

На правах рукописи

Е. Фенько

ФЕНЬКО Евгений Леонидович

**ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ МОЩНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики УрО РАН и Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Яловец Александр Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Коренченко Анна Евгеньевна

кандидат физико-математических наук
Болтачев Грэй Шамилович

Ведущая организация: НИИ высоких напряжений при Томском
политехническом университете, г. Томск

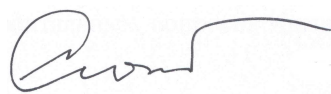
Защита диссертации состоится « 25 » мая 2010 года в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 004.024.01 при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электрофизики УрО РАН.

Автореферат разослан « 2 » апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Сюткин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время быстрыми темпами идет разработка методов создания наноразмерных материалов, изучение их свойств и применение, как в научных исследованиях, так и в промышленности. Наибольший интерес представляют материалы, имеющие структурные элементы с характерными размерами в диапазоне 1–100 нм. Интерес обусловлен тем, что переход к наноразмерному состоянию сопровождается появлением принципиально новых свойств материала.

Наноразмерные материалы могут быть получены различными методами, каждый из которых имеет свои преимущества, недостатки и область применения. Одним из относительно новых и перспективных методов получения наноразмерных материалов является электронно-лучевой метод, достоинствами которого являются: возможность испарять любые материалы, химическая чистота продукта, высокий к.п.д. электронного ускорителя. К недостаткам метода относится необходимость радиационной защиты.

Многочисленные экспериментальные исследования по генерации наночастиц электронно-лучевым методом демонстрируют широкий диапазон размеров получаемых частиц – от единиц нанометров до единиц микрометров.

Анализ результатов экспериментов [1, 2, 3, 4] позволяет отметить общие для различных материалов закономерности: а) существуют частицы с размерами в несколько единиц нанометров; б) существуют агломераты, размеры которых достигают нескольких сотен нанометров; в) в экспериментах [3, 4], где наблюдается частичное испарение кристаллитов, частицы достигают субмикронных размеров.

Естественно предположить, что конечные размеры частиц зависят от режима и геометрии облучения, а также способа охлаждения. Из сказанного следует, что необходимы исследования общих закономерностей динамики формирования частиц и их зависимостей от условий облучения и охлаждения.

Теоретические исследования и описание данных закономерностей актуальны как с точки зрения фундаментальных вопросов физики высоких плотностей

энергии, так и с точки зрения разработки и оптимизации радиационных методов генерации ультрадисперсных частиц.

Для проведения теоретических исследований генерации ультрадисперсных частиц при воздействии на материал мощных электронных пучков необходима самосогласованная модель, которая включает в себя: описание взаимодействия электронного пучка с материалом мишени и модель гетерогенных сред с учетом процессов конденсации и испарения.

В настоящее время при описании механики гетерогенных сред большое внимание уделяется развитию моделей многоскоростных взаимодействующих континуумов [5, 6]. Практическая реализация упомянутых выше моделей встречает трудности, обусловленные отсутствием необходимой информации для получения замкнутой системы уравнений. Поэтому теоретические исследования в области моделей гетерогенных сред с учетом процессов конденсации и испарения остаются актуальными.

Цель работы. Исследование механизмов и закономерностей генерации ультрадисперсных частиц в плазменном факеле, образованном при воздействии мощного электронного пучка на металлическую мишень.

Задачи диссертационной работы: описание механизма образования плазменного факела при воздействии мощного электронного пучка на металлическую мишень; разработка модели гетерогенной среды с учетом процессов теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент к равновесному состоянию, конденсации, испарения и коагуляции капель вследствие их столкновений для описания динамики системы частиц в плазменном факеле; исследование механизмов и закономерностей формирования ультрадисперсных частиц в плазменном факеле; проведение численных экспериментов и нахождение распределения доли частиц по размерам для различных металлов в зависимости от условий облучения и охлаждения.

Методика исследования. Нами была разработана модель гетерогенной среды с учетом процессов теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент к равновесному состоянию, конденсации,

испарения и коагуляции капель вследствие их столкновений. Разработанная модель и реализующая ее программа были использованы для проведения численных исследований по генерации ультрадисперсных частиц в плазменном факеле металла. Расчет взаимодействия электронного пучка с материалом мишени осуществлен с помощью пакета программ BETAIN [7].

Научная новизна и значимость.

1) Проведены теоретические исследования генерации ультрадисперсных частиц при облучении металлической мишени мощным электронным пучком.

2) Для описания течений в плазменном факеле предложена модель гетерогенных сред, в которой учтены процессы: теплопроводность, теплообмен и трение между компонентами, релаксация компонент среды к равновесному состоянию, конденсация, испарение и коагуляция капель.

3) Проведены численные эксперименты по генерации ультрадисперсных частиц электронно-лучевым методом с учетом наклонного падения электронного пучка на мишень и охлаждения плазменного факела, которые позволили исследовать общие закономерности формирования спектра частиц в плазменном факеле в зависимости от условий облучения и охлаждения.

4) Показаны границы размеров ультрадисперсных частиц и роль механизмов конденсации и коагуляции в процессе формирования частиц в плазменном факеле, образованном при облучении металлической мишени мощным электронным пучком.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Модель гетерогенных сред, в которой учтены процессы теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент среды к равновесному состоянию, конденсации, испарения, и коагуляции капель вследствие их столкновений.

2) В режиме частичного испарения из твердой фазы размер частиц определяется размером кристаллитов в твердой фазе и плотностью вложенной в мишень энергии, и основным механизмом формирования частиц является конденсация пара на каплях, являющихся остатками кристаллитов.

3) В режиме полного испарения основным механизмом образования ультрадисперсных частиц диаметром $1\div 10$ нм является гомогенная конденсация. Ультрадисперсные частицы диаметром $10\div 200$ нм образуются в результате коагуляции более мелких частиц.

4) Охладитель плазменного факела играет существенную роль при формировании спектра ультрадисперсных частиц в режиме полного испарения. При скорости охлаждения более 10^8 К/с ультрадисперсные частицы имеют размеры $1\div 30$ нм и формируются преимущественно путем конденсационного роста. При скорости охлаждения менее 10^8 К/с частицы имеют размеры $1\div 200$ нм и формируются преимущественно путем коагуляции.

5) В режиме испарения из жидкой фазы формируются частицы размером от 10 нм до субмикронных размеров, и основными механизмами, отвечающим за формирование спектра размеров частиц, являются коагуляция мелких частиц и конденсационный рост крупных частиц.

Личный вклад автора. Разработка модели гетерогенной среды: анализ существующих моделей гетерогенных сред, формулировка системы уравнений модели гетерогенной среды с учетом процессов теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент к равновесному состоянию, конденсации, испарения, и коагуляции капель. Разработка программы, реализующей указанную модель. Численные исследования генерации ультрадисперсных частиц в различных режимах облучения и охлаждения, анализ полученных результатов, исследование механизмов и закономерностей формирования ультрадисперсных частиц.

Практическая ценность результатов работы заключается в возможности использования разработанной модели и программы для определения параметров электронного облучения и охлаждения в случае генерации ультрадисперсных частиц в заданном диапазоне размеров.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международной конференции «IX-е Забабахинские Научные Чтения» (Снежинск, 2007); на научно-координационной сессии «Исследования неидеальной плазмы»

(Москва, 2007); на международной конференции «9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows» (Томск, 2008); на международном симпозиуме «15th International Symposium on High-Current Electronics» (Томск, 2008); на XVI-й Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2009); на «11-й Конференции молодых ученых» (Екатеринбург, 2009); на международной конференции «14th International Conference of Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials» (Астана, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, 3 статьи в сборниках трудов конференций, тезисы 3 докладов.

Связь работы с научными программами. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт №02.513.11.3127), ИНТАС (проект №06-1000013-8949), РФФИ (проект №06-08-00355а), РФФИ-Урал (проект №07-08-96032), Президиума УрО РАН в рамках целевой программы поддержки интеграционных проектов, выполняемых в содружестве с учеными СО и ДВО РАН, а также – в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения, изложена на 168 страницах, содержит 47 рисунков, 2 таблицы. Библиографический список содержит 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **первой главе** описано современное состояние проблемы получения ультрадисперсных порошков различного рода материалов методами импульсного нагрева: электрический взрыв проводников, лазерный нагрев, электронно-

лучевой нагрев. Приводятся экспериментальные данные по генерации ультрадисперсных частиц электронно-лучевым методом.

Анализ экспериментальных данных [8] позволяет утверждать, что нагрев металлической мишени мощным электронным пучком приводит к ее растрескиванию на кристаллиты. Дальнейший нагрев кристаллитов приводит к их плавлению, переходу в жидкие капли и образованию пара с их поверхности. В зависимости от вложенной в мишень энергии возможно полное либо частичное (неполное) испарение капель расплава.

Пары металла и капли расплава на момент окончания облучения представляют собой, в общем случае, гетерогенную среду, в которой, в дальнейшем, идут процессы конденсации и испарения, определяющие формирование ультрадисперсной фазы.

Проведен обзор моделей конденсации и испарения. Рассмотрены процессы формирования ядер конденсации в пересыщенном паре, процессы роста и испарения капель, процесс коагуляции капель.

Проведен анализ существующих моделей гетерогенных сред. Показаны достоинства и недостатки моделей.

Во второй главе описана модель гетерогенной среды с учетом процессов теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент среды к равновесному состоянию, конденсации, испарения и коагуляции капель вследствие их столкновений.

Следуя работам [5, 6], в модели гетерогенная среда рассматривается как совокупность многоскоростных взаимодействующих континуумов. Индексом j обозначается произвольная компонента среды.

В решаемой задаче рассматривается многокомпонентная среда, состоящая из инертного газа $j=i$ (inert gas), пара $j=v$ (vapor) и капель разных размеров и термодинамических состояний.

Определим V – элементарный объем гетерогенной смеси; $V^{(j)}$ – объем j -компоненты в элементарном объеме V ; $\alpha^{(j)} = V^{(j)} / V$ – объемная доля j -компоненты.

Основные положения модели гетерогенных сред:

а) Усредненные по физически малому объему тензор деформации и тензор скоростей деформации гетерогенной смеси имеют, соответственно, вид

$$u_{ik} = \sum_j \alpha^{(j)} u_{ik}^{(j)} \text{ и } v_{ik} = \sum_j \alpha^{(j)} v_{ik}^{(j)}, \text{ где } u_{ik}^{(j)} - \text{тензор деформации } j\text{-компоненты, } v_{ik}^{(j)}$$

– тензор скоростей деформации j -компоненты.

б) Все компоненты равноправны и движутся в поле давлений смеси $P = \sum_j \alpha^{(j)} P^{(j)}$. Процессы установления равновесия между компонентами учтены

при записи уравнений для объемных долей компонент.

в) Работа, совершаемая j -компонентой в единицу времени в единице объема гетерогенной среды имеет вид $\dot{A}^{(j)} = \alpha^{(j)} P^{(j)} v_{||}$.

г) Компоненты гетерогенной среды стремятся к локальному термодинамическому равновесию.

Описание течений смеси проводится в подвижной системе координат, связанной с движением центра масс. Полная производная по времени имеет вид:

$$\frac{d_c}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v}_c \nabla), \text{ где } \vec{v}_c - \text{скорость центра масс. Далее } \vec{v}^{(j)}, m^{(j)}, \bar{\rho}^{(j)} = m^{(j)} / V^{(j)},$$

$\rho^{(j)} = m^{(j)} / V = \alpha^{(j)} \bar{\rho}^{(j)}$ – соответственно скорость, масса в объеме V , истинная плотность, приведенная плотность j -компоненты. Относительная скорость j -компоненты имеет вид: $\vec{\xi}^{(j)} = \vec{v}^{(j)} - \vec{v}_c$.

Система уравнений механики гетерогенной среды для j -компоненты в системе центра масс записана в интегральной форме.

Уравнение непрерывности j -компоненты имеет вид:

$$\frac{d_c m^{(j)}}{dt} = V q^{(j)} - \oint_S \rho^{(j)} \xi_k^{(j)} dS_k, \quad q^{(j)} = \begin{cases} \sum_{k \neq v} J^{(vk)}, & j = v, \\ J^{(jv)}, & j \neq v, \\ 0, & j = i, \end{cases}$$

где $J^{(jk)}$ – скорость перехода массы от k -компоненты к j -компоненте в единицу времени в единице объема.

Уравнение движения j -компоненты в поле давлений смеси P имеет вид:

$$\frac{d_c(m^{(j)}v_i^{(j)})}{dt} = -\alpha^{(j)} \oint_S P dS_i - V \sum_k B^{(jk)} (v_i^{(j)} - v_i^{(k)}) + V \cdot F_i^{(j)} - \oint_S \rho^{(j)} v_i^{(j)} \xi_k^{(j)} dS,$$

где $B^{(jk)}$ – коэффициент трения между j -компонентой и k -компонентой.

Скорость изменения импульса, передаваемого при фазовом переходе в единице объема, и скорость на границе фаз, соответственно, имеют вид:

$$F_i^{(j)} = \begin{cases} \sum_k |J^{(vk)}| (v_i^{(v)} - v_i^{(vk)}), & j = v, \\ -J^{(jv)} (v_i^{(j)} - v_i^{(vj)}), & j \neq v, i, \\ 0, & j = i. \end{cases} \quad v_i^{(vj)} = \begin{cases} v_i^{(v)}, & J^{(jv)} > 0, \\ v_i^{(j)}, & J^{(jv)} < 0. \end{cases}$$

Уравнение для внутренней энергии j -компоненты имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d_c(m^{(j)}U^{(j)})}{dt} = & -\alpha^{(j)} P^{(j)} \dot{V} - \oint_S q_k^{(j)} dS_k - V \sum_k Q^{(jk)} (T^{(j)} - T^{(k)}) + \\ & + V \sum_k \beta^{(jk)} B^{(jk)} (v_i^{(j)} - v_i^{(k)})^2 + V \cdot W^{(j)} - \oint_S \rho^{(j)} U^{(j)} \xi_k^{(j)} dS_k, \end{aligned}$$

где $U^{(j)}$ – внутренняя энергия единицы массы j -компоненты, $q_k^{(j)} = -\alpha^{(j)} \kappa^{(j)} \frac{\partial T^{(j)}}{\partial x_k}$ –

поток тепла, обусловленный теплопроводностью, $\kappa^{(j)}$ – коэффициент теплопроводности j -компоненты, $Q^{(jk)}$ – коэффициент теплообмена, $\beta^{(jk)}$ – доля тепла, передаваемая j -компоненте при трении с k -компонентой [5].

Скорость изменения энергии, передаваемой при фазовом переходе в единице объема, имеет вид:

$$W^{(j)} = \begin{cases} -\sum_k 0.5 J^{(vk)} (v_i^{(vk)} - v_i^{(v)})^2, & j = v, \\ J^{(jv)} (U^{(v)} - U^{(j)}) + 0.5 J^{(jv)} (v_i^{(vj)} - v_i^{(j)})^2, & j \neq v, i, \\ 0, & j = i. \end{cases}$$

При записи уравнения для изменения объема j -компоненты в гетерогенной среде с фазовыми переходами следует учитывать изменение объема компоненты

за счет а) деформации смеси $\alpha^{(j)}\dot{V}$; б) изменения массы $\dot{m}^{(j)}$ в объеме V ; в) релаксации компонент среды к равновесному состоянию.

Уравнение для объема j -компоненты без учета релаксации имеет вид:

$$\frac{\dot{V}^{(j)}}{V^{(j)}} = \frac{\dot{V}}{V} + \frac{\dot{m}^{(j)}}{m^{(j)}}.$$

Учет релаксации заключается в приближенном решении уравнений механики сплошной среды для отдельной сферической капли в газовой фазе и нахождении приращений термодинамических параметров компонент в процессе выравнивания их давлений.

Для описания процессов конденсации и испарения применяются теории [10, 11]. Механизмом коагуляции капель в плазменном факеле является тепловое (броуновское) движение капель в паре.

Используя уравнения состояния [9], для вещества, составляющего плазменный факел, были найдены бинадаль, спинодаль, область метастабильных состояний, в которой происходит образование новой фазы.

Модель гетерогенной среды обеспечивает строгое выполнение законов сохранения массы, импульса и энергии. Система уравнений модели решена в одномерном приближении для декартовой геометрии методом, описанным в [12]. Тестирование модели произведено путем решения задач об электрическом взрыве проводников [13], определении скорости звука в суспензии, разлете гетерогенной смеси в пустоту.

В **третьей главе** описаны численные эксперименты по генерации ультрадисперсных частиц в плазменном факеле, образованном при воздействии на металл мощным электронным пучком.

Предложена постановка численного эксперимента в одномерной декартовой геометрии с учетом наклонного падения электронного пучка на мишень и охлаждения плазменного факела.

Процесс генерации ультрадисперсных частиц можно условно разделить на два этапа: первый – нагрев и испарение металлической мишени, второй – охлаждение и конденсация паров металла в капли.

Расчет нагрева и испарения мишени при воздействии мощного электронного пучка проводился с помощью пакета программ BETAIN [7], который реализует решение системы уравнений механики сплошной среды в рамках упругопластической модели совместно с широкодиапазонными уравнениями состояния и уравнением переноса для быстрых заряженных частиц в одномерной декартовой геометрии.

В зависимости от вложенной в мишень энергии возможны два режима воздействия электронного пучка на мишень: частичное или полное испарение капле расплава. Регулировать удельную энергию, поглощаемую в мишени можно, изменяя энергию частиц, плотность тока, длительность импульса пучка, а также угол падения пучка на мишень. Принципиальное различие между указанными режимами воздействия электронного пучка на мишень заключается в различии дальнейшей кинетики процессов конденсации паров.

Условия для частичного испарения из твердой фазы реализуются, например, в экспериментах [3]. Был проведен численный эксперимент с параметрами электронного пучка, близкими к тем, что использовались в работе [3]: энергия электронов $T_b = 1.4$ МэВ, плотность тока пучка на выходе из ускорителя $j_b = 6$ А/см². Плотность мощности на мишени составляет $W_t = 8.4$ МВт/см². В данном численном эксперименте использовалась медная (Cu) мишень, имеющая до облучения температуру 300 К, и полагалось, что материал мишени имеет поликристаллическую структуру с одинаковым диаметром всех кристаллитов равным 1 мкм.

На рис.1 представлено стационарное распределение доли ультрадисперсных частиц меди по размерам (N – доля). Частицы имеют размер 350–450 нм, что соответствует диапазону размеров частиц, полученных в экспериментах [3]. Основным механизмом, определяющим формирование спектра размеров частиц в данном режиме, является конденсация пара на каплях, являющихся остатками кристаллитов.

Условия для полного испарения реализуются, например, при облучении медной мишени электронами с энергией $T_b = 40$ кэВ, плотностью тока на

мишени $j_t = 140 \text{ A/cm}^2$, длительностью импульса $\tau_b = 100 \text{ мкс}$, диаметре пучка на мишени $d_t = 1 \text{ мм}$ и угле падения пучка на мишень $\Theta = 45^\circ$. Данные параметры облучения близки условиям экспериментов [2], в которых испарялись оксиды металлов. Поскольку для испарения меди требуется большая мощность облучения, чем для оксида гадолиния [2], выбранная здесь плотность тока несколько превышала значение из [2].

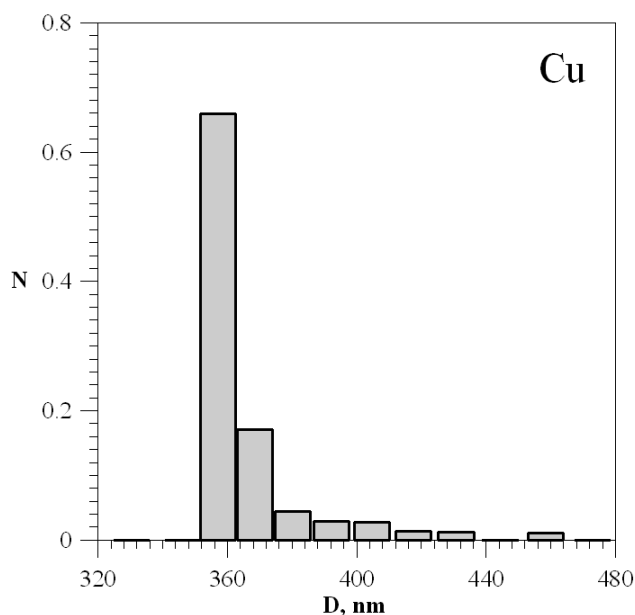


Рис. 1. Распределение доли частиц меди (Cu) по размерам в режиме частичного испарения из твердой фазы.

При движении плазменного факела в охладителе вещество находится в метастабильном состоянии и в парах металла образуются ядра конденсации. Результаты численного эксперимента свидетельствуют о том, что в пересыщенном паре образуются ядра конденсации размером менее 1 нм. При конденсации пара на ядрах формируются частицы размером $1 \div 10 \text{ нм}$.

Поскольку при гомогенной конденсации в плазменном факеле присутствует большое количество частиц с размерами несколько нанометров, то существенна коагуляция капель. В результате коагуляции образуются частицы размером до 200 нм. Данный размер частиц характерен для

экспериментов [2]. Удельная поверхность частиц составляет $\sim 40 \text{ м}^2/\text{г}$ (без коагуляции до $200 \text{ м}^2/\text{г}$).

Важным фактором, влияющим на формирование спектра наночастиц в плазменном факеле, является скорость охлаждения. В общем случае при генерации наночастиц в плазменном факеле можно выделить два режима охлаждения: медленный и быстрый. На рис.2 приведены распределения доли наночастиц меди по размерам при различных режимах охлаждения. Исходя из результатов численных исследований будем считать «медленным охлаждением» режим (рис. 2а), при котором скорость охлаждения плазмы не превышает 10^8 К/с . В режиме медленного охлаждения (рис. 2а) скорость охлаждения составила $2.2 \cdot 10^7 \text{ К/с}$. Такой режим охлаждения в наших расчетах был достигнут заданием температуры стенки z_0 охладителя 300 К , которая находилась на расстоянии 0.5 м от мишени. В режиме быстрого охлаждения (рис. 2б) скорость охлаждения составила более $1.1 \cdot 10^8 \text{ К/с}$. Такой режим охлаждения был достигнут заданием температуры стенки z_0 охладителя 300 К , которая находилась на расстоянии 0.1 м от мишени.

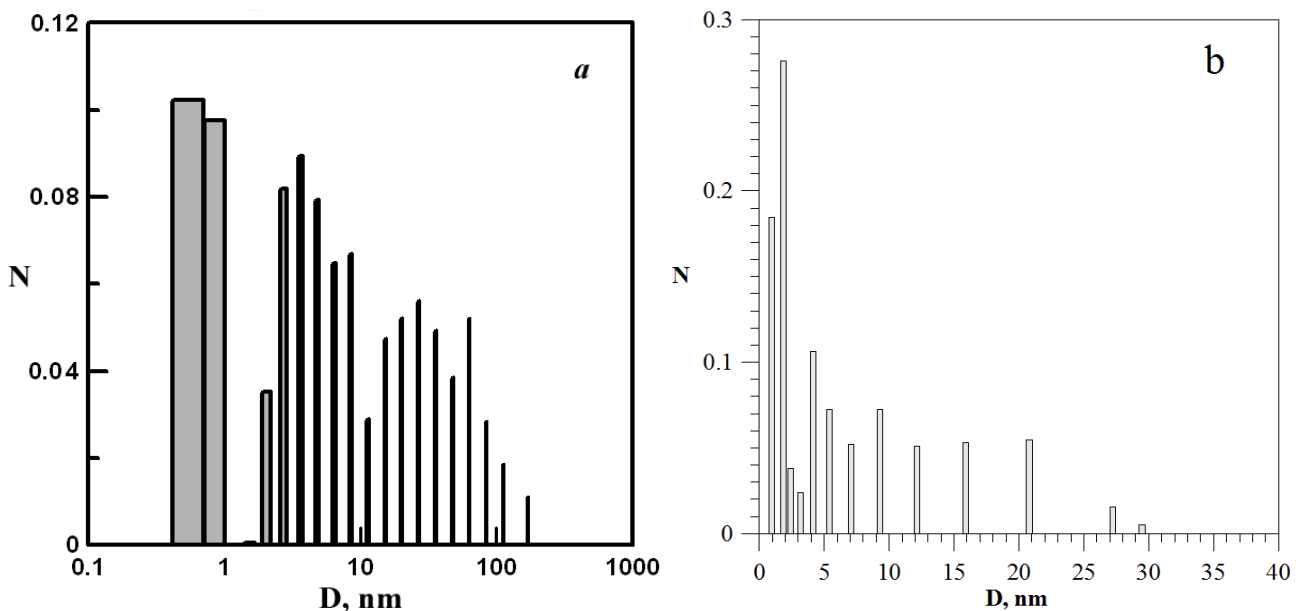


Рис. 2. Распределение доли ультрадисперсных частиц меди (Cu) по размерам.

а) Режим медленного охлаждения, б) Режим быстрого охлаждения.

В работе [4] имел место режим испарения вещества из расплава. Следуя параметрам электронного пучка из работы [4], проведено численное моделирование генерации ультрадисперсных частиц при испарении мощным электронным пучком материала, находящегося в жидкой фазе. Параметры электронного пучка: энергия электронов $T_b = 1.4$ МэВ, ток пучка $I_b = 70$ мА, плотность мощности на мишени $W_t = 4.9$ МВт/см², диаметр пучка на мишени $d_t = 1.6$ мм, угол падения пучка на мишень $\Theta = 10^\circ$, плотность тока пучка, вышедшего из ускорителя $j_b = 3.5$ А/см².

В экспериментах [4] медь (Cu) была предварительно расплавлена электронным пучком меньшей мощности. В численных расчетах медь перед облучением находилась в состоянии расплава при нескольких различных температурах и соответствующих им плотностях на бинадали. Проводились численные эксперименты при следующих начальных условиях: а) $T = 1500$ К, $\rho / \rho_0 = 0.92$; б) $T = 2000$ К, $\rho / \rho_0 = 0.90$; в) $T = 2500$ К, $\rho / \rho_0 = 0.87$, где ρ_0 – плотность твердотельной мишени.

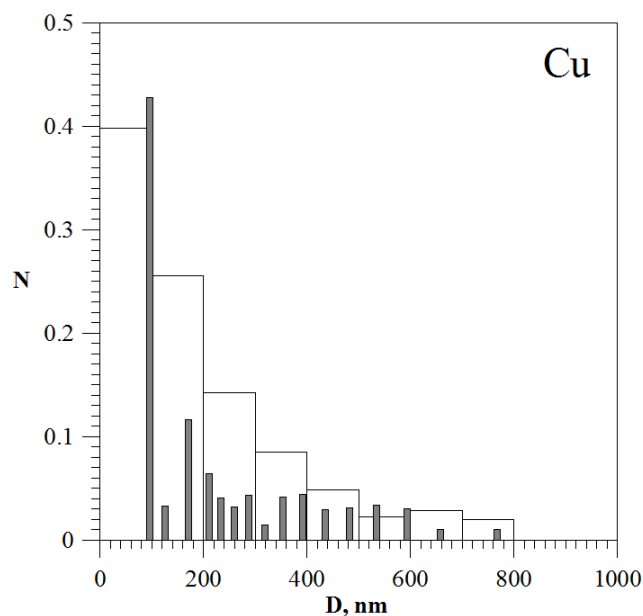


Рис. 3. Распределение доли частиц меди (Cu) по размерам в режиме испарения из жидкой фазы.

При указанных параметрах электронного пучка плотность поглощенной единицей массы энергии не обеспечивает полного испарения вещества. Имеет место жидко-капельный механизм испарения. Размеры капель, которые испаряются при облучении расплава, неизвестны. Однако, минимальные размеры частиц, определенные в [4], составляют величину ~ 40 нм. Поэтому в приведенных ниже расчетах начальный радиус капли $R^{(f)}$ при облучении расплава полагается равным 5–20 нм. Поскольку основным механизмом формирования частиц в данном случае является коагуляция, то выбор начальных размеров капель не оказывает существенного влияния на конечный результат.

На рис. 3 представлено распределение доли ультрадисперсных частиц меди по размерам (N – доля). Частицы имеют диаметр до 770 нм, причем 95 % частиц имеют диаметр менее 500 нм, что соответствует диапазону размеров частиц, полученных в экспериментах [4]. Основным процессом, определяющим формирование спектра размеров ультрадисперсных частиц в режиме испарения из жидкой фазы, является коагуляция частиц.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Для описания течений и моделирования генерации ультрадисперсных частиц в плазменном факеле предложена и реализована модель гетерогенных сред, которая описывает динамику системы, состоящей из пара, инертного газа и частиц различных размеров и термодинамических состояний. В модели учтены процессы теплопроводности, теплообмена и трения между компонентами, релаксации компонент к равновесному состоянию, конденсации, испарения, и коагуляции частиц вследствие их столкновений. Модель обеспечивает строгое выполнение законов сохранения массы, импульса и энергии с точностью более 99 %.

2) Проведенные численные эксперименты позволили исследовать механизмы и закономерности образования ультрадисперсных частиц в плазменном факеле металла, облучаемого мощным электронным пучком.

3) В режиме частичного испарения из твердой фазы размер частиц определяется размером кристаллитов в твердой фазе и плотностью вложенной в мишень энергии, и основным механизмом формирования частиц является конденсация пара на каплях, являющихся остатками кристаллитов.

4) В режиме полного испарения основным механизмом образования ультрадисперсных частиц диаметром $1\div 10$ нм является гомогенная конденсация. Ультрадисперсные частицы диаметром $10\div 200$ нм образуются в результате коагуляции более мелких частиц.

5) Охладитель плазменного факела играет существенную роль при формировании спектра ультрадисперсных частиц в режиме полного испарения. При скорости охлаждения более 10^8 К/с ультрадисперсные частицы имеют размеры $1\div 30$ нм и формируются преимущественно путем конденсационного роста. При скорости охлаждения менее 10^8 К/с частицы имеют размеры $1\div 200$ нм и формируются преимущественно путем коагуляции.

6) В режиме испарения из жидкой фазы формируются частицы размером от 10 нм до субмикронных размеров, и основными механизмами, отвечающим за формирование спектра размеров частиц, являются коагуляция мелких частиц и конденсационный рост крупных частиц.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

В рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Фенько, Е.Л. Моделирование генерации ультрадисперсных частиц при облучении металлической мишени мощным электронным пучком / Н.Б. Волков, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // Известия вузов. Физика. 2009. № 8/2. С. 489–492.

2. Фенько, Е.Л. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, В.С. Седой, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 4. С. 77–80.

3. Фенько, Е.Л. Моделирование генерации металлических нанопорошков при электронно-лучевом нагреве. / Н.Б. Волков, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // Вестник Челяб. гос. ун-та. 2009. № 25 (163). Физика. Вып. 6. С. 34–42.

В сборниках трудов конференций:

4. Fenko, E.L. Modeling of Formation of Disperse Particles in the Plasma Torch of the Metal Irradiated with the Powerful Beams of Charged Particles / E.L. Fenko, N.B. Volkov and A.P. Yalovets // 9-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings, Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS. 2008. P. 701–704.

5. Fen'ko, E.L. Physical Mechanisms of Metal Nanoparticle Generation at Electric Explosion / N.B. Volkov, E.L. Fen'ko, A.E. Mayer, V.S. Sedoi, and A.P. Yalovets // 15-th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings, Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS. 2008. P. 221–224.

6. Фенько, Е.Л. Моделирование образования нанодисперсных частиц в плазменном факеле, возникающем при облучении металлической мишени мощным электронным пучком. / Н.Б. Волков, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // Труды XVI Зимней школы по механике сплошных сред (механика сплошных сред как основа современных технологий) (Электронный ресурс). Пермь: ИМСС УрО РАН. 2009. Электрон. оптич. диск. (CD).

В тезисах конференций:

7. Фенько, Е.Л. Моделирование образования дисперсных частиц в плазменном факеле металла, облучаемого мощным потоком заряженных частиц / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 2007. С. 265–266.

8. Фенько, Е.Л. Механизмы разрушения проводников и генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, В.С. Седой, Е. Л. Фенько, Н. А. Яворовский, А. П. Яловец // Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 2007. С. 132–133.

9. Фенько, Е.Л. Динамика металлов при импульсном воздействии интенсивных потоков электромагнитной энергии / Н.Б. Волков, Е.А. Жукова, Н.Д. Кундикова, А.Я. Лейви, А.Е. Майер, В.С. Седой, К.А. Талала, Е.Л. Фенько, Н.А. Яворовский, А.П. Яловец // Научно-координационная сессия Совета РАН по физике низкотемпературной плазмы “NRP-2007”. Москва. Институт

экстремальных состояний вещества ОИВТ РАН, Совет РАН по физике низкотемпературной плазмы. Тезисы докладов. 2007. www.ihed.ras.ru/npp2007/abstracts/20_Volkov.pdf (электронное издание).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramsay, J.D.F. Ultrafine oxide powders prepared by electron beam evaporation / J.D.F. Ramsay, R.G. Avery // *J. of Material Science*. – 1974. – Vol. 9. – P. 1681–1695.
2. Ильвес, В.Г. Использование импульсного электронного пучка для получения нанопорошков оксидов / В.Г. Ильвес, Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, С.К. Rhee // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Т. 2. – № 9–10. – С. 96–101.
3. Бардаханов, С.П. Применение мощных ускорителей электронов типа ЭЛВ для получения нанопорошков / С.П. Бардаханов, А.И. Корчагин, Н.К. Куксанов, А.В. Лаврухин, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, В.В. Черепков, М.Е. Вейс // *Problems of atomic science and technology*. – 2008. – № 5. – Series: Nuclear Physics Investigations (50). – С. 165–168.
4. Temuujin, J. Preparation of copper and silicon/copper powders by a gas evaporation-condensation method / J. Temuujin, S.P. Bardakhanov, A.V. Nomoev, V.I. Zaikovskii, A. Minjigmaa, G. Dugersuren and A. Van Riessen // *Bull. Mater. Sci*. – 2009. – V. 32. – № 5. – P. 543–547.
5. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. М.: Наука, – 1987. – 464 с.
6. Куропатенко, В.Ф. Модель гетерогенной среды / В.Ф. Куропатенко // *Доклады академии наук*. – 2005. – Т. 403. – № 6. – С. 761–763.
7. Яловец, А.П. Пакет программ BETAIN (BEAM TARGET INTERACTION) / А.П. Яловец, А.Е. Майер // *Proc. of 6-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. – Tomsk. – 23–28 September 2002. – P. 297–299.
8. Архипов, А.В. Взаимодействие плотного длинноимпульсного электронного потока с факелом продуктов разрушения твердотельной мишени. / А.В. Архипов, Г.Г. Соминский // *ЖТФ*. – 2001. – Т. 71. – В. 9. – С. 38–44.

9. Колгатин, С.Н. Интерполяционные уравнения состояния металлов / С.Н. Колгатин, А.В. Хачатурьянц // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 20. – № 3. – С. 447–452.

10. Горбунов, В.Н. Неравновесная конденсация в высокоскоростных потоках газа / В.Н. Горбунов, У.Г. Пирумов, Ю.А. Рыжов. М.: Машиностроение. – 1984. – 200 с.

11. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей // Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2004. – 592 с.

12. Яловец, А.П. Расчёт течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // ПМТФ. – 1997. – Т. 38. – № 1. – С. 151–166.

13. Волков, Н.Б. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, В.С. Седой, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – В. 4. – С. 77–80.

ФЕНЬКО Евгений Леонидович

ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ МОЩНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 29.03.2010. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч-изд. л. 1,2. Тираж 100 экз.

Заказ № _____. Бесплатно.

Челябинский государственный университет

454001 Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129

Издательство Челябинского государственного университета

454001 Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 57б.