

УДК 533

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАБОТЫ ВЫХОДА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ УГЛЕРОДА

© 2024 г. И. И. Файрушин^{a, b, *}, А. Д. Байtimiров^a^aКазанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия^bОбъединенный институт высоких температур, ул. Ижорская, д.13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

*E-mail: fairushin_ilnaz@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 18.09.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

С использованием аналитической модели исследовано влияние размерной зависимости работы выхода электрона из наночастиц углерода на концентрацию свободных электронов в термической пылевой плазме. Показано, что существует определенный размер наночастиц, при котором достигается максимально эффективная эмиссия электронов из них в термическую плазму. Исследовано влияние температуры и объемной доли наночастиц на характер зависимости концентрации свободных электронов в термической пылевой плазме от радиуса частиц.

Ключевые слова: работа выхода электрона, наночастицы углерода, термическая пылевая плазма, концентрация свободных электронов

DOI: 10.31857/S0023119324020108 EDN: VRQTWB

ВВЕДЕНИЕ

Термоэмиссионные процессы в высокотемпературных газодисперсных системах играют значительную роль в проявлении широкого спектра физико-химических свойств данных сред [1–4]. Частицы конденсированного вещества, размерами от нескольких нанометров до сотен микрометров, могут быть источниками свободных электронов, при этом сами становятся заряженной подсистемой [5–8]. В этом случае говорят об образовании т.н. термической пылевой плазмы [9–14]. Равновесная пылевая плазма, содержащая наночастицы углерода, возникает при дуговых разрядах с графитовыми электродами [5–8] и является средой, в которой могут эффективно формироваться такие ценные продукты как углеродные фуллерены, нанотрубки и графен. В связи с чем исследование свойств термической плазмы, содержащей наночастицы углерода, остается актуальной задачей для современной физики плазмы и плазменных технологий.

В недавней работе [9] получено аналитическое выражение, которое позволяет рассчитывать концентрацию свободных электронов $\tilde{n}_{ep}$ в условиях термической плазмы, содержащей наночастицы проводящего вещества. В приближении отсутствия ионизации буферного газа, т.е. когда наночастицы являются единственными поставщиками свободных

электронов в плазму, данное выражение запишется в следующем виде:

$$\tilde{n}_{ep} = \frac{3n_{es}}{\lambda^3 a} \left(\frac{1}{a} - \frac{a\lambda \operatorname{th}[a(1-\lambda)] + 1}{a\lambda + \operatorname{th}[a(1-\lambda)]} \right), \quad (1)$$

где n_{es} — концентрация свободных электронов у поверхности наночастицы, которую можно определить из модифицированного соотношения Ричардсона [15–18]:

$$n_{es} = 2\Lambda^{-3} e^{-\frac{qI}{k_B T}}, \quad (2)$$

Λ — дебройлевская длина волны электрона, q — элементарный заряд, I — эффективная работа выхода электрона из материала наночастицы, k_B — постоянная Больцмана, T — равновесная температура системы, a — безразмерный параметр, равный отношению радиуса наночастицы R к дебаевской длине электронов у поверхности наночастицы:

$$a = \sqrt{\frac{q^2 R^2 n_{es}}{\varepsilon_0 k_B T}},$$

λ — отношение половины среднего расстояния между центрами соседних наночастиц l к R . Формула (1) позволяет рассчитать концентрацию электронов, эмитированных в плазму из проводящих наночастиц в зависимости от температуры системы, рода вещества наночастиц их радиуса и концен-

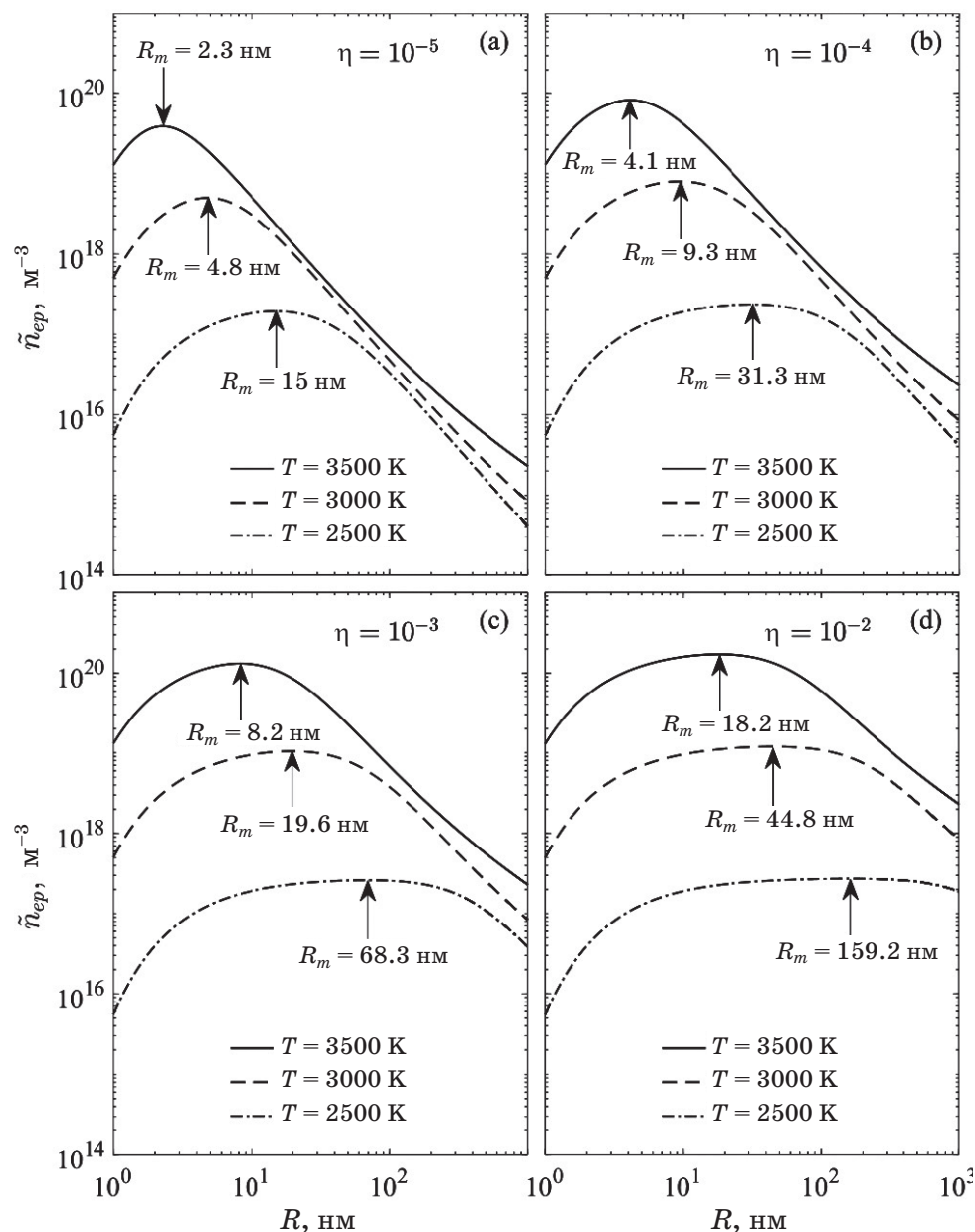


Рис. 1. Зависимость концентрации эмитированных в термическую плазму электронов от радиуса наночастиц углерода при разных значениях температуры системы T и объемной доли частиц η .

трации. Как известно, для выхода электрона из массивного образца необходимо затратить энергию, равную работе выхода электрона, а для отрыва электрона от одного атома необходимо затратить энергию, равную потенциалу ионизации. Для всех простых веществ первая величина меньше второй [3]. Поэтому при уменьшении размеров образца материала и при приближении к размерам атома, энергия, которую необходимо затратить на отрыв электрона, будет увеличиваться. Данная размерная зависимость эффективной работы выхода I может быть выражена из следующего простого соотношения, которое получено в работе [19]:

$$I = W + \frac{I_a - W}{N_a^{1/3}}, \quad (3)$$

где I_a и W — соответственно потенциал ионизации атома и работа выхода электрона для вещества, из которого состоит наночастица, N_a — количество атомов, составляющих наночастицу.

За R_m обозначим значение радиуса наночастиц, при котором достигается максимальное значение концентрации свободных электронов в термической пылевой плазме. То, что зависимость концентрации свободных электронов в термической пылевой

плазме от радиуса наночастиц имеет максимум, связанный с проявлением конкуренции двух механизмов [2]. Во-первых, это возрастание эффективности термоэмиссии электронов из наночастиц с уменьшением их размера при сохранении их общей объемной доли в системе [9–12]. Во-вторых, с уменьшением размеров наночастиц на термоэмиссию электронов из них начинает влиять размерная зависимость работы выхода (см. формулу (3)). На рис. 1 показаны графики зависимостей концентрации (плотности) электронов в термической пылевой плазме от размеров эмиттирующих наночастиц углерода, которые получены с помощью формулы (1). С увеличением температуры концентрация электронов в плазме, как и ожидалось, увеличивается за счет интенсификации процесса термоэмиссии. При этом максимум $\tilde{n}_{ep}$ смещается с увеличением температуры в область более мелких частиц. Это происходит из-за того, что ослабевание термоэмиссии за счет роста эффективной работы выхода с уменьшением размера частиц будет оказывать наибольшее влияние при меньших радиусах. Влияние величины объемной доли η имеет следующий характер. При малых объемных долях, что соответствует большим расстояниям между частицами, максимум $\tilde{n}_{ep}$ реализуется при меньших радиусах частиц и является более выраженным. Это можно объяснить усилением эмиссии электронов из-за увеличения свободного объема, в который электроны могут эмиттироваться из наночастиц.

Подводя итоги, нужно отметить, что ранее разработанная аналитическая модель расчета зарядового состава термической пылевой плазмы [9] может быть применена для исследования влияния размерной зависимости работы выхода электрона из наночастиц углерода на концентрацию свободных электронов в термической пылевой плазме. В работе установлено, что концентрация свободных электронов в термической пылевой плазме с наночастицами углерода немонотонно зависит от размера частиц. За счет конкуренции двух механизмов: усиления термоэмиссии при уменьшении размера наночастиц и ее ослабления из-за возрастания значения эффективной работы выхода, возникает максимум концентрации электронов в системе, значение и положение которого зависят как от температуры системы, так и от концентрации наночастиц.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету в рамках Государственного задания на научные исследования FZSM-2023-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортков В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. Пылевая плазма (эксперимент и теория). М.: Физматлит, 2009.
2. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашипов Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.
3. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986.
4. Shigeta M., Murphy A.B. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. 174025.
5. Mitrani J.M., Shneider M.N., Stratton B.C., Raites Y. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 054101.
6. Vekselman V., Raites Y., Shneider M.N. // Phys. Rev. E. 2019. V. 99. P. 063205.
7. Saifutdinov A., Timerkaev B. // Nanomaterials. 2023. V. 13. P. 1966.
8. Saifutdinov A.I., Sorokina A.R., Boldysheva V.K., Latypov E.R., Saifutdinova A.A. // High Energy Chemistry. 2022. V. 56. P. 477.
9. Файрушин И.И. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 919.
10. Файрушин И.И. // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. С. 820.
11. Файрушин И.И. // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. С. 497.
12. Файрушин И.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. С. 42.
13. Файрушин И.И., Сайфутдинов А.И., Софроницкий А.О. // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. С. 164.
14. Фортков В.Е., Филинов В.С., Нефедов А.П., Петров О.Ф., Самарян А.А., Липаев А.М. // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. С. 889.
15. Sodha M.S. // Journal of Applied Physics. 1961. V. 32. P. 2059.
16. Жуховицкий Д.И., Храпак А.Г., Якубов И.Т. // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22. С. 833.
17. Рудинский А.В., Ягодников Д.А. // ТВТ. 2019. Т. 57. С. 777.
18. Vishnyakov V.I. // Physical Review E. 2012. V. 85. P. 026402.
19. Wood D.M. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 46. P. 749.