1, скоростью v_1 (энергия $E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}$), а вылетающая из мишени вторичная частица характеризуется, соответственно, зарядом Z_2, массой m_2, скоростью v_2 (энергия $E_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2}$) (рис. 4).

Относительная траектория не отличается, с точностью до масштаба, от траектории движения частицы около центра инерции с приведенной массой в центральном поле сил с потенциалом

$$U(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}, \quad (10)$$

где r – взаимное расстояние сталкивающихся частиц.

Путем непосредственных вычислений [5] можно получить выражение для классического дифференциального поперечного сечения рассеяния с передачей энергии T:

$$d\sigma = 2\pi \frac{Z_1 Z_2 e^4}{m_2 v_2^2} \frac{dT}{T^2}. \quad (11)$$

Интегрирование (11) дает:

$$\sigma = 2\pi \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v_2^2} \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{T_{max}} \right) = \pi \frac{m_1}{m_2} \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{E_1} \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{T_{max}} \right), \quad (12)$$

где $T_{max} = 4 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1$ и E_b – энергия связи иона в матрице облучаемого материала (рис. 5). Величина энергии связи зависит от “дефицита” (“профицита”) электронов [6] при дуговом разряде, а также от температуры подложки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ

Коэффициент распыления Y определяется как отношение числа распыленных атомов мишени к числу бомбардирующих частиц (т.е. пропорционален σ).

$$Y \sim \sigma = \pi \frac{m_1}{m_2} \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{E_1} \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{T_{max}} \right) \quad (13)$$

Коэффициент распыления Y зависит от атомного номера и массы ионов, их энергии, угла падения, а также от материала и температуры мишени. При этом рассматриваются три основных механизма [7]:

1) линейных каскадов атомных столкновений;

2) прямого выбивания атомов мишени падающими частицами;

3) термических пиков.

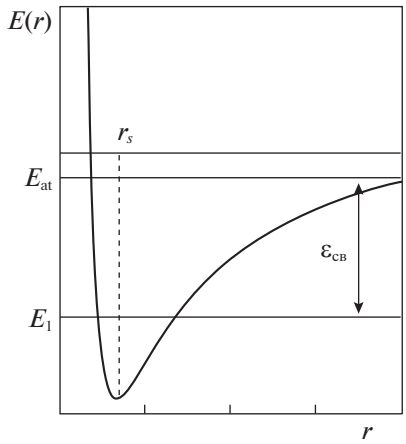

Рис. 5. Качественная зависимость энергии связи иона решетки металла от центра ячейки.

Таким образом, на величину коэффициента распыления Y влияет не только величина переданной атомам твердого тела энергии, но и вероятность их эмиссии с поверхности, что определяет характерный вид зависимости $Y(E)$ с максимумом и пороговой энергией, ниже которой распыление невозможно (рис. 6).

Сравнение результатов бомбардировки электронами и тяжелыми ионами показывает [8], что при одинаковых энергиях бомбардирующих частиц сечение зависит только от величины заряда падающей частицы и не зависит от ее массы

$$\sigma_{\text{полн}} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{E_1 \varepsilon_{\text{св}}} \frac{m_1}{m_2} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon+1)^2} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v^2 \varepsilon_{\text{св}}} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon+1)^2} \quad (14)$$

Эрозия поверхности при распылении характеризуется коэффициентом распыления Y, который определяется как среднее число ионов, удаляемых с поверхности твердого тела одной падающей частицей, т.е. под коэффициентом распыления будем понимать отношение числа распыленных атомов твердого тела к числу бомбардирующих частиц (электронов или ионов)

$$Y = \frac{dN_2}{dN_1} \quad (15)$$

Пучок бомбардирующих частиц с плотностью n_1 (число частиц в единице объема) сталкивается с ионами металлической решетки, плотность которых n_2. В приповерхностных слоях мишени (порядка длины пробега L) происходят столкновения падающих частиц с частицами мишени, согласно полученному выражению для поперечного сечения

$$\sigma_{\text{полн}} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v_1^2 \varepsilon_{\text{св}}} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon+1)^2}. \quad (16)$$

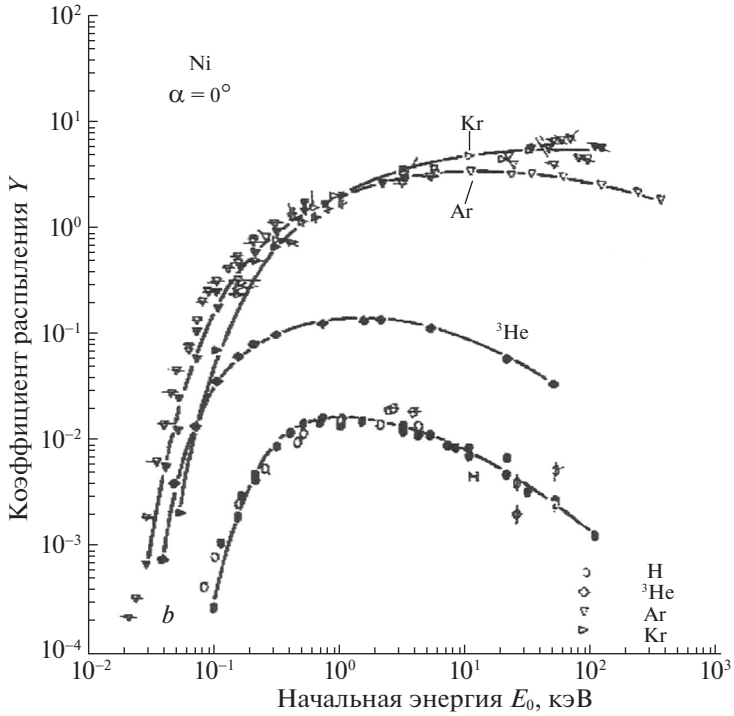

Рис. 6. Зависимость коэффициентов распыления Y никеля (Ni) от энергии падающих по нормали ионов различной массы. Данные взяты из работы [7].

Тогда число столкновений dv в объеме мишени с выбиванием иона dN_2, в течение времени dt равно:

$$dv = n_1 S v_1 dt n_2 \sigma_{\text{полн}} L = dN_2. \quad (17)$$

Учитывая, что $dN_1 = n_1 S v_1 dt$, можно получить выражение для коэффициента распыления

$$Y = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{m_2 v_1^2 \varepsilon_{\text{св}}} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon+1)^2} n_2 L. \quad (18)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы, представленной выше, были проанализированы экспериментальные данные по образованию частиц нанометрового диапазона при коронном разряде. Этот анализ привел к заключению о том, что возгонка атомов происходит не в результате нагревания поверхности проводника, а из-за возбуждений поверхностных атомов – узлов кристаллической решетки.

Для объяснения выявленного эффекта был разработан теоретический аппарат, предусматривающий взаимодействие – возбуждение коллективных колебаний поверхностных электронов проводника, передачу этой энергии ионам кристаллической решетки. В результате этого взаимодействия эти атомы покидают конденсированное состояние. Получено сечение взаимодействия налетающего потока заряженных частиц – электронов или заряженных ионов. Сопоставление этих расчетов с экспериментальными данными по измерению концентрации и распределению полученных частиц показывает, что представленная модель хорошо описывает эти экспериментальные данные.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 19-05-50007 (Микромир).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Julanov Yu.V., Lushnikov A.A., Zagaynov V.A.* Diffusion aerosol spectrometer // Atmospheric Research. 2002. V. 62. P. 295–302. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00015-7
2. *Zagaynov V.A.* The inverse Problem and Aerosol Measurements, in: *Agranovski I.E.* (Ed.), Aerosols – Science and Technology. Weinheim: Wiley, 2009. P. 241–269.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. ГРФМЛ, 1982. 620 с.
4. *Bohr N.* The penetration of atomic particles through matter. Mat.-Fys. Medd. Kgl. Danske Vid. Selskab, 1948. V. XVIII. № 8. 144 p.
5. *Thomson J.J.* Conduction of Electricity through Gases. Cambridge, 1906.
6. *Ерохин К.М., Калашников Н.П.* Зависимость энергии связи кристаллической решетки металлов от среднего числа электронов проводимости // Физика твердого тела. 2017. Т. 9. С. 1667–1672.
7. *Курнаев В.А., Протасов Ю.С., Цветков И.В.* Введение в пучковую электронику. М.: МИФИ, 2008. 452 с.
8. *Загайнов В.А., Максименко В.В., Калашников Н.П., Аграновский И.Е., Чаусов В.Д., Загайнов Д.К.* Образование частиц в зоне коронного разряда // L Международная Тулиновская конференция по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами. Москва. 25–26 мая 2021 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Тезисы докладов. М.: Изд. МГУ им. М.В. Ломоносова. “Университетская книга”, 2021.

Vestnik Nacional’nogo Issledovatel’skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 390–396

Secondary Particle Generation by Electrons Incident on the Metal Surface

K. M. Erokhin[a], V. A. Zagaynov[a, #], N. P. Kalashnikov[a, ##], and V. V. Maksimenko[a]

[a] *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

[#]*e-mail: vzagaynov@yandex.ru*

[##]*e-mail: kalash@mephi.ru*

Received November 23, 2021; revised December 29, 2021; accepted December 30, 2021

Abstract—The dispersion of the metal surface by a corona discharge is investigated. In particular, the interaction of the corona discharge with the silver surface is considered. A diffusion aerosol spectrometer is used to measure the size distribution of generated silver particles. The diffusion aerosol spectrometer can measure the particle spectrum and concentration from 3 nm to 5 μm. The determined particle size distributions are analyzed. The analysis of the experimental data shows that particles are generated by nucleation from the metal vapor, and sources of this vapor are metal atoms produced in the interaction of the electric discharge with the metal surface. To understand the mechanism of silver vapor generation, the concentration of metal atoms is estimated. These atoms are emitted from the metal surface due to the interaction of charged particles with

the metal. The theoretical estimate is based on the induction of the charge in the metal by incident charged particles. The momentum transferred to ions of the crystal lattice by an incident charged particle, the cross section for interaction of the incident particle with metal atoms near the surface, and the dispersion coefficient are calculated in the nonrelativistic approximation disregarding the collective interaction of metal atoms and electrons. The comparison of the experimental data with theoretical results indicates that sublimation of atoms from the metal surface is due to the direct interaction between incident particles and ions of the crystal lattice rather than to the thermal surface effect.

Keywords: corona discharge, induced charge, metal sublimation, particle nucleation

DOI: 10.1134/S2304487X21050059

REFERENCES

1. Julanov Yu.V., Lushnikov A.A., Zagaynov V.A., *Diffusion aerosol spectrometer – Atmospheric Research,* 2002, vol. 62, pp. 295–302. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00015-7
2. Zagaynov V.A., The inverse Problem and Aerosol Measurements, in: Agranovski I.E. (Ed.), *Aerosols – Science and Technology,* Weinheim: Wiley, 2009, pp. 241–269.
3. Landau L.D., Lifshic E.M., *Teoreticheskaya fizika, T. VIII, Elektrodinamika sploshnyh sred* [Theoretical Physics, Vol. VIII, Electrodynamics of continuous media], Moscow, Nauka. GRFML Publ., 1982, 620 p.
4. Bohr N., *The penetration of atomic particles through matter,* Mat.-Fys. Medd. Kgl. Danske Vid. Selskab, 1948. vol. XVIII. no. 8, 144 p.
5. Thomson J.J., *Conduction of Electricity through Gases,* Cambridge, 1906.
6. Erohin K.M., Kalashnikov N.P., Zavisimost' energii svyazi kristallicheskoj reshetki metallov ot srednego chisla elektronov provodimosti [Dependence of the binding energy of the crystal lattice of metals on the average number of conduction electrons], *Fizika tverdogo tela,* 2017, vol. 9, pp. 1667–1672 (in Russian).
7. Kurnaev V.A., Protasov YU.S., Cvetkov I.V., *Vvedenie v puchkovuyu elektroniku* [Introduction to beam electronics], Moscow, MIFI Publ., 2008, 452 p.
8. Zagaynov V.A., Maksimenko V.V., Kalashnikov N.P., Agranovskii I.E., Chausov V.D., Zagaynov D.K. [Formation of particles in the corona discharge zone], *Tezisy dokladov. L Mezhdunarodnaya Tulinovskaya konferenciya po vzaimodejstviyu zaryazhennyh chastic s kristallami,* [Abstracts of reports. L International Tulin Conference on the Interaction of Charged Particles with Crystals], Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova Publ., 2021 (In Russian).