

УДК 533.924+537.525.99

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АТОМАРНЫХ ЧАСТИЦ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ СРЕДАМИ

Л. Б. Беграмбеков¹, А. М. Захаров¹, А. А. Айрапетов¹, В. Я. Никулин²

В работе изучалось поведение мелкодисперсных (1–5 мкм) порошков бора и вольфрама при воздействии тепла, электрического поля и ионов аргоновой и водородной плазмы. Последовательно рассматривается целая серия модификаций порошков, вызванных указанными выше факторами. Приводятся движущие силы и процессы, определяющие описываемые модификации.

Ключевые слова: порошок, прогрев, электрическое поле, температура, ионное облучение.

Систематическое исследование взаимодействия атомных частиц с мелкодисперсными средами до настоящего времени, фактически, не проводилось. Эти исследования представляют интерес, поскольку в силу малых размеров частиц-мишеней процессы, вызываемые такими взаимодействиями, могут существенно отличаться от происходящих при взаимодействии атомных частиц с макроскопическими телами. В работе изучалось взаимодействие тепла, электрического поля, ионов аргоновой и водородной плазмы с порошками бора и вольфрама.

Порошок вольфрама состоял из кристаллических частиц и включал фракции с размерами $1 \pm 0.2 \mu$ и $5 \pm 1.5 \mu$ (далее: “мелкие” и “крупные”). Крупные частицы собирались в ажурные трёхмерные цепочки (рис. 1(а)). На некоторых участках фрагменты цепочек были окружены скоплением мелких частиц кристаллической формы (рис. 1(б)). Порошок бора включал кристаллические частицы размером 2–5 μ и частицы неопределённой формы размером менее 1 μ . Примесь в порошках вольфрама и бора составляла < 0.5% и < 1%, соответственно. Эксперименты проводились в вакуумной газоразрядной установке. Слои исследуемого порошка толщиной 2–3 мм размещались на нагреваемой

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т 53; e-mail: lbb@plasma.mephi.ru.

подложке. При температурах $T < 800$ °С оба порошка интенсивно десорбировали молекулы H_2O . Термодесорбционный анализ показал, что вода выделялась, в основном, с поверхности порошинок. Сорбция на поверхности вольфрама ($\approx 6 \times 10^{15}$ мол./см²) соответствовала нескольким молекулярным слоям.

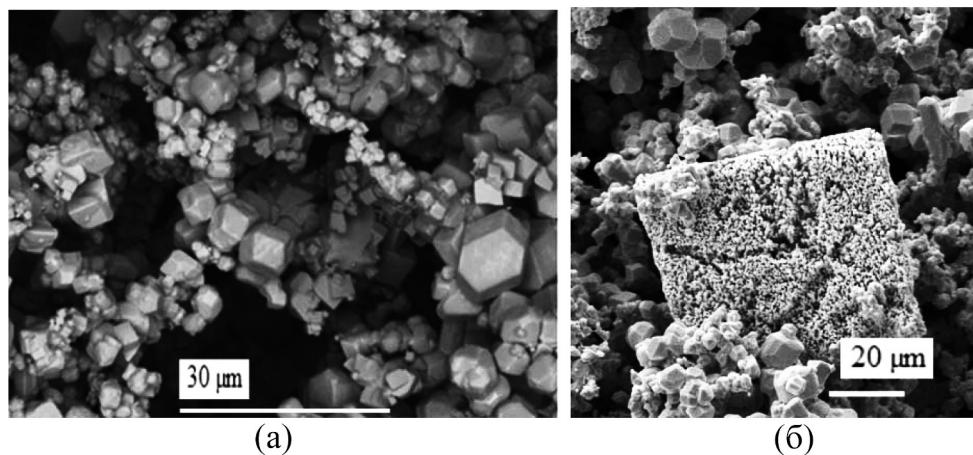


Рис. 1: ((а),(б)). Структурирование частиц вольфрама.

При быстром прогреве (≥ 100 °С/с), порошки не успевали обезгазиться до температур ≈ 800 °С. И при дальнейшем прогреве происходило резкое газовыделение, вызывающее импульсный выброс порошка с подложки.

Включение перпендикулярного к поверхности порошков электрического поля приводило к эмиссии порошинок, независимо от направления поля. При температуре 80 °С частицы бора эмиттировались при напряженности поля ≥ 650 В/мм, а частицы вольфрама – при ≥ 350 В/мм. Эффект объяснялся действием электрического поля на заряженные порошинки. При облучении ионами водорода с энергией 3 кэВ вылет начинался на 50–100 В/мм раньше. При температуре 700 °С частицы вылетали с поверхности порошка как бора, так и вольфрама уже при 300 В/мм.

Во время бомбардировки поверхности отожженного порошка вольфрама ионами водорода ($E = 2$ кэВ, $j \approx 5$ мА/см²) при температуре $T \sim 1000$ °С мелкие частицы налипали на грани крупных частиц. При увеличении температуры до 1400 °С мелкие частички “расплавлялись” и обволакивали крупные, соединяя их “пленкой” (рис. 2(а)). При температуре ≤ 1550 °С происходило спекание мелких частиц в скоплениях (рис. 2(б)).

При увеличении энергии и плотности тока ионов (7 кэВ, $j \approx 13$ мА/см²) процесс спекания проходил интенсивнее, и при $T = 1500$ °С появлялись макроскопические образования обеих групп частиц (рис. 2(в)). При облучении ионами аргона

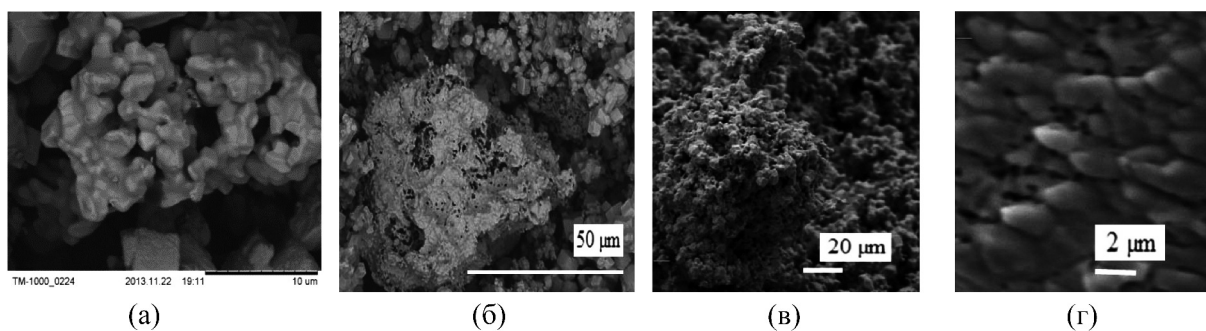


Рис. 2: ((a),(б),(в),(г)). Модификация порошка вольфрама. Параметры облучения в тексте.

($1000 < T < 1550$ °С, $2 < E < 7$ кэВ) на поверхностях скоплений формировались конусы (рис. 2(г)).

При облучении отожженного порошка бора ионами водорода происходили похожие процессы: налипание мелких частиц на цепочки крупных ($T \approx 1000$ °С, $E = 7$ кэВ, рис. 3(а)), расплавление мелких частиц, обволакивание крупных и соединение их “пленкой” ($T \sim 1400$ °С, рис. 3(б)). При высоких температурах и высокой плотности мощности ионного облучения ($T \sim 1550$ °С, $E = 14 - 14.5$ кэВ, $j \approx 15 - 17$ мА/см²) порошок спекался в макроскопические пористые структуры, приобретающие под действием ионного облучения столбчатые формы (рис. 3(в)).

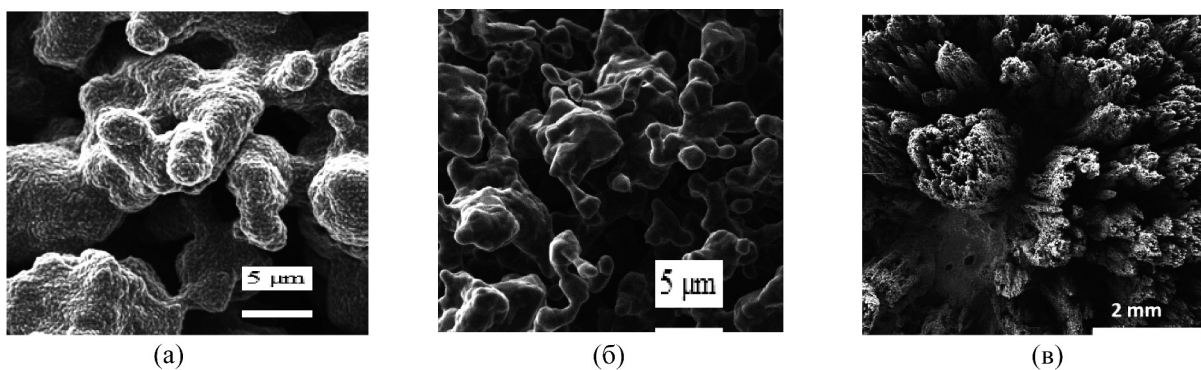


Рис. 3: ((a),(б),(в)). Модификация порошка бора. Параметры облучения в тексте.

Наблюдавшиеся модификации порошков происходили за счёт целого ряда действующих сил и процессов. Это: межатомные силы, силы поверхностного натяжения, кулоновские силы, процессы коалесценции и низкотемпературного плавления микроскопических тел и т. п. Ионное облучение стимулировало поверхностную диффузию, акти-

вируя тем самым все отмечавшиеся выше типы модификаций порошков.

В работе исследовано поведение порошков бора и вольфрама при воздействии тепла, электрического поля, ионов аргоновой и водородной плазмы и атомов водорода. Показано, что при быстром прогреве (≥ 100 °C/c), порошки не успевали обезгазиться до температур ≈ 800 °C, и дальнейший прогрев приводил к резкому газовыделению, вызывающему импульсный выброс порошка с подложки. В электрическом поле частицы бора эмиттировали с поверхности при напряженности поля ≥ 650 В/мм, а частицы вольфрама – при ≥ 350 В/мм. Облучение порошков ионами водорода вызывало налипание мелких частиц на крупные при ~ 1000 °C, мелкие частицы расплавлились при ~ 1400 °C и спекались в макроскопические скопления при ≥ 1550 °C. Примерно одинаковые микроскопические размеры частиц порошков бора и вольфрама, по-видимому, явились причиной того, что порошки претерпевали одинаковые типы модификаций при примерно одинаковых условиях. Приводятся движущие силы и процессы, определяющие наблюдавшиеся явления.

Поступила в редакцию 26 сентября 2014 г.

В переработанном виде 1 декабря 2015 г.