

12

## Исследование зарядки металлических микрочастиц в потоке электронов

© М.В. Горохов, В.М. Кожевин, Д.А. Явсин, С.А. Гуревич

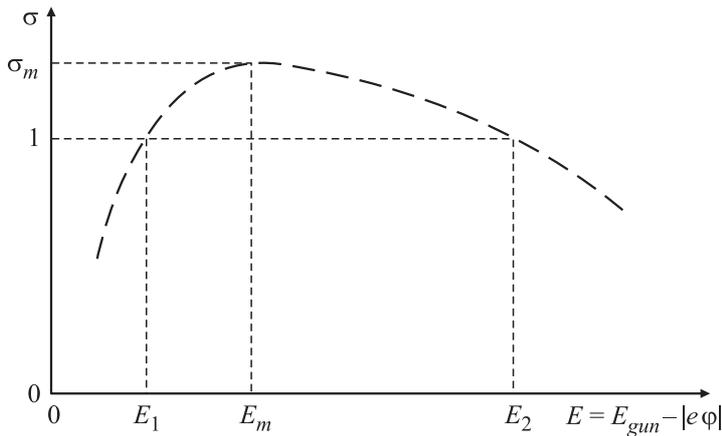
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: mgorokhov@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 сентября 2015 г.

Исследован процесс зарядки микрочастиц меди в потоке электронов. Показано, что параметры вторичной эмиссии электронов для микрочастиц могут существенно отличаться от параметров эмиссии для пленок и объемных мишеней. Найдены условия, при которых осуществляется отрицательная зарядка частиц меди микронного размера. Показано, что для сферических микрочастиц вторичная эмиссия существенно возрастает из-за наклонного падения первичных электронов. Предложен общий подход для оценки энергии электронов, необходимой для зарядки микрочастиц до высоких отрицательных потенциалов.

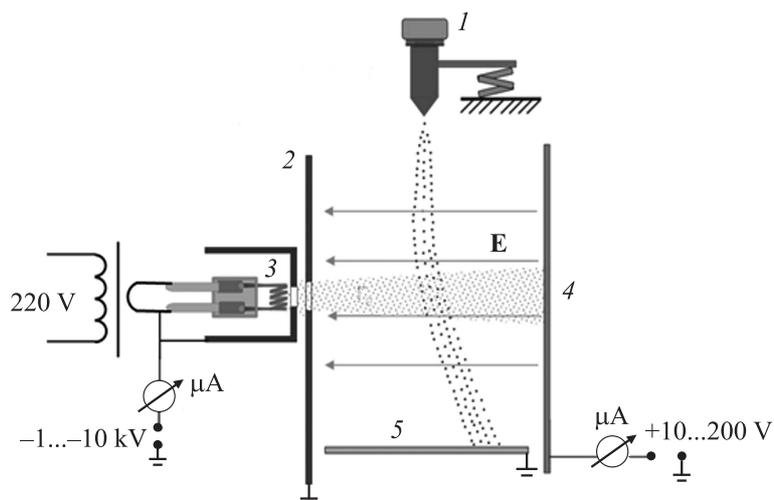
Практический интерес к проблеме зарядки микрочастиц обусловлен тем, что движением заряженных микрочастиц можно эффективно управлять с помощью электрических полей, что важно в целом ряде технологий, таких как реактивное движение [1], инерционный синтез [2], фотолитография в глубоком ультрафиолете [3] и т.д. Для этих применений важно, чтобы частицы имели высокий потенциал (и удельный заряд), что позволяет повысить эффективность управления движением частиц. Сложность зарядки микрочастиц до высоких значений потенциала связана с тем, что при воздействии потока электронов на металлическую частицу возникает вторичная эмиссия электронов [4]. При этом поток вторичных электронов может превышать поток первичных электронов. Для металлов типичная зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии падающих электронов приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, при энергии электронов  $E$  в диапазоне  $0 < E < E_1$  и при  $E > E_2$  коэффициент вторичной эмиссии меньше единицы, при этом на металле образуется отрицательный заряд. В диапазоне энергий  $E_1 < E < E_2$  коэффициент вторичной эмиссии превышает единицу и на мишени формируется положительный заряд. Для большинства металлов (в виде объемных образцов) энергия  $E_1$  составляет от 100 до 300 eV,



**Рис. 1.** Зависимость от энергии коэффициента вторичной эмиссии электронов.

а величина  $E_2$  находится в диапазоне от 2 до 4 keV [4]. Отметим, что в случае положительной зарядки частиц вторичные электроны с низкой энергией возвращаются на частицу под воздействием электрического поля. Поскольку характерная энергия вторичных электронов составляет несколько электронвольт [4], потенциал металлической мишени не превышает нескольких вольт. При энергии электронов  $E < E_1$ , максимальный отрицательный потенциал мишени не превышает  $E_1/e$ . Высокие значения отрицательного потенциала мишени могут быть достигнуты в случае  $E > E_2$ . Отметим также, что энергия электронов, достигающих поверхность металла, отличается от исходной энергии электронов в потоке на величину  $e\varphi$ , где  $\varphi$  — потенциал мишени.

Особенности вторичной электронной эмиссии в металлических микрочастицах исследовались в ряде работ как теоретически, так и экспериментально [5–8]. В теоретической работе [5] было, в частности, показано, что значение параметра  $E_2$  для микрочастиц значительно возрастает по сравнению со значением для пленки или объемной мишени из того же материала. В экспериментальных работах [7,8] изучалась зарядка микрочастиц в потоке электронов, при этом наблюдалась только положительная зарядка частиц, а переход в область отрицательной зарядки не был обнаружен. В работах [9,10]



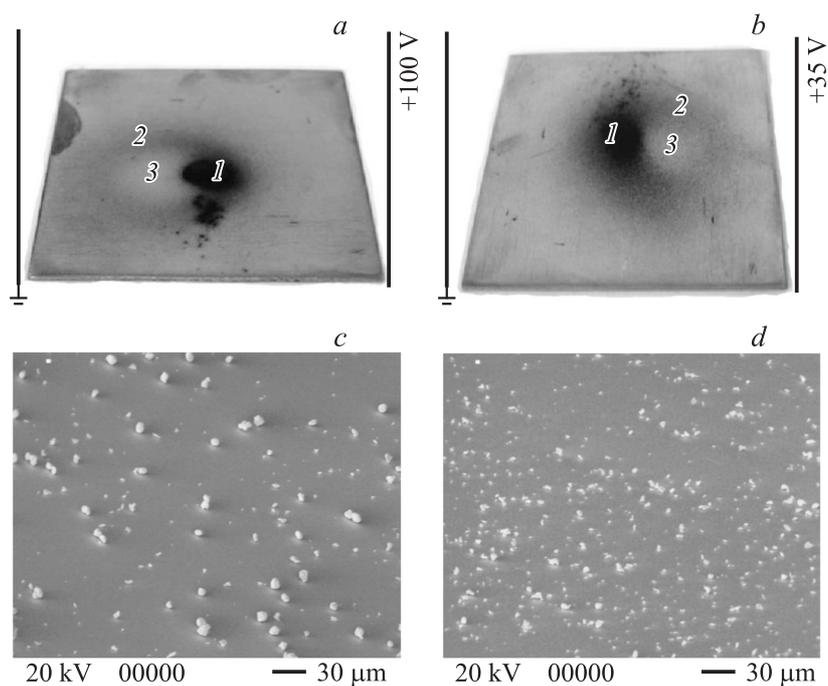
**Рис. 2.** Схема эксперимента по зарядке микрочастиц в потоке электронов: 1 — резервуар с порошком, 2 — ускоряющий электрод, 3 — эмиттер, 4 — анод, 5 — подложка.

отрицательная зарядка металлических микрочастиц наблюдалась при высоких значениях энергии электронов, однако величина параметра  $E_2$  не измерялась.

Таким образом, определение величины параметра  $E_2$ , а также условий отрицательной зарядки микрочастиц, при которых частицы могут быть заряжены в потоке электронов до высоких значений потенциала, является актуальной задачей.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию условий отрицательной зарядки микрочастиц в потоке электронов.

Схема эксперимента приведена на рис. 2. Для создания потока микрочастиц порошок меди марки ПМУ (средний размер частиц  $5 \mu\text{m}$ ) высыпается через отверстие в резервуаре. Частицы попадают в поток электронов, который генерируется с помощью термоэмиссионного катода прямого накала из вольфрамовой спирали (эмиттера) и системы электродов. К эмиттеру прикладывается высокое напряжение отрицательной полярности (от  $-1$  до  $-10 \text{ kV}$ ), которое создает электрическое поле в направлении заземленного ускоряющего электрода. В зазоре между



**Рис. 3.** Распределение микрочастиц меди на поверхности подложки при времени нанесения 20 min: *a* — при напряжении на эмиттере  $-5$  kV, напряжении на аноде 100 V; *b* — при напряжении на эмиттере  $-8.6$  kV, напряжении на аноде 35 V. Микрофотографии частиц в области кольца, время нанесения 2 min: *c* — в условиях, соответствующих случаю *a*, *d* — в условиях, соответствующих случаю *b*.

эмиттером и ускоряющим электродом электроны приобретают энергию, соответствующую величине приложенного напряжения, проходят через отверстие ( $\varnothing 7$  mm) в ускоряющем электроде и попадают на анод. Расстояние между ускоряющим электродом и анодом составляет 5 см. Положительное напряжение на аноде (до 100 V) создает электрическое поле, которое отклоняет заряженные микрочастицы. Анодный ток задается мощностью накала эмиттера и во всех экспериментах был равен  $60 \mu\text{A}$ . Направление отклонения микрочастиц определяет-

ся знаком их заряда, который зависит от коэффициента вторичной эмиссии, и соответственно от энергии первичных электронов. Зарядка микрочастиц меди регистрировалась по их отклонению в электрическом поле при энергиях электронов в диапазоне от 1 до 10 keV. В этом диапазоне изменение направления отклонения микрочастиц происходит при энергии электронов, соответствующей энергии  $E_2$ .

Для наблюдения характера отклонения микрочастиц на пути частиц между ускоряющим электродом и анодом устанавливалась заземленная металлическая подложка (рис. 2). На рис. 3 приведены фотографии, показывающие распределение микрочастиц меди на поверхности подложки при различных условиях эксперимента. В распределении частиц наблюдаются три различные области: скопление в центре 1, кольцо 2 и светлая область в центре кольца 3. Скопление 1 состоит из отдельных частиц и агломератов различного размера. В потоке электронов все частицы заряжаются, однако крупные агломераты размером несколько десятков микрон из-за большой массы не отклоняются в электрическом поле и осаждаются без смещения. Область в форме кольца 2 наблюдается только при включенном потоке электронов, таким образом она формируется в результате отклонения микрочастиц в поле анода. Кольцо состоит из мелких агломератов и отдельных микрочастиц. Светлая область в центре кольца образуется из-за того, что в потоке мелкие частицы сталкиваются с крупными агломератами. В результате под действием поля без препятствий могут отклоняться частицы только из периферийной области потока.

Как показано на рис. 3, *a*, при напряжении на эмиттере  $-5$  kV мелкие частицы (кольцо) смещаются в сторону катода, т. е. частицы заряжаются положительно. Аналогичная картина наблюдается в диапазоне напряжений от  $-1$  до  $-7.5$  kV. При дальнейшем увеличении напряжения на эмиттере и соответственно энергии электронов кольцо пропадает, а при энергиях электронов выше  $8.2$  keV формируется кольцо, смещенное в сторону анода (рис. 3, *b*). Это означает, что при энергиях электронов выше  $8.2$  keV частицы заряжаются отрицательно. Таким образом, значение энергии  $E_2$  для микрочастиц меди составляет около  $8$  keV, что превышает справочное значение для пленок меди  $2.6$  keV [4] больше чем в три раза.

В эксперименте напряжение на аноде подбирается так, чтобы смещение заряженных частиц (размер кольца) составляло примерно  $1$  см. При энергиях электронов ниже  $7.5$  keV и положительной зарядке

частиц это реализуется при напряжении на аноде, равном 100 В. При энергии 8.6 keV и отрицательной зарядке смещение кольца на 1 см достигается при меньшем напряжении 35 В, т.е. в условиях отрицательной зарядки отношение заряда микрочастиц к массе оказывается больше, чем при положительной зарядке. Анализ распределения размеров микрочастиц, проведенный с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 3, *c, d*), показал, что при отрицательной зарядке число мелких частиц в области кольца заметно увеличивается (рис. 3, *d*) по сравнению с распределением при положительной зарядке (рис. 3, *c*). Различие в распределении частиц по размерам возникает, по всей видимости, из-за того, что при отрицательной зарядке достигается большая величина заряда частиц, что приводит к разрушению крупных агломератов под действием кулоновского расталкивания.

Для того чтобы объяснить наблюдаемое значительное увеличение энергии  $E_2$  для микрочастиц по сравнению с объемным металлом, рассмотрим сферическую частицу в однородном потоке электронов. Зависимость интенсивности вторичной электронной эмиссии от угла падения электронов на поверхность металла описывается полуэмпирической формулой [4]:

$$\frac{\sigma(\theta)}{\sigma(0)} \approx \exp\left(\frac{2}{3} \gamma(1 - \cos \theta)\right), \quad (1)$$

где  $\sigma(\theta) = \frac{I_{sec}(\theta)}{I_{pr}}$  — коэффициент вторичной эмиссии электронов;  $I_{sec}(\theta)$  — поток вторичных электронов, зависящий от угла падения первичных электронов  $\theta$ ;  $I_{pr}$  — поток первичных электронов,  $\gamma$  — параметр материала мишени, для меди  $\gamma = 1.7$ . Интегрируя поток вторичных электронов по полусфере частиц радиусом  $R$ , на которую приходят первичные электроны, получаем, что наклонное падение электронов приводит к усилению вторичной эмиссии по сравнению со случаем нормального падения более чем в 3 раза:

$$\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma(0)} = \frac{1}{2\pi R^2} \int \sigma(\theta) dS = 2 \int_0^{\pi/2} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \approx 3.5, \quad (2)$$

где  $\langle \sigma \rangle$  — средний коэффициент вторичной эмиссии для сферической частицы. Предполагая, что такое усиление вторичной эмиссии не изменяет характер зависимости  $\sigma(E)$ , типичной для объемных металлов,

можно оценить величину энергии  $E_2$  для сферической частицы. Эта энергия соответствует энергии электронов, при которой коэффициент вторичной эмиссии для объемного металла равен  $1/3.5 \approx 0.28$ . Для меди справочное значение энергии электронов, при которой коэффициент вторичной эмиссии равен 0.28, составляет примерно 7.6 keV, что хорошо согласуется с полученной в эксперименте величиной энергии  $E_2$ , равной  $\approx 8$  keV.

Таким образом, на примере частиц меди показано, что для отрицательной зарядки микрочастиц металлов необходимо существенно повышать энергию первичных электронов. Для предварительной оценки величины необходимой энергии можно использовать справочные зависимости коэффициента вторичной эмиссии электронов от энергии первичных электронов с учетом полученного в работе коэффициента усиления вторичной эмиссии.

Кожевин В.М. благодарит за поддержку Министерство образования и науки РФ, субсидия 14.613.21.0014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61314X0012.

## Список литературы

- [1] Trottenberg Th., Kersten H., Neumann H. // New J. Physics. 2008. V. 10. P. 063 012. 15 p.
- [2] Koniges A.E., Debonnel C.S., Andrew J. et al. // J. Phys.: Conference Ser. 2008. V. 112. P. 032 072 (1–4).
- [3] Junichi Fujimoto, Tamotsu Abe, Satoshi Tanaka et al. // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11(2). P. 021 111 (1–14).
- [4] Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969.
- [5] Richterova I., Pavlu J., Nemecek Z. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. P. 235 430.
- [6] Richterova I., Nemecek Z., Beranek M., Safrankova J., Pavlu J. // Astrophys. J. 2012. V. 761(108). P. 5.
- [7] Pavlu J., Safrankova J., Nemecek Z., Richterova I. // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. N 3. P. 169–186.
- [8] Richterova I., Pavlu J., Nemecek Z., Safrankov J. // Eur. Phys. J. D. 2008. V. 48. P. 375.
- [9] Fortov V.E., Gavrikov A.V., Petrov O.F. et al. // EPL. 2011. V. 94. P. 55001 (1–5).
- [10] Pavlu J., Velyhan A., Richterova I., Nemecek Z., Safrankova J., Cermak I., Zilavy P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32(2). P. 704–708.