



ИНСТИТУТ
ТЕПЛОФИЗИКИ
ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР

14 декабря, 2021, Новосибирск, Россия

**РОССИЙСКО-БЕЛОРУССКИЙ СЕМИНАР,
ПОСВЯЩЕННЫЙ ЛАЗЕРНОЙ
ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ
В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОФИЗИКИ**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**Российско-белорусский
семинар, посвященный
лазерной
функционализации
материалов в задачах
теплофизики**

14 декабря, 2021 г., Новосибирск, Россия

Организаторы:

- Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Белорусский государственный университет (Минск, Белоруссия)

Книга содержит тезисы докладов, представленных на российско-белорусском семинаре, посвященном лазерной функционализации материалов в задачах теплофизики (14 декабря, Новосибирск, Россия). Тезисы печатаются в авторской редакции методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

Организаторы:

- Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск, Россия)
- Белорусский государственный университет (Минск, Белоруссия)

Семинар проведен в рамках проекта «Селективная металл-индуцированная кристаллизация аморфного кремния, инициированная короткими и ультракороткими лазерными импульсами» (РФФИ 20-58-04021, рук. Старинский С. В. и БРФФИ № ф21рм-160, рук. Федотов А. С.).

Сопредседатели: к.ф.-м.н. Старинский С.В. и к.ф.-м.н. Федотов А.С.
Ученый секретарь: Миськив Н.Б.

ISBN 978-5-89017-075-0

© 2021, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЛАЗЕРНАЯ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Контролируемое изменение свойств смачиваемости медных поверхностей при наносекундной лазерной обработке

М.М. Васильев, С.В. Старинский, Ю.Г. Шухов 7

Динамика испарения капли при различном угле смачивания: аналитический подход

Р.С. Кириченко, А.С. Федотов 8

Модификация свойств поверхностей графеновыми слоями

П.Е. Маточкин, В.С. Морозов, Д.В. Смовж 9

Падение капель воды на супергидрофильные и супергидрофобные поверхности

С.В. Старинский, Е.М. Старинская, Н.Б. Миськив, А.И. Сафонов В.В.

Терехов 10

Испарение капель воды и наножидкости на микро/-нано структурированных поверхностях с контрастной смачиваемостью

Е.М. Старинская, Н.Б. Миськив, С.В. Старинский 11

Моделирование взаимодействия капли с модифицированными поверхностями

В.В. Терехов 12

СЕКЦИЯ 2. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК И МАССИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Алюминий-индуцированная кристаллизация тонких пленок аморфного нестехиометрического оксида кремния

А.О. Замчий, Е.А. Баранов, В.О. Константинов, И.Е. Меркулова, Н.А.

Лунев 14

Золото-индуцированная кристаллизация нестехиометрического оксида кремния при различных температурах и длительностях отжига

Н.А. Лунев, А.О. Замчий, Е.А. Баранов, В.О. Константинов, И.Е.

Меркулова 15

Численное исследование динамики разлета лазерного факела при наносекундном лазерном испарении в фоновый газ	
<i>А.А. Морозов, В.А. Тутарев</i>	16
Исследование влияния плазменной экранировки на эффективность наносекундной лазерной абляции кремния	
<i>А.А. Родионов, С.В. Старинский, Ю.Г. Шухов, А.В. Булгаков</i>	17
Моделирование термомеханического действия сверхкоротких лазерных импульсов на металлы: Лагранжев подход	
<i>О.Г. Романов, И.А. Тимощенко, С.А. Липский</i>	18
Лазерная кристаллизация аморфного кремния, индуцированная золотом	
<i>Ф.А. Самохвалов, А.А. Родионов, Е.А. Баранов, А.О. Замчий, С.В. Старинский</i>	19
Об опыте моделирования трехмерных задач лазерного плавления металлов	
<i>И.А. Тимощенко, Y. Levy, О.Г. Романов</i>	20
Оценка температурной динамики лазерного нагрева композитов «подложка/пленка аморфного кремния» и «подложка/наночастицы золота/пленка аморфного кремния»	
<i>А.С. Федотов, Я.Д. Титовец</i>	21
Моделирование лазерного плавления металлов с учётом конвекции расплава	
<i>С.Г. Шарина, И.А. Тимощенко, Y. Levy, О.Г. Романов</i>	22

СЕКЦИЯ 1
ЛАЗЕРНАЯ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ
ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ

Контролируемое изменение свойств смачиваемости медных поверхностей при наносекундной лазерной обработке

М.М. Васильев*^{1,2}, С.В. Старинский^{1,2}, Ю.Г. Шухов²
¹НГУ, Новосибирск, Россия; ²ИТ СО РАН, Новосибирск, Россия
*vasilevmik.arck@gmail.com

Аннотация

Свойства смачивания определяются химическим составом, а также микро- и наноструктурой, варьировать которые можно с помощью различных технологических подходов. Одним из методов позволяющим тонко контролировать оба этих аспекта является импульсная лазерная абляция, которая позволяет достигать как супергидрофильных, так и супергидрофобных состояний. Материалы с подобными экстремальными свойствами весьма перспективны для создания самоочищающихся и антикоррозионных поверхностей, биочипов и биосенсеров, теплообменников на основе явления конденсации и т.д.

Целью работы являлось экспериментальное исследование лазерной модификации меди для контролируемого изменения свойств смачиваемости. В ходе работы проведено лазерное микротекстурирование поверхности мишеней. Смачиваемость образцов оценивалась путем измерения статического контактного угла (КУ) методом сидячей капли. Показано, что после лазерной обработки медная поверхность становилась гидрофильной или супергидрофильной. В дальнейшем, при хранении образца в воздухе, КУ рос и выходил на постоянную величину по прошествии около месяца. Был проведен химический анализ поверхности методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии сразу после лазерной обработки и через неделю. Результаты показали рост процентного содержания углерода и кислорода на облученных лазером участках. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое изменение смачиваемости со временем связано с окислением и адсорбцией углерода и его соединений из окружающей среды.

Ключевые слова: лазерная абляция, микротекстурирование, свойства смачиваемости.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10119п).

Динамика испарения капли при различном угле смачивания: аналитический подход

Р.С. Кириченко, А.С. Федотов*

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

**e-mail: fedotov.alexandro@gmail.com*

Аннотация

Авторами было предложено рассмотреть скорость изменения массы капли при различном угле смачивания с учетом влияния гравитационных сил. В качестве рассматриваемых условий задачи были выбраны произвольный угол смачивания и два положения капли: сидячее и висячее. Для решения задачи была создана модель с использованием уравнения Янга-Лапласа, которая основывается на двух факторах: малый размер капли и изменение формы капли в зависимости от ее положения при том же угле смачивания. Первый фактор определяет основной механизм испарения капли и изменения ее массы, второй фактор учитывает влияние гравитации на изменение скорости испарения капли. Данная модель предсказывает более быстрое высыхание смачиваемой капли по сравнению с несмачиваемой в сидячем положении (и более быстрое высыхание несмачиваемой капли по сравнению со смачиваемой в висячем положении), что согласуется с экспериментальными данными. В работе была сделана попытка теоретического исследования скорости высыхания капли в зависимости от различных параметров, ключевой из которых была предложена зависимость площади поверхности капли от ее положения и угла смачивания. В работе описаны используемые экспериментальные данные, методы численного моделирования и теоретическое обоснование используемых зависимостей.

Ключевые слова: гидрофобность, смачивание, капля, угол смачивания

Модификация свойств поверхностей графеновыми слоями

П.Е. Маточкин, В.С. Морозов, Д.В. Смовж*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

**e-mail: dsmovzh@gmail.com*

Аннотация

Графен - уникальный материал, имеющий выдающиеся физико-химические свойства, благодаря чему он может применяться практически во всех сферах жизнедеятельности. Однако свойства графеновых покрытий получаемых на практике существенно отличаются от теоретических предсказаний. Моноатомная толщина графенового слоя делает его с одной стороны очень чувствительным к окружающему воздействию, с другой стороны, графеновый слой является достаточно прозрачным для потенциалов поверхности, на которой он расположен. Таким образом, получаемые графеновые покрытия представляют собой структуры подложка – графен, свойства которых зависят от материала, морфологии, структуры подложки и от способов нанесения. В работе исследовано влияние графеновых покрытий на свойства медной поверхности, после ее термической обработки. Графеновое покрытие выращивалось на медных фольгах и листах методом химического осаждения из газовой фазы. Исследовано влияние кристаллической ориентации меди, шероховатости, наличия графенового слоя на стационарный контактный угол для воды. Проведен анализ деградации поверхностей. Показано, что графеновый слой не существенно влияет на контактный угол, но сильно изменяет химические свойства поверхности.

Ключевые слова: теплообмен, графен, покрытия

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-29-19099\19.

Падение капель воды на супергидрофильные и супергидрофобные поверхности

С.В. Старинский*, Е.М. Старинская, Н.Б. Миськив, А.И. Сафонов, В.В. Терехов
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
**e-mail: starikhbz@mail.ru*

Аннотация

Современные технологии микро- и нанотекстурирования поверхностей широко применяются для управления смачиваемостью различных поверхностей, что перспективно для многих приложений. В данной работе была исследована динамика растекания капель воды, падающих на поверхности с супергидрофильными и супергидрофобными свойствами, для различных скоростей. Важной особенностью проделанных экспериментов является применение материалов с близкой шероховатостью как на микро-, так и на наноуровне. Процесс взаимодействия капель воды регистрировался с помощью высокоскоростной камеры, обеспечивающей съемку с частотой 10000 кадров в секунду. Проанализировано влияние числа Вебера на динамику отрыва капле от поверхности с супергидрофобными свойствами. Найдено, что в исследуемом диапазоне $We = 3-40$ длительность взаимодействия капле с поверхностью составляет ~ 14 мкс и не зависит от скорости контакта. Установлено, что на начальных этапах зависимость высоты капли от времени идентична на поверхностях с различным смачиванием. Таким образом, показано, что влияние смачиваемости на расход жидкости вдоль поверхности заметно задерживается в сравнении с временем контакта.

Ключевые слова: супергидрофобность, супергидрофильность, падение капель.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-52-53025 ГФЕН_а

Испарение капель воды и наножидкости на микро/-нано структурированных поверхностях с контрастной смачиваемостью

Е.М. Старинская*, Н.Б. Миськив, С.В. Старинский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

**e-mail: prefous-lm@yandex.ru*

Аннотация

В основе изучения процесса осаждения из капли коллоидного раствора лежит многообразие данных о динамическом поведении лежащей капли. Исследования в области испарения капель жидкостей ведутся не одно десятилетие и, тем не менее, в настоящее время весьма актуальны. Это связано с важной ролью, которую этот объект играет в технологических процессах, например, при распылении чернил в струйных принтерах, капельном охлаждении поверхностей, росте биологических кристаллов, в тепло-массообменных аппаратах и т.д. При этом авторам проекта не известны работы, в которых рассматривалось испарение капель коллоидных растворов на супербифильных поверхностях (с резким переходом от супергидрофобности к супергидрофильности), хотя сами такие поверхности весьма привлекательны для многих приложений и рассматриваются, например, в задачах конденсации пара. В рамках данной работы были изготовлены уникальные бифильные подложки, обладающие резким пространственным градиентом контактного угла смачивания. Проведены экспериментальные исследования процесса испарения капель жидкости, лежащих на структурированных поверхностях в зависимости от ориентации капли. Обнаружено, что подвешенные капли наножидкости имеют более высокую температуру и скорость испарения по сравнению с сидячими каплями такой же жидкости.

Ключевые слова: испарение, капли, наножидкости, тепло и массообмен, бифильные поверхности

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 21-52-53025 ГФЕН_а.

Моделирование взаимодействия капли с модифицированными поверхностями

В.В. Терехов

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

**e-mail: vt@itp.nsc.ru*

Аннотация

Прогнозирование динамики взаимодействия капли жидкости с поверхностями представляет большой интерес для практических приложений при создании систем спрейного охлаждения, струйной печати и многих других устройств. Изменение свойств поверхности как на микроуровне, так и с помощью макрошероховатостей, очевидно, существенным образом определяет динамику растекания капли при ударе о поверхность и, что представляет особую важность для приложений, может позволить контролировать прилипание или отражение капли от поверхности.

В настоящей работе представлена концепция моделирования изотермического удара капли о поверхность с заданными свойствами с помощью решеточных уравнений Больцмана. Приведен алгоритм решения этих уравнений в упрощенной двумерной постановке и для полной трехмерной задачи, использующий многовременную релаксационную модель. В рамках этой модели был использован подход на основе псевдопотенциал для описания межфазного взаимодействия. Такой подход позволяет проводить «сквозное» моделирование многофазного течения без необходимости постановки граничных условий на плоскостях раздела фаз. Использование псевдопотенциального подхода для описания взаимодействия с твердой поверхностью приводит к простым граничным условиям на ней, которые могут регулировать контактные углы смачивания в самых широких диапазонах, в том числе и на поверхностях с макрошероховатостью.

Представлены результаты моделирования в двумерной постановке взаимодействия падающей капли с супергидрофобной и супергидрофильной поверхностями. Показаны особенности результатов аналогичного трехмерного моделирования и проведено сравнение с экспериментальными данными при умеренных числах Вебера $We \sim 3$. Представлена динамика растекания капли по поверхности с периодической шероховатостью, имеющей характерные размеры сравнимые с диаметром капли.

Ключевые слова: модифицированная поверхность, капля жидкости, метод решеточных уравнений Больцмана

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-52-53025 ГФЕН_а

СЕКЦИЯ 2
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ
ЛАЗЕРНОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ
ОТЖИГЕ ПЛЕНОК

Алюминий-индуцированная кристаллизация тонких пленок аморфного нестехиометрического оксида кремния

А.О. Замчий*, Е.А. Баранов, В.О. Константинов, И.Е. Меркулова, Н.А. Лунев
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск, Россия
*e-mail: zamchiy@gmail.com

Аннотация

Одним из подходов для решения проблемы создания дешевых и эффективных кремниевых солнечных элементов является технология получения тонких пленок поликристаллического кремния (poly-Si) на дешевых подложках из стекла. В настоящее время, в качестве одного из перспективных подходов по получению пленок poly-Si на дешевых низкотемпературных подложках является метод алюминий-индуцированной кристаллизации (АИК) аморфного кремния (a-Si). В данной работе в качестве исходного кремнийсодержащего прекурсора в процессе АИК предложено использование пленок аморфного нестехиометрического оксида кремния ($a\text{-SiO}_x$). Поскольку требования к качеству вакуума при синтезе $a\text{-SiO}_x$ менее строгие, чем для a-Si, использование кислородсодержащего материала в процессе АИК может потенциально привести к снижению производственных затрат при получении солнечных элементов.

Было показано, что использование $a\text{-SiO}_x$ с различной стехиометрией ($x = 0.25$ и 1.8) в процессе АИК позволяет получить сплошные пленки poly-Si при температуре $550\text{ }^\circ\text{C}$. При этом, в случае низкого содержания кислорода в системе ($x = 0.25$), вспомогательный слой, образующийся в результате обмена слоями, состоит из смеси атомов Al, Si и O с включениями нанокристаллитов кремния. В случае высокого содержания кислорода в структуре ($x = 1.8$) происходит неоднородная трансформация вспомогательного слоя с образованием островков оксида алюминия субмикронного размера вблизи интерфейса «poly-Si/вспомогательный слой» в результате полного окисления Al.

Была исследована кинетика процесса АИК $a\text{-SiO}_{0.25}$ в диапазоне температур отжига $370 - 400\text{ }^\circ\text{C}$. Показано, что с ростом температуры отжига увеличивается плотность зародышеобразования кристаллической фазы кремния от 3 до 53 мм^{-2} , что значительно меньше, чем для процесса АИК a-Si. Получено значение энергии активации процесса, которое составило $3.7 \pm 0.4\text{ эВ}$.

Ключевые слова: поликристаллический кремний, алюминий-индуцированная кристаллизация, аморфный нестехиометрический оксид кремния

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10143).

Золото-индуцированная кристаллизация нестехиометрического оксида кремния при различных температурах и длительностях отжига

Н.А. Лунев*, А.О. Замчий, Е.А. Баранов, В.О. Константинов, И.Е. Меркулова
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск, Россия
**e-mail: nanochirik9@gmail.com*

Аннотация

Получение тонких пленок поликристаллического кремния (poly-Si) высокого качества на стекле является перспективной задачей в области создания фотовольтаических элементов и дисплеев. Одним из удобных решений является металл-индуцированная кристаллизация (МИК) аморфного нестехиометрического оксида кремния ($a\text{-SiO}_x$, $0 < x < 2$) на стеклянной подложке. В работе были получены образцы в компоновке «подложка (c-Si/SiO₂)/Au (30 нм)/a-SiO_{0.2} (150 нм)». Отжиг происходил в печи в высоком ($\sim 10^{-5}$ Па) вакууме. Готовые образцы были поделены на две серии, различающиеся условиями процесса: отжиг в диапазоне от 320 °C до 500 °C в течение 8.5 часов и при 350 °C с длительностью процесса от 3 до 20 часов. Структурные характеристики отожженного материала были изучены методами оптической микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, дифракции отраженных электронов, а фазовый и элементный состав - с помощью рентгенофазового анализа, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Методики показали, что кристаллизация происходит при отжиге свыше 320 °C в течение 8.5 часов в результате реализации механизма обмена слоями и образования метастабильных силицидов. При этом средний размер формирующихся кристаллитов кремния составил от 10 до 20 мкм.

Ключевые слова: поликристаллический кремний, металл-индуцированная кристаллизация, обмен слоями

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10143).

Численное исследование динамики разлета лазерного факела при наносекундном лазерном испарении в фоновый газ

А.А. Морозов^{1,*}, В.А. Титарев²

¹*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*ФИЦ "Информатика и управление" РАН, Москва, Россия*

**e-mail: morozov@itp.nsc.ru*

Аннотация

Проведено численное исследование динамики разлета лазерного факела при наносекундном лазерном испарении в фоновый газ на основе прямого статистического моделирования методом Монте-Карло и решения кинетического уравнения с модельным интегралом столкновения БГК. Проведены расчеты в осесимметричной геометрии для расстояния от поверхности испарения до подложки 2 см и длительности испарения 10 нс. Расчеты проводились для следующих параметров: давление фонового газа 50 Па, масса испаренных и фоновых частиц 40 а.е.м., температура поверхности 5000 К, радиус пятна испарения 0.5 мм, общее число испаренных частиц 10^{15} . Для исследования влияния различных параметров менялся только один из параметров при сохранении остальных параметров.

Получено хорошее согласие результатов расчетов для метода Монте-Карло и кинетического уравнения. Проведен анализ формирующегося слоя смешения испаренных и фоновых частиц. Обнаружено образование вихря около поверхности осаждения. Показано, что с увеличением давления фонового газа с 0.1 Па до 100 Па доля частиц, долетевших до подложки, уменьшается с 65% до нуля. При этом их средняя энергия уменьшается от 1 эВ до 0.1 эВ, а среднее число столкновений с молекулами фонового газа за время пролета до подложки растет с 0.01 до 200. Обнаружено, что с увеличением массы испаренных частиц с 12 до 200 а.е.м. доля долетевших до подложки частиц увеличивается с 0.1% до 30%. При этом энергия подлетающих к подложке частиц соответственно увеличивается с 0.05 эВ до 0.5 эВ, а число столкновений с фоновыми частицами уменьшается с 200 до 40. Показано, что изменение размера пятна испарения в диапазоне от 0.1 до 0.6 мм слабо влияет как на число долетевших до подложки частиц, так и на их среднюю энергию. Увеличение температуры поверхности с 5000 К до 80000 К приводит только к некоторому "уширению" факела, при этом общее число долетевших до подложки частиц не меняется, а средняя энергия меняется в диапазоне от 0.1 эВ до 0.4 эВ.

Ключевые слова: газодинамика, прямое статистическое моделирование, кинетическое уравнение, импульсная лазерная абляция, параллельные вычисления

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-01014.

Исследование влияния плазменной экранировки на эффективность наносекундной лазерной абляции кремния

А.А. Родионов, С.В. Старинский*, Ю.Г. Шухов, А.В. Булгаков
Институт теплофизики имени Кутателадзе, СО РАН, Новосибирск, Россия
**e-mail: starikhbz@mail.ru*

Аннотация

Кремний и наноструктуры на его основе представляют интерес для фотовольтаики, опто- и наноэлектронных устройств. Одним из перспективных методов обработки кремния и синтеза его наноструктур является наносекундная импульсная лазерная абляция (ИЛА). Развитие технологии наносекундного лазерного сверления и текстурирования кремния, напыления тонких пленок кремния методом ИЛА предполагает полное понимание ряда аспектов: плазменная экранировка и характер взаимодействия фонового окружения с продуктами абляции. Однако, несмотря на длительное исследование ИЛА, эти области недостаточно освещены в литературе.

В настоящей работе исследования плазменной экранировки проводились на примере поглощения зондирующего излучения в узком канале, образованном в результате наносекундного лазерного сверления кремния. Установлено снижение эффективности абляции кремния при повышении давления фонового газа, что объясняется ростом плотности продуктов абляции, и как следствие, ростом их экранирующей способности. Установлено, что влияние экранировки при генерации плазмы излучением с длиной волны $\lambda = 1064$ проявляется при плотностях энергии свыше 2 Дж/см^2 . Обнаружена немонотонная зависимость эффективности сверления кремния от плотности энергии лазерного излучения и предложена гипотеза для ее объяснения.

Ключевые слова: лазерное сверление, лазерная абляция, плазменная экранировка

Благодарности

Работа выполнена при поддержке государственного задания ИТ СО РАН, номер гос. регистрации 121031800214-7.

Моделирование термомеханического действия сверхкоротких лазерных импульсов на металлы: Лагранжев подход

О.Г. Романов*, И.А. Тимошенко, С.А. Липский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

**e-mail: romanov@bsu.by*

Аннотация

Разработана трехмерная модель термомеханического воздействия импульсного лазерного излучения на различные металлы. В основу положены уравнения двухтемпературной модели для электронного газа и ионной решетки [1], уравнения движения сплошных сред в форме Лагранжа и уравнение состояния Ми-Грюнайзена [2]. На основе данной модели разработана программа в Visual Studio на языке C++ для моделирования акустических эффектов в металлах при возбуждении пико- и фемтосекундными лазерными импульсами. Результаты численного моделирования представляются графически в виде полей температуры и давления. Проведенные вычислительные эксперименты позволили исследовать пространственную структуру возбуждаемых в приповерхностном слое волн сжатия-разрежения. Показано, что в случае воздействия гауссового пучка возбуждается биполярная волна, а в случае воздействия кольцеобразного пучка (оптического вортекса) – волна, состоящая из двух цугов сжатия-разрежения. Сравнительный анализ действия лазерных импульсов с одинаковыми пространственно-временными характеристиками на материалы с различными теплофизическими и акустическими параметрами показал существенную зависимость структуры и характеристик возбуждаемых акустических импульсов от параметров металла. В частности, показано, что в никеле по сравнению с золотом, структура волн сжатия-разрежения характеризуется более выраженными (локализованными) фронтами. Это является следствием более быстрой передачи энергии электронного возбуждения в ионную подсистему, меньшей теплопроводности и большей скорости распространения звука.

Ключевые слова: двухтемпературная модель, уравнения движения сплошных сред, сверхкороткие лазерные импульсы, численное моделирование

Литература

- [1] Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.:Наука, 1970.
- [2] Romanov O.G., Romanov G.S. Thermomechanical effect of ultrashort laser pulses on single-dimension metallic nanostructures. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2014. V.78, № 12. P.1299-1302.

Лазерная кристаллизация аморфного кремния индуцированная золотом

Ф.А. Самохвалов, А.А. Родионов, Е.А. Баранов, А.О. Замчий, С.В. Старинский*
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
**e-mail: starikhbz@mail.ru*

Аннотация

В настоящее время тонкопленочные поликристаллические полупроводники являются ключевыми материалами для многих современных технологий в таких областях, как микро- и нанoeлектроника, оптоэлектроника, фотовольтаика. Перспективным подходом для эффективного получения тонкопленочных устройств на основе кристаллических полупроводников является использование дешевых низкотемпературных подложек из несобственного материала (стекло, пластик и т.д.). К настоящему времени наиболее перспективным, широко исследуемым способом получения тонких пленок поликремния на нетугоплавких подложках из несобственного материала, в частности, на стекле является метод металл-индуцированной кристаллизации (МИК). В этом случае металл служит катализатором формирования кристаллической фазы при термическом отжиге. Метод импульсного лазерного отжига (ИЛО), позволяет осуществлять локальную модификацию пленки без воздействия на подложку, что также позволяет использовать низкотемпературные подложки. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования кристаллизации аморфного кремния с использованием сочетания ИЛО и МИК в широком диапазоне условий лазерного облучения с длинами волн видимого и ИК диапазонов и наносекундной длительностью импульса.

Ключевые слова: лазерная кристаллизация, металл-индуцированная кристаллизация, аморфный кремний.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-58-04021 Бел_мол_a

Об опыте моделирования трехмерных задач лазерного плавления металлов

И.А. Тимошенко^{1*}, Y. Levy², О.Г. Романов¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²HiLASE Centre, Institute of Physics, Dolni Brezany, Czech Republic

*e-mail: timoshchenkoia@bsu.by

Аннотация

Рассмотрены подходы к решению трехмерной задачи Стефана о лазерно-индуцированном плавлении металлов. В качестве базовой численной схемы решения уравнения теплопроводности использована трехслойная явная схема. Разработано программное обеспечение (рис. 1) для моделирования лазерного плавления металлов. Возможности программы: произвольный выбор материала путем задания его оптических и теплофизических констант; учет изменения свойств материала при фазовом переходе; непрерывный или импульсный режим работы лазера; неподвижный или движущийся источник; расчет поля температур в процессе нагревания и остывания после выключения источника.

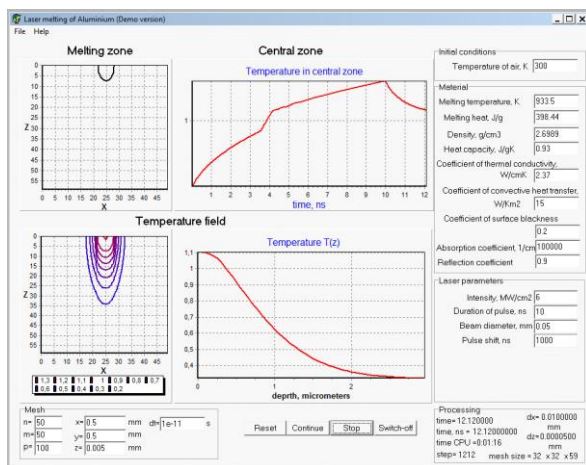


Рис. 1. Рабочее окно программы «Laser melting».

Ключевые слова: лазерное плавление металлов, задача Стефана, численное моделирование

Благодарности

Работа частично поддержана в рамках проекта ATLANTIC. Проект финансируется программой Европейского союза Horizon 2020 в рамках гранта Marie Skłodowska-Curie No 823897.

Оценка температурной динамики лазерного нагрева композитов «подложка/пленка аморфного кремния» и «подложка/наночастицы золота/пленка аморфного кремния»

А.С. Федотов, Я.Д. Титовец*

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

**email: fedotov.alexandro@gmail.com*

Аннотация

Авторами была рассмотрена конечно-элементная модель лазерного нагрева нанокompозитов в двух компоновках: «подложка/пленка аморфного кремния» и «подложка/наночастицы золота/пленка аморфного кремния». Предлагаемые нанокompозиты рассматриваются как перспективные материалы для селективной лазерной кристаллизации аморфного кремния. Толщина аморфного кремния составила 100 нм, толщина золотого слоя 10 нм, облучение проводилось импульсами длительностью 10 нс с флюенсом 10^{-2} Дж/см².

Исследовано временное и пространственное распределение температуры и теплового потока при лазерном нагреве композитов «подложка/пленка аморфного кремния» и «подложка/наночастицы золота/пленка аморфного кремния» наносекундными лазерными импульсами на основании разработанной однотемпературной модели. Показано, что влияние золотого слоя в композитах обуславливает более равномерное перераспределение тепла в слое аморфного кремния, что позволяет рассчитывать на повышение качества кристаллизованного кремния.

Ключевые слова: теплообмен, лазерный нагрев, нанокompозиты

Благодарности

Мы благодарим за финансовую поддержку Белорусский фонд фундаментальных исследований (БРФФИ), грант № Ф21РМ-160

Моделирование лазерного плавления металлов с учётом конвекции расплава

С.Г. Шарина¹, И.А. Тимошенко^{1*}, Y. Levy², О.Г. Романов¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²HiLASE Centre, Institute of Physics, Dolni Brezany, Czech Republic

*e-mail: timoshchenkoia@bsu.by

Аннотация

В работе строится базовая математическая модель формирования лазерно-индуцированных периодических структур на поверхности металлов, которая основывается на численном решении двумерной задачи плавления и последующего конвективного движения расплава. Объемный источник тепловыделения формируется вследствие поглощения энергии непрерывного или импульсного лазерного излучения в приповерхностном слое образца. Задача плавления сформулирована в обобщенной форме, а движение расплава описывается уравнениями Навье – Стокса в приближении Буссинеска. Разностные уравнения формулируются на основе метода конечных объемов с использованием смещенных сеток. Для решения систем алгебраических уравнений применяются локально одномерные схемы. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

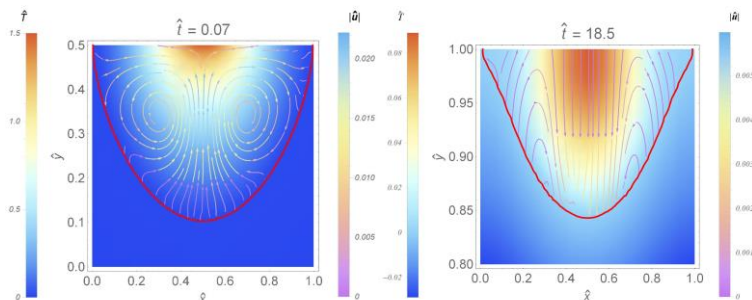


Рис. 1. Движение расплава железа и распределение температуры при нагреве непрерывным излучением (слева) и микросекундным гауссовым импульсом (справа). Красная линия указывает на фронт плавления.

Ключевые слова: конвекция, задача Стефана, приближение Буссинеска.

Благодарности

Работа частично поддержана в рамках проекта ATLANTIC. Проект финансируется программой Европейского союза Horizon 2020 в рамках гранта Marie Skłodowska-Curie No 823897.