



на правах рукописи

Свирина Вера Владимировна

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 01.04.05 - Оптика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1 8 АПР 2013

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена на кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения инженерно-физического факультета Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Яковлев Евгений Борисович

Официальные оппоненты: **Федоров Анатолий Валентинович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
НИУ ИТМО, заведующий кафедрой «Оптической
физики и современного естествознания»

Макин Владимир Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
ОАО «Научно-исследовательский институт
оптико-электронного приборостроения», ведущий
научный сотрудник

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения

Защита состоится 2 апреля 2013 г. в 15 ч. 50 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.02 в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, ауд. 285.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Автореферат разослан «27» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.02
кандидат физико-математических наук, доцент



Бурункова Ю.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Вплоть до 1970-х годов считалось, что перегрев твердых тел выше температуры плавления невозможен. С появлением лазеров с ультракороткой длительностью импульсов было экспериментально показано существование такого перегрева. Появилась необходимость выяснить условия перегрева и плавления твердых тел в неравновесных условиях. Эти вопросы обсуждаются на многих конференциях, и в частности на ежегодном, проходящем с 2003 г. симпозиуме «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах». Сегодня анализ кинетики неравновесного плавления (в условиях перегрева) проводят главным образом методами молекулярно-динамического моделирования, поскольку попытки рассматривать перегрев в рамках гомогенного и гетерогенного плавления не увенчались успехом.

Широкое практическое применение лазеров, в том числе с пикосекундными и фемтосекундными длительностями импульсов в режимах, не приводящих к абляции, требуют изучения плавления твердых тел и кристаллизации расплавов в неравновесных условиях, что позволило бы более эффективно использовать фемтосекундные лазеры для обработки материалов. Например, для модификации, в том числе аморфизации, и структурирования поверхности металлов.

Существующие в настоящее время способы получения тонких слоев аморфной фазы на поверхности металлических сплавов путем быстрого охлаждения расплавов [1], применимы для ограниченного набора сплавов. Кроме того, быстрое охлаждение расплава позволяет получать качественно иное структурное состояние в металлах по сравнению с традиционными металлургическими процессами, создает возможность замораживания новых метастабильных фаз и получения металлов с новыми механическими свойствами [2]: большей твердостью, коррозионной стойкостью, улучшенными магнитными характеристиками и другими специфическими свойствами.

Применение лазеров с ультракороткими длительностями импульсов позволяет существенно увеличить скорость охлаждения, что дает возможность стеклования даже чистых металлов.

Взаимодействие ультракоротких лазерных импульсов с веществом имеет ряд особенностей по сравнению с более длительными воздействиями. Во-первых, длительность воздействия в данном случае сравнима с временами термализации и фазовых переходов в веществе, поэтому нагревание материала и фазовые переходы необходимо рассматривать в неравновесных условиях. Во-вторых, высокие скорости нагревания (и охлаждения) приводят к быстрому протеканию фазовых переходов и перегреву вещества выше температуры плавления (или переохлаждению при остывании).

Если физика переохлажденных состояний изучена [3] достаточно хорошо благодаря их широкому использованию при производстве новых материалов, то перегретым состояниям до недавнего времени уделялось значительно меньше внимания в основном из-за трудности их экспериментального исследования и отсутствия практических применений. Но ситуация изменилась с появлением фемтосекундных лазеров, которые стали использоваться для получения наночастиц и наноматериалов [4, 5].

Необходимо отметить, что при быстром лазерном нагревании кинетика фазовых переходов существенно отличается от их протекания в условиях медленного нагревания [6-9]. Однако в настоящее время не существует общепризнанной теории плавления и кристаллизации в данных условиях. Для объяснения процесса плавления предложены различные механические и термодинамические теории [10], которые страдают теми или иными недостатками и не могут дать объяснение наблюдаемым экспериментально [11, 12] особенностям быстрого плавления металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов: перегреву выше температуры плавления и постоянству температуры при плавлении. В данной работе предлагается использовать модифицированную вакансионую модель плавления, которая позволяет объяснить основные особенности плавления ультракороткими

импульсами (УКИ), а также последующей кристаллизации с возможностью аморфизации.

Экспериментальное исследование фазовых переходов под действием ультракоротких лазерных импульсов вызывает трудности из-за малых времен и малых размеров области воздействия, поэтому для исследования применялись численные методы, позволяющие достаточно полно изучить фазовые переходы в металлах при воздействии ультракоротких лазерных импульсов.

Целью диссертационной работы является анализ механизмов плавления и кристаллизации металлов при воздействии УКИ.

Задачи исследования

1. Предложить физическую и математическую модель плавления металлов при воздействии УКИ;
2. Предложить физическую и математическую модель кристаллизации металлов после плавления при воздействии УКИ;
3. На основе предложенных моделей провести численное моделирование фазовых переходов в металлах при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов;
4. Проанализировать возможность аморфизации металлов после плавления ультракороткими лазерными импульсами.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Модифицированная вакансионная модель плавления адекватно описывает процесс плавления металлов под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. Как показал численный анализ, плавление начинается и протекает при температуре решетки большей температуры стационарного плавления. При этом поддерживается постоянство температуры расплава, которая зависит от величины плотности энергии лазерного импульса.
2. Глубина проплава может достигать для металлов нескольких десятков нанометров. Поэтому расплавятся полностью только кристаллы меньшего размера.

3. Кристаллизация термодинамически неравновесного расплава, полученного при воздействии на металл лазерного импульса фемтосекундной длительности, происходит главным образом на спонтанно образовавшихся зародышах, а не на не полностью расплавленных кристаллах. Доля аморфной фазы в застывшем материале определяется результатами фемтосекундного плавления и теплофизическими свойствами материала.

Научная новизна работы

1. Модифицированная вакансионная модель объясняет основную особенность плавления при быстром нагревании металлов ультракороткими лазерными импульсами: плавление происходит при температурах больших, чем температура плавления.

2. Анализ процесса кристаллизации термодинамически неравновесных расплавов металлов после плавления ультракороткими лазерными импульсами показал, что доля аморфной фазы в застывшем материале определяется состоянием расплава после фемтосекундного плавления и теплофизическими свойствами материала.

3. Показано, что даже при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов аморфизация металлов не всегда возможна.

Практическая ценность

Разработан метод анализа режимов нагревания и остывания, с помощью которого можно подобрать оптимальные условия для получения металлов в аморфном состоянии. Результаты использованы в курсе лекций «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» для магистров, обучающихся по магистерской программе 200200.68 «Лазерные микро- и нанотехнологии».

Реализация результатов работы

Частично работа выполнялась в рамках грантов РФФИ:

– № 09-02-00932-а «Исследование условий возбуждения и распространения поверхностных плазмон-поляритонов и волноводных мод в

металлах, полупроводниках и широкозонных диэлектриках при воздействии фемтосекундного лазерного излучения», 2009 - 2011 г;

– № 12-02-01194-а «Структурное моделирование воздействия ультракоротких лазерных импульсов на сильно поглощающие полупроводники»;

– № 10-02-00208-а «Модификация структуры стеклокристаллических тонких слоев под действием сверхкоротких импульсов лазерного излучения»;

по государственным контрактам:

– П1134 от 27 августа 2009 «Новый класс явлений структурно–фазовой перестройки в стеклокристаллических средах под действием лазерного излучения»;

– № 11.519.11.4017 от 21 октября 2011 г. «Лазерная модификация и структурирование твердых тел как метод создания новых элементов информационно-коммуникационных систем»;

по проекту № 7846 «Фундаментальные процессы обратимых лазерно-индуцированных преобразований структуры и свойств стеклокерамик и стекол» 07-08 гг.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

XXXVIII научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО, СПб, 03 - 06 Февраля 2009; VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых, СПб, 14 - 17 Апреля 2009; XXXIX научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО, СПб, 02 - 05 Февраля 2010; VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых, СПб, 20 - 23 Апреля 2010; Международная конференция "Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий" (FLAMN-10), СПб - Пушкин, 05 - 08 Июля 2010; XL научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО, СПб, 01 - 04 Февраля 2011; VIII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых, СПб, 12 - 15 Апреля 2011; VII международная конференция молодых

ученых и специалистов «Оптика – 2011», СПб, 17-21 октября 2011; XLI научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, СПб, 31 января - 03 февраля 2012; I Всероссийский конгресс молодых ученых, СПб, 10–13 апреля 2012; X International Seminar "Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies", Petrovac, Montenegro, 26 May–01 June 2012; XLII научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, СПб, 29 января - 01 февраля 2013.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Материалы изложены на 108 страницах, включая 21 рисунок, 2 таблицы и список литературы из 58 наименований на 6 страницах.

Личный вклад автора

1. Разработана математическая модель вакансионного плавления металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов.
2. Проведено численное исследование кинетики плавления металлов при воздействии УКИ.
3. Разработана математическая модель кристаллизации металлов на основе изменения концентрации вакансий в расплаве при его остывании после плавления при воздействии ультракоротких лазерных импульсов
4. Проведено численное исследование кинетики кристаллизации металлов после плавления при воздействии лазерных ультракоротких импульсов.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность исследований, изложены цели, задачи и научная новизна работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определена структура диссертации.

В главе 1 приведен аналитический обзор литературных данных о протекании плавления и кристаллизации металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов.

В разделе 1.1 описаны экспериментальные данные по воздействию ультракоротких лазерных импульсов на металлы. Показано, что во всех

экспериментах по плавлению металлов ультракороткими лазерными импульсами наблюдался перегрев выше температуры плавления. Однако авторы работ не дают объяснения этого наблюдаемого эффекта.

В разделе 1.2 представлено модельное описание плавления и кристаллизации металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов в термодинамическом приближении.

В разделах 1.3 и 1.4 рассмотрены преимущества и недостатки различных моделей плавления и кристаллизации металлов. Отдельное внимание уделено модифицированной вакансионной модели плавления, использованной в работе для численного моделирования плавления металлов при воздействии УКИ. Модифицированная вакансионная модель позволяет оценить основные характеристики процесса плавления: связь величины теплового потока с температурой поверхности расплава при температурах больше температуры плавления, скорость подачи энергии, при которой плавление при температуре плавления не произойдет, зависимость температуры от времени, время достижения температуры, при которой начнется плавление и время проплавления.

В разделе 1.5 дается полная постановка задачи.

Глава 2 посвящена описанию физико-математической модели процесса плавления металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов.

В разделе 2.1 приведена математическая модель плавления металлов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на основе модифицированной вакансионной модели плавления.

Для анализа процесса нагревания использована двухтемпературная модель в классической постановке [6] и уравнение диффузии вакансий для исследования кинетики изменения концентрации вакансий.

Форма импульса лазерного излучения задана выражением $q = q_0 \exp\left[-(t-t_1)^2/t_2^2\right]$ ($t_1=10^{-13}$ с, $t_2=5\cdot 10^{-14}$ с – характерные времена,

определяющие форму лазерного импульса, q_0 – максимальная в течение импульса плотность мощности лазерного излучения).

Распределение вакансий по глубине определено из решения нелинейного нестационарного уравнения диффузии вакансий с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$\mu \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \mu \frac{\partial n}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$n(z, 0) = n_0$ - начальные условия,

$$q_m = D \varepsilon(n) \frac{\partial n(0)}{\partial z}, \quad - \text{граничные условия,}$$

$$n(z_{\max}, t) = n_0$$

где $\mu = \partial F / \partial n = E - \alpha(1 - \exp(-nv))(1 + nv) - k_B T (\ln(Ne/n) - 1)$ - химический потенциал вакансий, $F = En - \alpha n [1 - \exp(-nv)] - k_B T n \ln(Ne/n)$ - свободная энергия, E - энергия образования вакансии, n - концентрация вакансий, α - энергия взаимодействия вакансий, v - объем в котором взаимодействуют вакансии, N - концентрация узлов кристаллической решетки, e - основание натурального логарифма, k_B - постоянная Больцмана, $\varepsilon(n)$ - энергия образования и растворения вакансии, $D = D_0 \exp(-E_d / k_B T)$ - коэффициент диффузии вакансий, $D_0 = a_0^2 / \tau_0$ - частотный фактор диффузии, a_0 - межатомное расстояние; τ_0 - постоянная, соизмеримая с периодом собственных колебаний атомов в узлах кристаллической решётки (10^{-13} с), E_d - энергия диффузии вакансий.

В разделе 2.2 приведен алгоритм численного моделирования плавления при лазерном нагревании ультракороткими импульсами. Программа для численного моделирования была написана на языке Delphi (Object Pascal). Система уравнений теплопроводности и уравнение диффузии вакансий решены методом разностной аппроксимации с применением явной разностной схемы. Чтобы оценить влияние условий воздействия и свойств материала на кинетику протекания фазовых переходов, смоделированы режимы воздействия УКИ на серебро и железо.

В разделе 2.3 приводятся результаты численного моделирования плавления. Полученные результаты наглядно продемонстрировали отличие кинетики процесса плавления при воздействии ультракоротких лазерных импульсов от плавления в квазистационарных условиях, подтвердив наличие перегрева выше температуры плавления (рисунок 1), величина которого определяется скоростью подвода тепла (плотностью мощности лазерного излучения) и свойствами материала. Вследствие значительного различия в свойствах серебра и железа, полученные зависимости перегрева от поглощенной плотности мощности лазерного излучения неодинаковы: нелинейная для серебра и линейная для железа в данном диапазоне температур.

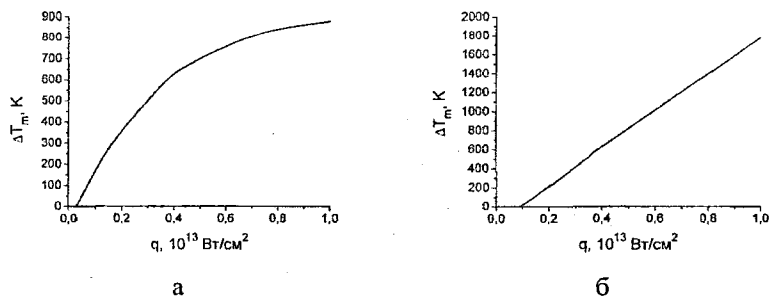


Рисунок 1. Зависимость перегрева выше температуры плавления на поверхности от поглощенной плотности мощности лазерного излучения: а – серебра, б – железа. Длительность импульса 100 фс

В разделе 2.4 на основе полученных результатов были сделаны выводы. По полученным расчётным значениям глубины проплавления стало возможно оценить размеры расплавившихся кристаллитов, в рассмотренных условиях расплавиться могут только кристаллы размером не более нескольких десятков нанометров. Также в этом разделе на основе вакансионной модели плавления объясняются основные особенности лазерного плавления ультракороткими импульсами: перегрев выше температуры плавления, постоянство температуры поверхности при лазерном плавлении и наличие потока энергии к фронту плавления без градиента температуры в расплавленном слое.

Физико-математическая модель кристаллизации металлов после плавления УКИ представлена в главе 3.

В разделе 3.1 на основе модели «жидкость – деформированный вакансиями кристалл» [8] описаны процессы образования и роста зародышей кристаллической фазы. Согласно данной модели, кристаллизация расплава соответствует переходу вещества при температуре плавления из аморфного состояния, соответствующего второму минимуму свободной энергии с концентрацией вакансий n_{20} , в кристаллическое, соответствующее первому минимуму с концентрацией вакансий n_{10} (рисунок 2). Образование зародыша кристаллической фазы (предполагается, что зародыши в аморфных телах и жидкостях имеют сферическую форму) в некотором объеме V аморфной фазы приводит к флуктуационному уменьшению концентрации вакансий, что вызывает уменьшение свободной энергии этого объема на величину [8]:

$$\Delta F = \Delta F_{cv}V + \gamma S = (F_c - F_a)V + 4\pi\gamma \left(\frac{3bv_a}{4\pi} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

где V – объем зародыша кристаллической фазы, S – площадь поверхности зародыша кристаллической фазы, γ – поверхностное натяжение на границе кристаллической и аморфной фаз (для расплава серебра $\gamma=0,000002$ Дж/см²), F_c – высота потенциального барьера со стороны первого минимума (см. рисунок 2), F_a – высота потенциального барьера со стороны второго минимума, b – число атомов в зародыше, $v_a=V/b$, v_a – объем атома, радиус зародыша $r=(3bv_a/(4\pi))^{1/3}$.

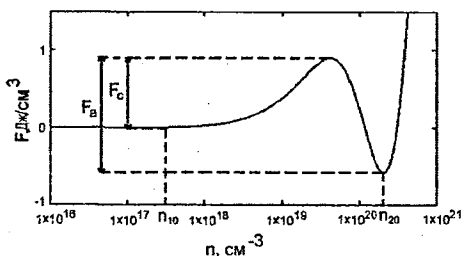


Рисунок 2. Свободная энергия кристалла при температурах ниже температуры плавления

Из (2) при условии $\Delta F = 0$ можно определить критический размер зародыша (зародыши размером больше критического продолжают расти при уменьшении температуры) $r_{sp} = -3\gamma / (F_c - F_a)$.

Распределение зародышей по размерам при данной температуре, исходя из вероятностей их образования и исчезновения, можно представить в виде [3]:

$$m(r) = N \exp\left(-\frac{(F_c - F_a)V + \gamma S}{k_B T}\right). \quad (3)$$

Количество атомов в зародыше размера r можно определить как $b = V/v_a = 4\pi r^3/3v_a$. Концентрация атомов в зародыше кристаллической фазы $N_a^c = b/V$.

Образование m зародышей каждый объемом V приведет к изменению концентрации атомов в жидкой фазе на величину $\Delta N_a^l = b \cdot m$.

Скорость роста зародышей за счет присоединения и выхода атомов из зародыша рассчитана по формуле

$$V_s = NV^{2/3} \exp\left(-\frac{F_c V - \gamma V^{2/3}}{Nk_B T V}\right) \left[\exp\left(\frac{F_c - F_a}{Nk_B T} - \frac{2\gamma V^{1/3}}{Nk_B T}\right) - 1 \right]. \quad (4)$$

Присоединение атомов к зародышу и выход атомов из зародыша сопровождается присоединением и выходом вакансий, соответственно.

В разделе 3.2 приведен алгоритм численного моделирования кристаллизации металлов после лазерного нагревания ультракороткими импульсами.

Для расчета температуры расплавленной области, также как и при моделировании плавления, была численно решена система уравнений теплопроводности для электронов и решетки.

На каждом шаге по времени рассчитывались минимумы свободной энергии для аморфной и кристаллической фаз. Для этого вычислялись концентрации вакансий, при которых выполнялось условие $\partial F / \partial n = 0$, и по (2) были рассчитаны значения свободных энергий, соответствующие данным

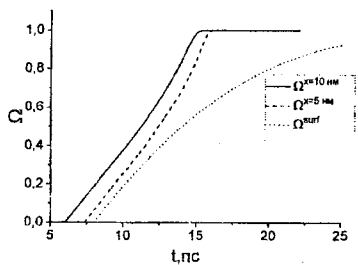
концентрациям. По рассчитанным ранее минимумам свободной энергии был определен критический радиус зародыша для данной температуры и количество зародышей критического размера. Исходя из количества и размеров образовавшихся зародышей, рассчитаны концентрации атомов в зародышах кристаллической фазы и в аморфной фазе. Затем определен рост зародышей критического размера за счет присоединения атомов к зародышу (4).

Объем вещества считался закристаллизовавшимся, если концентрация атомов в аморфной фазе становилась равной 0, при этом пересчитывалась глубина проплавления.

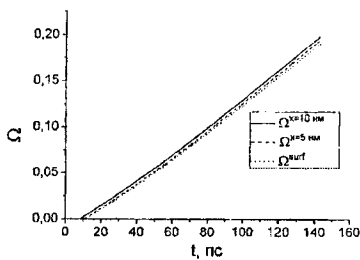
В разделе 3.3 приводятся результаты численного моделирования процесса кристаллизации.

Результаты сравнения кинетики затвердевания разных материалов показывают, что термодинамические свойства веществ оказывают большее влияние динамику процесса кристаллизации, чем динамика температуры. Из полученных результатов по кристаллизации серебра (рисунки 3а и 4а) видно, что динамика кристаллизации на поверхности отличается от динамики на глубине. Это вызвано тем, что после быстрого плавления концентрация вакансий на поверхности больше, чем на глубине, и превышает равновесную концентрацию для данной температуры. В процессе остывания концентрация вакансий на поверхности уменьшается за счет смерти вакансий, но увеличивается за счет диффузии вакансий из глубины. На глубине скорость кристаллизации тем меньше, чем больше скорость остывания.

Концентрация вакансий и скорость их диффузии играют важную роль в процессе кристаллизации. В случае железа низкие скорости кристаллизации указывают на возможность аморфизации.

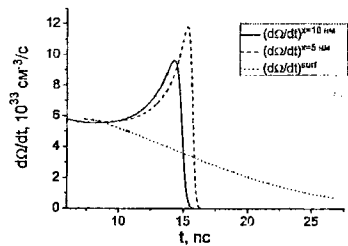


а

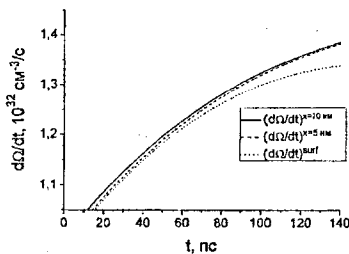


б

Рисунок 3. Зависимость объемной доли кристаллической фазы на поверхности и в глубине от времени: а – для серебра, б – для железа

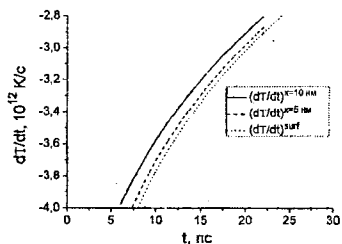


а

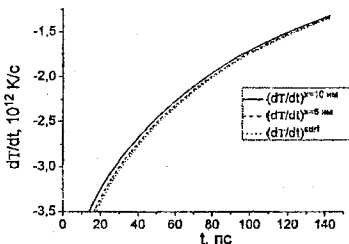


б

Рисунок 4. Зависимость скоростей кристаллизации $d\Omega/dt$ от времени на поверхности и в глубине: а – для серебра, б – для железа



а



б

Рисунок 5. Зависимость скоростей охлаждения от времени на поверхности и в глубине: а – для серебра, б – для железа

В разделе 3.4 на основе полученных результатов численного моделирования были сделаны выводы. Основной вклад в процесс кристаллизации вносит кристаллизация на спонтанно образовавшихся зародышах, так как в объеме расплава не остается не полностью расплавившихся кристаллитов, а кристаллизация с поверхности происходит медленно. В процессе кристаллизации после плавления УКИ создаются условия для образования металлов в аморфном состоянии благодаря быстрому остыванию в совокупности с низкими скоростями кристаллизации некоторых металлов, определяемыми их теплофизическими свойствами. Размеры образующихся зародышей определяются, как теплофизическими свойствами материала, так и объемом расплава.

В заключении дано общее описание полученных результатов, а так же показана научная новизна, актуальность и практическая ценность работы.

Основные выводы и результаты работы:

На основе проведенного анализа существующих моделей плавления металлов показано, что модифицированная вакансионная модель плавления, учитывающая взаимодействие вакансий, может быть использована для анализа плавления металлов при фемтосекундном лазерном воздействии.

Кинетика гетерогенного плавления металлов при фемтосекундном лазерном воздействии проанализирована в рамках модифицированной вакансионной модели плавления с использованием уравнения диффузии вакансий в неравновесных условиях. Показано, что плавление происходит при температурах выше температуры равновесного плавления. Расплав находится в термодинамически неравновесном состоянии. Глубина проплавления определяется величиной плотности потока лазерного излучения и свойствами материала и может достигать десятков нанометров.

Проведен анализ кристаллизации термодинамически неравновесного расплава после лазерного фемтосекундного плавления металлов, показано, что при гомогенной кристаллизации процесс протекает при температуре несколько

ниже температуры равновесного плавления. Показано также, что даже при скоростях охлаждения свойственных фемтосекундному лазерному воздействию на металлы ($\sim 10^{12}$ град/с), аморфизация расплавленного слоя реализуется не для всех металлов.

Разработаны численные модели и компьютерные программы для анализа кинетики процессов плавления и кристаллизации металлов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

По перечню ВАК:

1. Яковлев Е. Б., Свирина В. В., Сергаева О. Н. Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов// Известия ВУЗов. Приборостроение– 2010. – №4. – С. 57-63.
2. Яковлев Е. Б., Сергаева О. Н., Свирина В. В. Влияние эмиссии электронов на нагревание металлов фемтосекундными лазерными импульсами// Оптический журнал– 2011. – Т. 78. – № 8. – С. 24-28.

Другие публикации:

3. Svirina V. V., Sergaeva O. N., Yakovlev E. B. Effect of electron emission on solids heating by femtosecond laser pulse // Proceedings of SPIE – 2011. - Vol. 7996. - P. 79960U-1 - 79960U-7.
4. Dyukin R.V., Martsinovskiy G.A., Sergaeva O.N., Shandybina G.D., Svirina V.V., Yakovlev E.B. Interaction of Femtosecond Laser Pulses with Solids: Electron/Phonon/Plasmon Dynamics // Laser Pulses – Theory, Technology, and Applications / edited by I. Peshko. – Croatia: InTech. – 2012. – Chapter 7. – P. 197-219.
5. Sergaeva O. N., Svirina V. V., Yakovlev E. B. Modeling of metals melting and cristallization under the action of ultrashort laser pulse // Mathematica Montisnigri – 2012. - Vol XXIV. – P. 24-28.
6. Svirina V.V., Sergaeva O.N., Yakovlev E.B. Effect of electron emission on solids heating by femtosecond laser pulse // Abstracts of International Conference

“Fundamentals of Laser Assisted Micro– and Nanotechnologies” (FLAMN-10). – Saint-Petersburg: 2011. – P. 48.

7. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Численное моделирование лазерного плавления металлов ультракороткими импульсами // Сборник трудов конференции молодых ученых, Выпуск 3. Оптоинформатика, наносистемы и теплотехника. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 53-58.

8. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Исследование влияния эмиссии электронов на лазерное нагревание материалов фемтосекундными импульсами // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 1. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – С. 130-131.

9. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Инженерные оценки результатов воздействия ультракоротких лазерных импульсов на материалы // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – С. 190-191.

10. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Моделирование окисления тонких металлических пленок при воздействии ультракоротких лазерных импульсов // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011».– СПб: НИУИТМО, 2011. – С. 528-529.

11. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Анализ плавления и кристаллизации металлов при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». – СПб: НИУИТМО, 2011. – С. 529-531.

12. Свирина В.В., Сергаева О.Н. Кристаллизация металлов после плавления ультракороткими лазерными импульсами // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – С. 179-180.

Цитированная литература:

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / Под ред. Масумото Ц. / Пер. с япон.- М.: Metallurgia, 1987.- 328 с.

2. Галенко П.К. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – № 5. – С. 48-56.
3. Herlach D.M., Galenko P.K., Holland-Moriz D. Metastable materials from undercooled metallic melts.- Amsterdam: Elsevier, 2005.- 485 p.
4. Eliezer S., Eliaz N., Grossman E., Fisher D., Gouzman I., Henis Z., Pecke S., Horovitz Y., Fraenkel M., Maman S., Lereah Y. Synthesis of nanoparticles with femtosecond laser pulses // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – P. 144119/1-6.
5. Stratakis E., Barberoglou M., Fotakis C., Viau G., Garcia C., Shafeev G. A. Generation of Al nanoparticles via ablation of bulk Al in liquids with short laser pulses // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 12650-12659.
6. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / Под ред. В. И. Конова.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.
7. Rethfeld B., Socolowski-Tinten K., von der Lin de D., Anisimov L.D. Ultrafast thermal melting of laser-excited solids by homogeneous nucleation// Physical review B. – 2002. – Vol. 65. – № 9. – P. 1-4.
8. Яковлев Е. Б. Особенности поведения стекол и стеклообразных материалов при быстром нагревании. – СПб: Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2004. – 88 с.
9. Завестовская И.Н., Канавин А.П., Менькова Н.А. Кристаллизация металлов в условиях сверхбыстрого охлаждения при обработке материалов ультракороткими лазерными импульсами // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – №6. – С. 13-19.
10. Уббелодде А. Плавление и кристаллическая структура / Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 420 с.
11. Williamson S., Mourou G., Li J.C.M. Time-resolved laser-induced phase transformation in aluminium // Phys. Rev. Lett. – 1984. – Vol. 52. – P. 2364-2367.
12. Kandyla M., Shih T., Mazur E. Femtosecond dynamics of the laser-induced solid-to-liquid phase transition in aluminium // Phys. Rev B. – 2007. – Vol. 75. – P. 214107-1 - 214107-7.

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении
«Университетские телекоммуникации»
197101, Санкт-Петербург, Саблинская ул., 14
Тел. (812) 233 46 69. Объем 1,0 у.п.л.
Тираж 100 экз.