

На правах рукописи

Богоносков Константин Александрович

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕДИ В
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность 05.27.06:

Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении науки
Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

Отделение физики твердого тела

Научный руководитель:

Максимовский Сергей Николаевич

Ведущий научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельности МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кульчицкий Николай Александрович

Ведущий научный сотрудник
Московского государственного
технического университета радиотехники,
электроники и автоматики
доктор химических наук, профессор

Кустов Евгений Федорович

Профессор кафедры ФТЭМК
Национального исследовательского
университета «Московский
энергетический институт»,
доктор физико-математических наук,
профессор, член корр. РАИНЖ им. А.М.
Прохорова

Ведущая организация:

Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Московский
государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ
им. Н.Э. Баумана), г. Москва

Защита диссертации состоится « 29 » октября 2015 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.132.06 в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3, ауд. 212.

Отзывы на автореферат и диссертацию отправлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, НИТУ «МИСиС», подразделение 219

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

Костишин Владимир Григорьевич

Общая характеристика работы

Актуальность исследования.

Современные тенденции в развитии электронной техники требуют разработки и исследования новых методик изготовления уникальных наноструктурированных материалов как в виде объемных монокристаллов, так в виде пленок и нанопорошков.

В целом задача подразделяется на ряд вопросов, связанных с возможностью получения чистых металлов на различных подложках. Для решения этой задачи необходимо получение принципиально новых наноструктурированных материалов, а также разработка и исследование уникальных методик их изготовления.

В настоящее время ведутся интенсивные поиски новых методов и методик, позволяющих изготавливать новые наноструктурированные материалы, основой для которых является ряд предшествующих открытий, таких как: светогидравлический эффект (СГЭ), эффект самофокусировки (ЭСФ) и другие [1-4].

Было проведено поисковое исследование новых методик кристаллизации, базирующихся на предложенных выше открытиях. В результате чего, обнаружено новое явление – явление высокоскоростной (взрывной) кристаллизации в плазме, образованной в зоне действия лазерного луча.

Взрывная кристаллизация, в перспективе, может быть использована в ряде наукоемких технологий, таких как изготовление систем защиты от фальсификации, производстве печатных плат для микроэлектроники, фотоэлементов для изготовления гибких солнечных батарей и т.д.

Целью настоящей работы являлось изучение процессов кристаллизации наноструктурированной меди и других металлов, а также разработка принципиально новых методик выращивания таких структур с

воспроизводимыми свойствами, а также разработка физических основ новых методик выращивания монокристаллов металлов и их соединений на аморфных подложках.

Решающий шаг в достижении этой цели был сделан в 2008 году. В ходе поисковых исследований был разработан принципиально новый способ кристаллизации металлов на различных подложках – высокоскоростная нанокристаллизация металлов в низкотемпературной лазерной плазме. Этот способ заключается в следующем: аморфная подложка пропитывается специальным раствором, содержащим исходный материал для кристаллизации, в определенных областях на подложку воздействуют наносекундными импульсами лазерного излучения (чтобы избежать прогрева материала подложки на всю толщину), в результате в зоне действия импульса возникает низкотемпературная плазма, в которой из раствора восстанавливается чистый металл и происходит его кристаллизация по мере остывания плазмы.

Научная новизна работы:

1. Обнаружено и исследовано новое явление высокоскоростной кристаллизации – кристаллизации металлов, на примере меди и ее соединений, возникающей в результате импульсного лазерного воздействия длительностью 100-150 нс на поверхность подложки с предварительно нанесенным на нее водным раствором химического реагента, содержащего соли меди. Вследствие влияния светогидравлического эффекта и эффекта самофокусировки происходит существенное увеличение скорости кристаллизации.
2. Разработан и апробирован способ получения наноструктурированных кристаллитов меди и ее соединений на поверхности аморфной подложки (полимеры, бумага) со скоростями кристаллизации до 100 м/с.

3. При изучении процессов высокоскоростной кристаллизации обнаружено, что кристаллизация материала идет по жидкой подложке, что приводит к отсутствию необходимости кристаллографического соответствия между кристаллизуемым материалом и материалом подложки.
4. Разработана методика нанесения на аморфную подложку протяженных слоев наноструктурированных кристаллитов меди, легированных окислами редкоземельных элементов.

Научная и практическая значимость работы.

Выполненные в настоящей диссертации исследования метода высокоскоростной кристаллизации позволили разработать способы выращивания структур размерами до 50 мкм в теле бумажного листа.

Выполненные в настоящей диссертации исследования метода высокоскоростной кристаллизации позволили разработать способы выращивания структур размерами до 50 мкм на поверхности различного типа аморфных подложек: пластик, бумага, стекло.

На основе работы были разработаны методики изготовления наноструктурированных анодов для получения нового типа энергоэффективных светодиодных устройств

Экспериментальные результаты, полученные в ходе научно-исследовательской работы, позволили разработать методики создания наноструктурированных поверхностей для нанесения люминофоров и изготовления на их основе нового класса энергоэффективных светоизлучающих диодов.

На основе разработанной методики высокоскоростной кристаллизации меди на поверхности и внутри каналов в теле бумажного листа был реализован новый метод защиты ценных бумаг от фальсификации.

На основе проведенных исследований были выполнены государственные контракты:

- контракт на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ № 5523p/7945 по теме: “Разработка технологии защиты ценных бумаг (банкнот, денежных знаков) специальными методами печати на основе нанотехнологий”;

- государственный контракт № 16.513.11.3116 на выполнение научно-исследовательских работ в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы” по теме: “Разработка и создание технологии ИК–фоточувствительных наноструктурированных сред нового типа для оптико-электронных модулей и систем с предельными параметрами по разрешению, быстродействию и чувствительности при минимальном уровне шумов”;

- государственный контракт №14.516.11.0089 от 01.07.2013 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы» по теме: «Создание стурктуруобразующих слоев методом нанокристаллизации в лазерной плазме и получение нового типа энергоэффективных светодиодных устройств».

Достоверность полученных результатов определяется высокой точностью используемых экспериментальных методов, воспроизводимостью экспериментальных данных, хорошим качественным согласием с результатами теоретических расчетов, а также непротиворечивостью с имеющимися литературными данными.

Положения выносимые на защиту.

1. Эффект высокоскоростной кристаллизации меди со скоростями до 100 м/с в низкотемпературной лазерной плазме возникающей

в результате воздействия импульсного воздействия излучения Nd:YAG лазера длительностью 100 нс.

2. Эффект кристаллизации меди по собственной жидкой подложке, образованной в результате импульсного лазерного воздействия.
3. Методика получения наноструктурированных слоев люминофора на основе меди для изготовления нового типа энергоэффективных светодиодных устройств.
4. Методика защиты ценных бумаг от фальсификации, основанная на явлении высокоскоростной кристаллизации.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на постерной секции Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 2012», Международном молодежном инновационном форуме «Селигер-2009» и «Селигер-2010», Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ – 2012, НТТМ-2014, Курбатовских чтениях в 2010, 2011 гг. (НПО «Альфа», г. Москва), Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в науке, технике и образовании» г. Пицунда, Абхазия 2010, 2012 гг., а также на научном семинаре Отделения квантовой радиофизики ФИАН, семинаре Отделения физики твердого тела ФИАН, семинаре Научного центра лазерных материалов и технологий ИОФАН, семинаре Отделения Рентгеновская оптика и рентгеновские методы анализа ФИАН.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы 4 статьи в научных журналах [A1-A4], 1 статья в научно-техническом журнале [A5], 7 работ в материалах международных и всероссийских научных конференций и форумов [A6-A12].

Личный вклад.

В диссертации изложены результаты работ, которые были выполнены автором лично или в соавторстве. В работах, выполненных в соавторстве и включенных в диссертацию автор являлся инициатором (выдвигал идею, формулировал задачу, намечал пути ее решения), разрабатывал методики исследований, участвовал в проведении теоретических расчетов и экспериментов, проводил обработку, анализ, интерпретацию и теоретическое обоснование результатов полученных результатов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ по теме диссертации, списка используемой литературы и четырех приложений. Материал изложен на 99 страницах, содержит 49 рисунков, 119 наименований в списке литературы.

Содержание диссертации

Введение

Во введении обосновываются выбор темы диссертации и её актуальность, описана структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Механизмы кристаллизации металлов (Литературный обзор)

В первой главе в **разделе 1.1** рассмотрены основные сведения о наиболее распространенных методах кристаллизации металлов и полупроводников. Далее в **разделе 1.2** рассматриваются литературные сведения о механизмах взрывной кристаллизации некоторых веществ.

Основное внимание уделяется методам лазерно-индуцированного осаждения металлов на подложках, лазерному отжигу металлов и полупроводников, а также взрывной кристаллизации веществ, находящихся в аморфном состоянии. В разделе приведены схемы установок для реализации описанных методов и некоторые теоретические модели описания процессов высокоскоростной кристаллизации аморфных веществ. Основной упор делается на практическое применение методик в электронной технике.

Глава 2. Методика экспериментов по взрывной кристаллизации меди

Во второй главе описана методика взрывной кристаллизации, рассмотрены методики проведения спектральных и количественных измерений и приведены соответствующие схемы экспериментальных установок.

Схематическое описание установки для высокоскоростной кристаллизации и методики предварительной подготовки подложки дается в разделе 2.1.

В разделе 2.2. описываются использованные экспериментальные методики. Все измерения энергетических и временных характеристик лазеров, используемых в работе, были проведены с использованием измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н и цифрового осциллографа Tektronix серии TPS2000В.

Для исследования структуры поверхности получаемых кристаллитов использовался сканирующий зондовый микроскоп Solver P47 Pro фирмы NT-MDT, работающий в режиме атомно-силовой микроскопии (разрешение до 5 нм). Для анализа тонкой структуры поверхности, а также выполнения локального (с поверхности 1 мкм²) анализа элементного состава был использован микроскоп JSM-6480LV

фирмы JEOL (разрешение до 3 нм), сочетающий возможность работы как в стандартном режиме, так и режиме низкого вакуума. Данный режим позволяет исследовать образцы без напыления токопроводящим слоем, например, металлами.

Отдельно в разделе приведены методики проведения анализа структуры и состава получаемых образцов методами малоуглового рентгеновского рассеяния. А также приводится описание экспериментальной методики и схемы проведения измерения спектров люминесценции структур, легированных редкоземельными элементами.

Глава 3. Модель взрывной кристаллизации меди

В данной главе описана физическая модель протекания процесса высокоскоростной кристаллизации меди на аморфных подложках в результате воздействия импульсов лазерного излучения. Также приведены экспериментальные результаты, подтверждающие достоверность описанной модели кристаллизации.

В разделе 3.1 описана схема механизма кристаллизации меди.

В процессе кристаллизации особую роль играют два физических эффекта: светогидравлический эффект и эффект самофокусировки, а также эффект светореактивного ускорения кластеров частиц. Эффекты открыты в Физическом институте академии наук им. П.Н. Лебедева РАН в 1963 году [1-4].

СГЭ заключается в создании ударного импульса в жидкости при воздействии на нее коротким импульсом лазерного излучения. Для создания взрывного удара в растворе химического реагента необходим наносекундный импульс лазерного излучения. Длительность импульса подбирается таким образом, чтобы мишень не прогревалась на всю толщину.

Уменьшение диаметра лазерного пятна увеличивает концентрацию энергии лазерного луча. Это способствует лучшему проявлению СГЭ. Сжатие луча способствует эффект самофокусировки луча за счет разности показателей преломления в жидкости вне и внутри лазерного луча. Однако, ввиду того, что интенсивность взаимодействия излучения с веществом зависит от длины пути луча в плазме, влияние ЭСФ будет незначительным.

С учетом этих эффектов механизм кристаллизации меди можно кратко изобразить с помощью схемы (Рис.1).

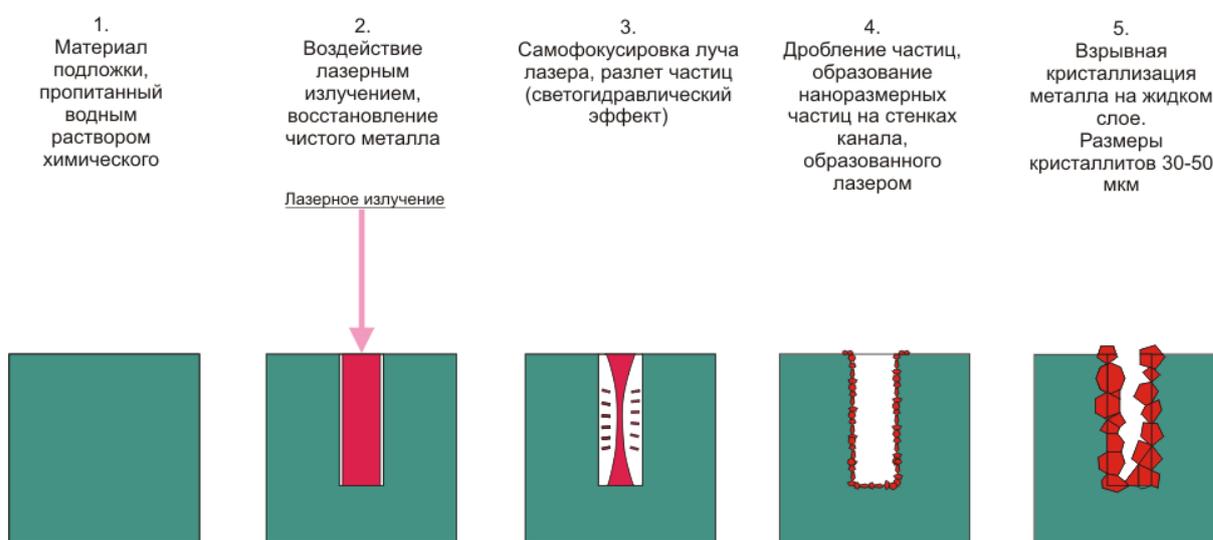


Рис. 1. Схема эксперимента по высокоскоростной кристаллизации меди.

В качестве подложки подходит любая аморфная поверхность. Предварительно на нее наносится раствор химического реагента, состав которого является элементом ноу-хау из патента [12]. При воздействии импульсом лазерного излучения на поверхность подложки, его энергия поглощается материалом подложки и нанесенным на нее химическим реагентом. В результате происходит взрывной процесс перехода материала реагента из твердого состояния в жидкое и газообразное или, при достаточно большой энергии излучения, твердое состояние непосредственно переходит в состояние плазмы. В плазме происходит

восстановление меди и атомарного водорода. Атомы меди формируются в малые кластеры размерами порядка нескольких десятков атомов [14]. Воздействие лазерного импульса с высокой плотностью энергии приводит к локальному повышению давления и возникновению светогидравлического эффекта. Этому эффекту может дополнительно способствовать эффект самофокусировки излучения в среде, в которой существует неоднородность показателя преломления, в данном случае вне и внутри плазменного факела. В результате этого взрывного удара происходит разлет кластеров на стенки подложки, при этом велика вероятность их дробления. Образующиеся наноразмерные частицы легко проникают в материал подложки.

В случае уменьшения размеров частиц вплоть до наноразмерного диапазона происходит их плавление. Для инициации плавления достаточно энергии того же самого лазерного импульса. При этом наблюдается значительное снижение температуры плавления данного материала в отличие от объемного образца. В некоторых случаях температура плавления может уменьшаться в два и более раза [13, 14].

Из-за описанного эффекта расплавление наноразмерных частиц кристаллизуемого материала может происходить при более низкой температуре. В экспериментах по высокоскоростной кристаллизации меди метастабильные частицы начинают плавиться уже при незначительном повышении температуры над комнатной.

В результате это приводит к образованию жидкого слоя на поверхности подложки. При понижении температуры на поверхности данного расплава начинает возникать кристаллизационный слой.

Экспериментально подбирается такой температурный режим кристаллизации, чтобы подложкой служила поверхность расплава. Теплоотвод при этом будет происходить через поверхность расплава. При таких условиях фронт кристаллизации будет иметь вид плоскости и

наиболее благоприятные условия для равномерного рассеяния скрытой теплоты кристаллизации в окружающую среду.

Это приводит к росту слоев металла в условиях, близких к идеальным и отсутствию необходимости кристаллографического соответствия между кристаллизуемым материалом и материалом подложки.

В разделе 3.2 приводятся экспериментальные результаты исследования характеристик импульсов лазерного излучения, а также термодинамических параметров при кристаллизации различных металлов в низкотемпературной лазерной плазме.

Эксперименты по кристаллизации меди показывают, что при увеличении частоты следования импульсов наблюдается следующий эффект. При воздействии на материал подложки импульсом лазерного излучения, часть энергии запасается во внутренних степенях свободы материала подложки. Это приводит к снижению порога инициации кристаллизации металла. Следовательно, энергия, запасенная в материале подложки, высвобождается при дальнейшем воздействии на нее импульсами лазерного излучения.

Экспериментально обнаружено, что на кристаллизацию меди идет величина порядка 10% от падающей энергии. 90% запасается в подложке.

Чтобы предотвратить разрушение подложки необходимо постепенное снижение энергии лазерного импульса или уменьшение частоты воздействий.

На рисунке 2 представлена зависимость энергии, необходимой для инициации процесса кристаллизации от частоты следования импульсов.

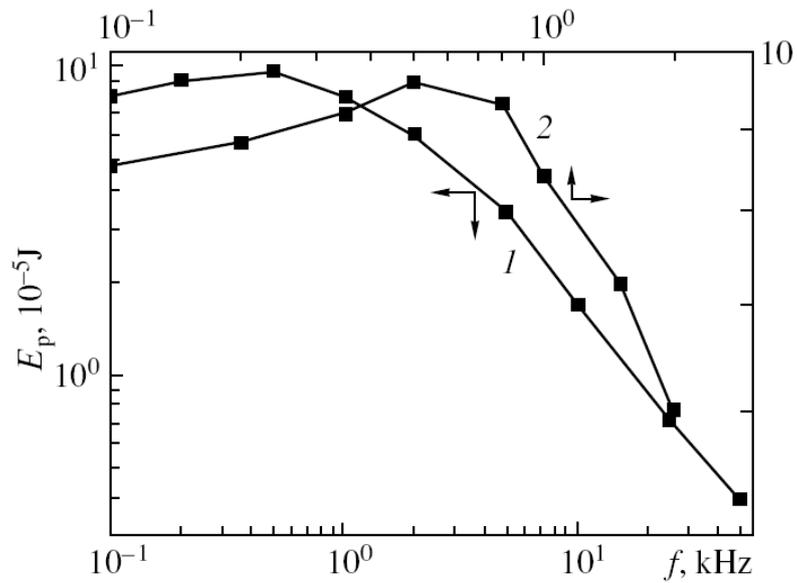


Рис. 2. Зависимость энергии лазерного импульса от частоты следования импульсов (1) и та же самая зависимость при низкой частоте следования импульсов (2).

В разделе 3.3 приведены экспериментальные образцы, полученные методом высокоскоростной кристаллизации в лазерной плазме. На рисунках приведены изображения, полученные методом атомно-силовой микроскопии. На рисунке 3 приведен элемент кристаллита, размерами 7X7 мкм.

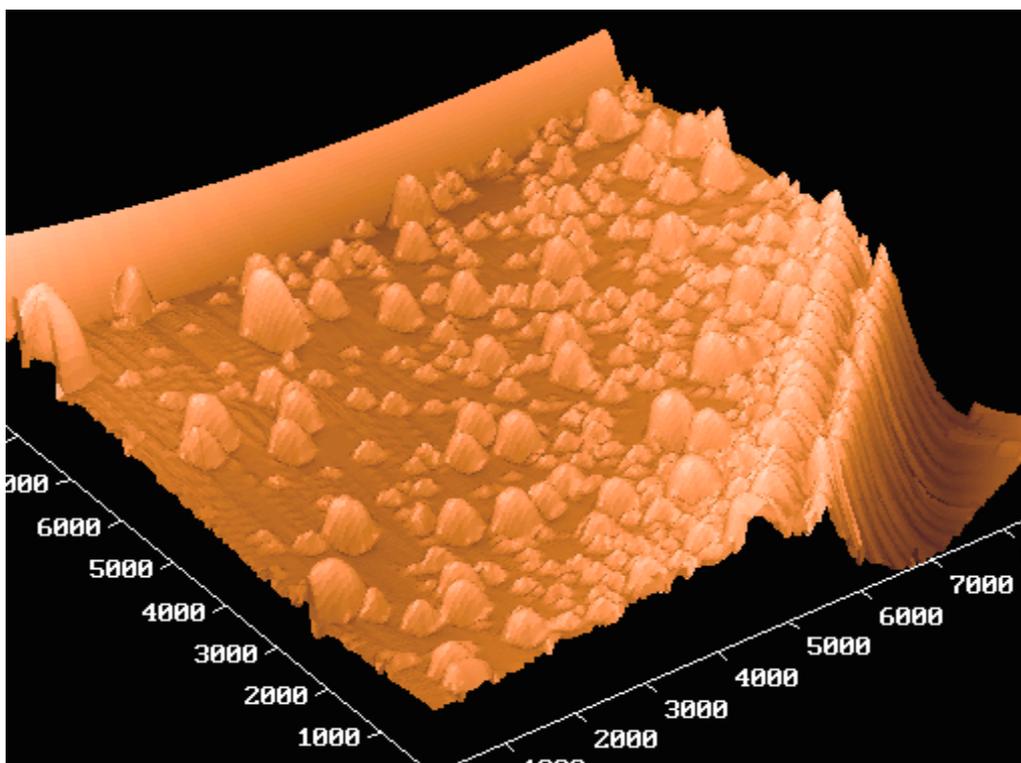


Рис. 3. Изображение стрийных структур на поверхности кристаллита.

На поверхности кристаллитов наблюдаются структуры, высота которых достигает 100 мкм.

На рис. 4. Приведена гистограмма распределения структур, полученных на поверхности кристаллита по размерам.



Рис. 4. Распределение структур на поверхности кристаллита меди.

Гистограмма показывает, что более половины частиц на поверхности кристаллита имеют размеры в диапазоне 50 – 200 нм.

Наличие подобных структур на поверхности кристаллитов может служить косвенным доказательством того, что образец меди, выращенный методом высокоскоростной кристаллизации, обладает высокой степенью кристаллографического совершенства.

При наблюдении исследований образцов на энергодисперсионном спектрометре, электронный микроскоп JSM-6480LV фирмы JEOL был получен элементный состав кристаллитов на поверхности подложки (табл. 1).

Табл. 1.

Весовой и атомарный процент содержания меди в материале подложки.

Элемент	Весовой %	Атомный%
Cl K	19.05	29.67
Cu K	80.95	70.33
Итоги	100.00	100.00

Глава 4. Физические параметры высокоскоростной кристаллизации меди в лазерной плазме

В данной главе изложено исследование условий протекания процесса кристаллизации меди в зоне действия плазмы, образованной в результате воздействия импульсом лазерного пучка. Также приведен расчет ряда параметров, необходимых для поддержания процесса кристаллизации. Вначале описаны температурные и энергетические зависимости параметров, приведена температура плазмы. Далее основное внимание уделено ряду кинетических параметров.

В разделе 4.1 рассматривается влияние лазерной плазмы на ход кристаллизации. Лазерную плазму можно отнести к разряду низкотемпературных. Она возникает в результате воздействия на подложку коротким импульсом лазерного излучения. При этом, зная физические параметры подложки, можно рассчитать оценочное значение температуры, достигаемой у поверхности образца.

Для расчета температуры плазмы у поверхности воспользуемся формулой:

$$T = \frac{E}{VC_V};$$

где E – энергия, выделяемая в объеме V , C_V – объемная теплоемкость мишени.

Если взять площадь сфокусированного пятна $S = \pi R^2$, где R – радиус лазерного пятна, то объем цилиндра взаимодействующего с лазерным пучком будет $V = \pi R^2 \cdot d$, где d – толщина цилиндра. Теплоемкость для большинства вязких жидкостей ~ 4 кДж/моль \cdot °С. Учитывая, что $R \approx 10$ мкм, $d = 10$ мкм и пороговое значение энергии $E_0 \approx 10$ мкДж, получаем:

$$T = \frac{E_0}{\pi R^2 d C_V} \approx 3300^\circ \text{C}$$

Данное значение хорошо согласуется с экспериментально измеренной температурой, которая составляет $\sim 3200 - 3500^\circ \text{C}$.

В данной работе произведен расчет энергии лазерного импульса, которая идет на кристаллизацию. Данная задача является аналогичной задаче об ускорении плоской трехслойной структуры пучком ионов в инерциальном термоядерном синтезе [15]. Результат расчета указывает, что на кристаллизацию идет лишь порядка 10% падающего лазерного излучения. Остальная энергия запасается во внутренних степенях свободы материала подложки. При увеличении частоты следования импульсов лазерного излучения наблюдается снижение энергетического порога необходимого для инициации процесса кристаллизации.

Далее, в **разделе 4.2** производится расчет ряда кинетических параметров кристаллизации.

Для процесса высокоскоростной кристаллизации меди в лазерной плазме можно выделить несколько таких параметров: теплоотвод, зародышеобразование и конвекция.

Процесс протекания взрывной кристаллизации сложен. На него влияют не только описанные выше факторы. Из-за этого точный расчет любого из параметров кристаллизации необычайно сложен. Поэтому обычно ограничиваются каким-либо одним из них и относительно него рассчитывают все остальные параметры кристаллизации.

Чтобы не учитывать влияние теплоотвода на рост кристалла производится подбор такого теплового режима роста, чтобы подложкой растущему кристаллу служила поверхность расплава. Это условие выполнимо, если теплоотвод будет происходить через поверхность

расплава. Это позволит отводу скрытой теплоты кристаллизации в окружающую среду.

Можно оценить количество теплоты, которое выделяется при кристаллизации, т.е. теплоту кристаллизации.

Для расчета воспользуемся формулой:

$$Q_{\text{кр}} = \lambda_{\text{кр}} \rho h,$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ – удельная теплота кристаллизации; ρ – плотность кристаллизуемого материала; h – объемный слой кристалла, кристаллизующийся в единицу времени.

Для оценки количества теплоты, выделяемого при кристаллизации, были взяты табличные параметры для объемного образца меди при температуре плавления. В качестве значения h с некоторыми допущениями можно использовать значение, рассчитанное для скорости фронта кристаллизации. В случае с высокоскоростной кристаллизацией меди, данное значение составляет ~ 80 м/с.

При таких условиях, количество теплоты составляет $1,29 \cdot 10^{11}$ Вт/м². Выделяемая в результате кристаллизации теплота более чем на порядок меньше, чем плотность энергии в лазерном пучке (для $\nu = 3000$ Гц, $Q = 1,67 \cdot 10^{12}$ Вт/м²). Таким образом, теплота кристаллизации не вносит существенного вклада в описываемый в данной работе механизм кристаллизации.

На скорость роста кристалла и его качество также влияют конвективные потоки, которые всегда существуют в расплаве кристаллизуемого материала из-за присутствия гравитационного поля. Однако для установления режима ламинарной конвекции требуется определенное время. Это время зависит от значения микроускорений, действующих в данном поле [16].

Чтобы оценить время установления ламинарной конвекции воспользуемся формулой:

$$\tau = 10 \cdot \frac{x^2}{aR_a^{2/5}},$$

где x – характерный размер, a – коэффициент температуропроводности, R_a – критерий Рэлея.

Рассчитанные оценочные значения времени установления ламинарной конвекции для расплава меди составили значение порядка 30 секунд. Кристаллизация протекает за время порядка 100 нс, что значительно меньше данной величины. Отсюда следует, что в случае с высокоскоростной кристаллизацией металла, конвективное перемешивание не успевает произвести значительный вклад в процесс кристаллизации. Такое явление было впервые замечено в экспериментах по кристаллизации материалов в условиях невесомости, где было замечено опережение дислокаций фронтом роста кристалла [17].

Заключение

В заключении сформулированы основные результаты исследований и расчетов, выполненных в данной работе.

- Обнаружено и исследовано явление высокоскоростной нанокристаллизации металлов в низкотемпературной плазме – высокоскоростной кристаллизации при воздействии импульса лазерного излучения длительностью 10-100 нс на поверхность аморфной подложки, в результате чего происходит рост монокристаллического металла размерами до 30-50 мкм со скоростями порядка 100 м/с. На поверхности этих кристаллов образуются наноструктурированные металлические структуры размерами от нескольких нанометров до десятков нанометров.

- Исследован механизм протекания высокоскоростной нанокристаллизации металлов и разработана модель данного процесса.
- Обнаружено, что кристаллизация металла протекает на поверхности расплава, образованного в результате импульсного лазерного воздействия, т.е. кристаллизация протекает по жидкой подложке. Это приводит к отсутствию необходимости кристаллографического соответствия между кристаллизуемым материалом и материалом подложки.
- Разработана методика выращивания композитных наногетероструктур металлов.

Приложения

В приложения данной работы были вынесены некоторые практические применения и экспериментальные исследования получаемых наноразмерных структур.

В **приложении 1** описаны основные результаты по получению нового типа источников энергии на основе фотовольтаических преобразователей электромагнитного излучения, пригодных для получения электроэнергии за счет преобразования не только видимого, но ультрафиолетового и инфракрасного излучения на поверхностях большой площади, в том числе и гибких.

В **приложении 2** описано применение механизма высокоскоростной кристаллизации для получения изображений из кристаллитов меди на поверхности ценных бумаг.

Приложение 3 посвящено исследованию спектров люминесценции образцов, легированных редкоземельными элементами, а также разработке алгоритма определения подлинности ценных бумаг. На рис. 5 приведены спектры люминесценции различных серий образцов бумажных банкнот, с внедренными в их структуру кристаллитов меди, легированных европием.

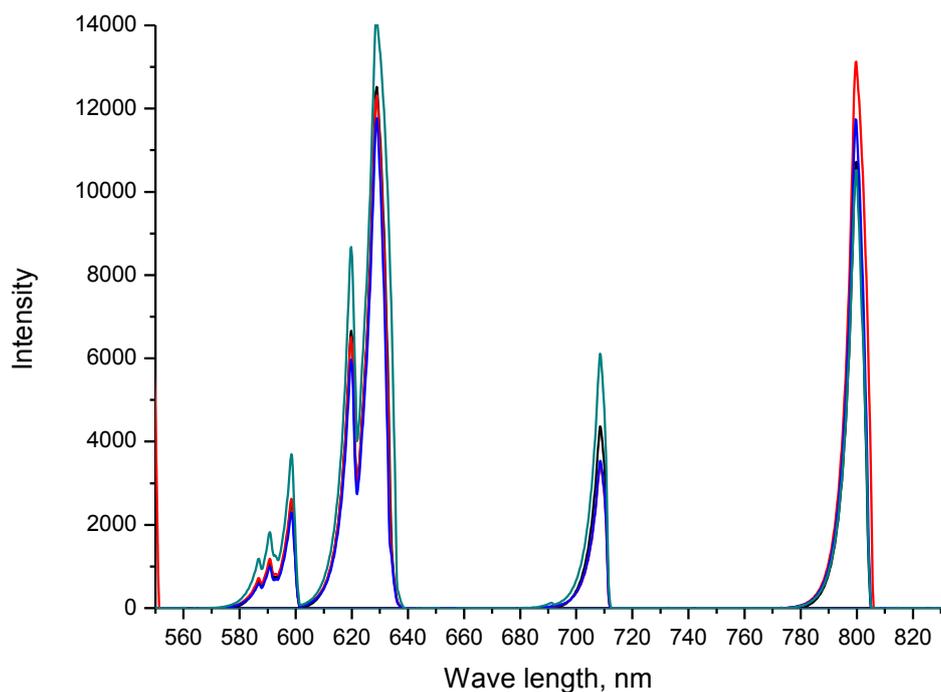


Рис. 5. Сравнение спектров люминесценции образцов при ультрафиолетовом возбуждении (длина волны 288 нм).

По данным графикам видна хорошая корреляция между линиями, соответствующими образцам, полученным в разных сериях экспериментов.

В **приложении 4** приведена часть отчета о НИОКР по теме «Разработка технологий защиты ценных бумаг (банкнот денежных знаков) специальными методами печати на основе нанотехнологий».

В **приложении 5** имеется акт испытания полученных образцов на модифицированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, который позволяет проводить анализ малоуглового рентгеновского рассеяния на двух длинах волн параллельно. Результаты показывают, что в спектре имеется совпадение 7 узких дифракционных пиков. Это свидетельствует о наличии в образце кристаллической фазы с высоким кристаллическим совершенством. В одном из случаев результатом процесса

высокоскоростной кристаллизации в низкотемпературной лазерной плазме являются образцы кристаллического гидросиликата меди.

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Богоносков К.А., Максимовский С.Н. Высокоскоростная нанокристаллизация меди в низкотемпературной лазерной плазме // ДАН, 2011, том 439, № 5, с. 605–608.
- A2. K.A. Bogonosov and S.N. Maximovsky. High-speed nanocrystallization in a laser plasma // Journal of Physics: Conference Series 345 (2012) 012020 (<http://iopscience.iop.org/1742-6596/345/1/012020>).
- A3. Богоносков К.А., Максимовский С.Н. Высокоскоростная кристаллизация меди на жидкой подложке // Краткие сообщения по физике, 2013, том 5, с. 18-22.
- A4. Богоносков К.А., Максимовский С.Н. Кристаллизация по жидкому слою // ДАН, 2013, том 449, № 5, с. 527-530.
- A5. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н., Ставцев А.Ю. Высокоскоростная нанокристаллизация в лазерной плазме // Наука и технологии в промышленности, 2011, №3, с. 111-114.
- A6. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н. Расчет энергии лазерного излучения при высокоскоростной нанокристаллизации в лазерной плазме // Тезисы III научно-практической конференции «Совершенствование качества и безопасности отечественных продуктов питания, как важный аспект в развитии АПК в период кризиса» / Можайск. 2010. с. 134-136.
- A7. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н. Технология высокоскоростного выращивания диэлектриков на аморфных подложках // Тезисы докладов XII Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики — 2011), РГПУ им. А.И.

- Герцена, 23.05.2011 – 26.05.2011 / С-Пб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011.
- A8. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н., Ставцев А.Ю. О перспективах высокоскоростной нанокристаллизации в лазерной плазме // Доклады VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании», в честь 50-летия полета Гагарина Ю.А., Абхазия, Пицунда, д.о. «Кудры», 20.09.2014 – 01.10.2010 / М: МГУПИ, 2011. с.149-157.
- A9. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н. // Материалы научно-практической конференции «Концепция инновационного развития автоматизированных систем управления и обработки информации на предприятиях агропромышленного комплекса» (VI-я Московская научно-практическая конференция «Студенческая наука»), МГУТУ, 30.11.2011 / Москва, 2011.
- A10. Богоносков К.А., Дмитриева В.Ф., Максимовский С.Н. Высокоскоростная кристаллизация меди в лазерной плазме // Сборник трудов II международной научно - практической конференции «Инженерные инновационные технологии автоматизации и управления в агропромышленном комплексе», Москва, 01.12.2010 / М.: МГУТУ, 2011, с. 242-244.
- A11. Богоносков К.А. Высокоскоростная нанокристаллизация меди в лазерной плазме, тезисы доклада // Материалы IV студенческой научно-практической конференции «Молодежь, наука, стратегия 2020», Москва, 04.04.2011 / М.: МГУТУ, 2012.
- A12. Богоносков К.А., Ставцев А.Ю., Сидоров П.П., Алборова М.С. Получение наноструктурированного люминофора методом высокоскоростной нанокристаллизации в лазерной плазме на гибких органических подложках. // Сборник трудов VII Международной

научно-технической конференции “Информационные технологии в науке, технике и образовании”, Абхазия, Пицунда, 17.09.2012 – 28.09.2012 / М.: МГУПИ, 2013, с. 158-161.

Литература

1. Аскарьян Г.А. Эффект самофокусировки. // Успехи физических наук. Октябрь 1973. Том 111, выпуск 2. С. 249-260.
2. Аскарьян Г.А., Студенов В.Б., Чистый И.Л. Тепловая самофокусировка в луче с уменьшенной интенсивностью вблизи оси (“банановая” самофокусировка). С. 519-520.
3. Аскарьян Г.А. Юркин А.В. Новое в светоакустике. // Успехи физических наук. Апрель 1989. Том 157, выпуск 4. С. 667-681.
4. Эшкин А. Давление лазерного излучения. // Успехи физических наук. Май 1973. Том 110, выпуск 1. С. 101-116.
5. Александров Л.Н. Кинетика кристаллизации и перекристаллизации полупроводниковых пленок. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
6. Leamy H.J., Brown W.L., Celler G.K. et. al. Explosive crystallization of amorphous germanium // Appl. Phys. Lett. 1981. Vol. 38. P. 137-139.
7. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга, Т.1-2., М.: Советское радио, 1977. 1432 с.
8. Панфилов Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности. №3, 2007. С. 76-80.
9. A. Manshina, A. Povolotskiy, T. Ivanova, A. Kurochkin, Yu.Tver'yanovich, D. Kim, M. Kim, and S.C. Kwon //Laser-Induced Copper Deposition on the Surface of an Oxide Glass from an Electrolyte

Solution// *Glass Physics and Chemistry*, Vol.33, No.3, pp. 209–213 (2007)

10. Кузьменко В.М., Мельников В.И. «Лавинная» кристаллизация аморфных металлов // *ЖЭТФ*. 1982. Т. 82, вып. 3. С. 802-808.

11. Скрипов В.П., Коверда В.П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.: Наука, 1984. 230 с.

12. Максимовский С.Н. Радуцкий Г.А. Метод для получения металлизированных изображений в листовом материале и устройство для его выполнения. Патент РФ 22267408 (PCT/RU 2004/102722).

13. Коверда В.П., Богданов Н.М., Скрипов В.П. Рост кристаллов. М.: Наука, 1989. Т. 17. С. 87–103.

14. *Nanoparticle Technology Handbook* / ed. by M. Hosokawa. Elsevier Science, 2007. 644 p.

15. Ю.В. Афанасьев, В.А. Исаков, О.Н. Крохин. Гидродинамическая модель плазменной короны, образующейся при воздействии на мишень пучков заряженных частиц // *ЖЭТФ*. 1981. Т. 81, С. 1714-1722.

16. Полежаев В.И., Белло М.С., Вerezуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991. 240 с.

17. Чернов А.А., Максимовский С.Н., Власенко Л.А. и др. // *ДАН*, 1983, Т.271, №1, С. 106–109.