

**Резюме докладов и выступлений на третьем
Международном научном семинаре «Математические
модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах»**

NANO-STRUCTURED WEAR RESISTANT
COATINGS MANUFACTURED FROM
NANOSTRUCTURED POWDER

*I. SMUROV, DIPI LABORATORY,
ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SAINT
ETIENNE (ENISE), FRANCE*

The objective to synthesise nano-structured coatings with advanced properties by means of injection of specially developed nano-structured powder into gas jet (HVOF, etc.) or laser beam is realised. Nanostructured powder devel-

oped by mechanical alloying are applied for fabrication of thick (200-500 μm) wear resistant coatings. The following deposition techniques are used: HVOF, D-gun, laser cladding with coaxial powder injection. Essential for the deposition process to be applied, would be the definition of an appropriate power source and deposition strategy, which would respect the nano-phased structure of powders being used. Optical diagnostics (12 wavelengths single spot pyrometer, 2D monochromatic pyrometer, CCD-camera based diagnostic tool) is applied for surface temperature and particles-in-flight

monitoring. AFM coatings examination confirmed their nanostructure. The performed wear tests shown the advanced performance: the dry friction coefficient may reach the value of 0.12. The results were obtained in the frames of «TRIBO» project (Growth type project G5RD-CT-2001-00465).

FUNCTIONAL GRADED COATINGS BY LASER CLADDING WITH COAXIAL INJECTION

*PH. BERTRAND, I. SMUROV, DIPI,
ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS
DE SAINT-ETIENNE, FRANCE*

The improved performance and safety of machinery performance (aerospace, automotive, etc.) can be realised by development of protective wear-resistant coatings with improved tribological properties. One can find a variety of challenging tribological situations in heavy industry and aerospace applications: e.g. dry friction, high contact loads (50 DaN, resulting pressure 10MPa), relatively low sliding speeds (1mm/s). The rather flexible and efficient method for elaboration of different coating types (Functionally Graded, multilayered, etc.) is Laser Cladding (LC).

The methods for coating deposition have to be flexible enough to satisfy the following requirements: 1) possibility to mix different components, producing coating with desired content «in situ» 2) possibility to create desired material distribution, internal structure of a coating (e.g. FGM, multilayered, engineered coatings). Laser cladding with coaxial powder injection was applied as a method satisfying the above-mentioned requirements.

The laser-assisted technology of wear-resistant coatings deposition is considered. A coating is created by coaxial injection of powders with variable composition into the zone of laser beam action. Functionally graded coatings with advanced tribological properties are produced, tribologically tested and investigated by means of microstructure observation, glow discharge spectrometry, XRD and AFM analysis.

It is shown that operational parameters of laser radiation can have a significant influence on coating's microstructure, thus defining tribological performance of given coating.

It is shown that radiation mode is one of the critical parameters defining the coating's microstructure (and thus, wear properties). Application of pulsed-periodic mode provides much better component remixing (e.g. in a case of coatings producing from MMC) in comparison with continuous wave mode. In the present study, the difference only in the coating microstructure (for the same composition) shows different friction coefficients — 0.45 and 0.25 for continuous wave and pulsed-periodic modems, correspondingly.

PYROMETRY MEASUREMENTS OF SURFACE TEMPERATURE EVOLUTION IN PULSED LASER ACTION OF MILLISECOND RANGE

*M. DOUBENSKAIA, I. SMUROV,
DIPI LABORATORY, ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE SAINT ETIENNE (ENISE),
FRANCE*

An originally developed multi-wavelength pyrometer (12 wavelengths in the range 1.001–1.573 μm , 50 μs acquisition time for each photodiode, 800 μm spatial resolution, 900–3500 °C brightness temperature range) is used to measure brightness temperature under the pulsed action of Nd:YAG laser (HAAS-HL62P) on stainless steel (INOX 304L) substrates. Specially developed «notch» filters (10–6 transparency at 1.06 μm wavelength) are applied to avoid the influence of laser radiation on temperature measurements. The true temperature is restored based on the method of multi-colour pyrometry. The accuracy of brightness temperature measurements is examined by comparing the temperature evolution for pulses with different duration but with the same value of energy density flux.

The influence of the following parameters is studied keeping the remaining ones constant: pulse duration (6–20 ms, rectangular pulse

shape), energy per pulse (10–33 J, rectangular pulse shape), pulse shape (3 types, triangular and rectangular). Finally the evolution of surface temperature for pulses with more complex shapes but with the same pulse duration and energy per pulse is compared.

3D FUNCTIONALLY GRADED MODELS MANUFACTURED BY LASER-ASSISTED TECHNOLOGIES

PH. BERTRAND, I. SMUROV,
IPI LABORATORY, ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE SAINT ETIENNE, FRANCE

Rapid manufacturing of 3D objects with Functionally Graded Material (FGM) structure is realized by coaxial powder injection with variable composition into the zone of laser beam action. The desired 3D material distribution is realized by repetitive deposition process. Theoretical analysis and experimental results show essential role of radiation mode and powder granularity as optimization parameters. Applied laser sources are continuous wave Nd:YAG (HAAS 2006D, 2kW), pulse-periodic Nd:YAG (HAAS HL304P, avg. power 300W), quazi-cw CO₂ (Rofin-Sinar, 300W). Among applied materials are nanostructured WC/Co, CuSn, Stainless steel 316L, 430L, Co-base alloy, nanostructured FeCu, etc. The originality of obtained results is that different gradient types are produced «in situ» and combined within one sample: smooth, sharp or multilayered gradients. The number of samples is produced and examined with metallographical and SEM analysis. The minimal spatial gradient resolution (transition zone between two different materials) is starting from 10 microns and can be varied in a wide range; the surface roughness depends from powder granularity, best value of Ra is about 5 μm, microhardness of different

zones of samples is varied from 120 to 450 HV. The achieved spatial resolution is 200μm.

Selective Laser Melting technique is applied using PHENIX-100 machine. The achieved spatial resolution is 100μm using stainless steel powder. Application of different process strategies is discussed as well as parametric analysis. The influence of the following process parameters is studied : thickness of deposited layer, laser power, velocity of scanning, direction of «vector» versus given geometry, etc.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА

А. Д. БАЛАШОВ, ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
ИМ. М. В. КЕЛДЫША РАН

Целью работы была разработка эффективных алгоритмов для расчета явлений филаментации, позволяющих произвести математическое моделирование процесса в различных лазерных системах.

Показан ступенчатый характер развития нелинейности, который определяется пороговым значением интенсивности, при котором ионизация воздуха становится существенной. При достижении пороговых значений интенсивности начинается потеря энергии на ионизацию и дефокусирующее воздействие электронной плазмы, что приводит к потере интенсивности. Когда интенсивность падает ниже порогового значения, вновь начинается самофокусировка.

При использовании начального Гауссова профиля с высокой, близкой к пороговой (или максимальной) интенсивностью и мощностью не намного превышающей P_{cr} , не наблюдается ступенчатый характер изменения интенсивности при распространении импульса.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКРАТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ УДАРНЫХ ВОЛН

*П. В. БРЕСЛАВСКИЙ, В. И. МАЖУКИН,
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН*

Рассматривается применения метода динамической адаптации к решению газодинамических задач с явным выделением ударных волн, волн разрежения и ударных волн в условиях их многократного взаимодействия. Эффективность метода оценивается на ряде известных тестовых задач.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №04-01-00701).

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МИКРОПЛАЗМА МНОГОКРАТНО ИОНИЗОВАННЫХ ГАЗОВ FEMTOSECOND LASER MICROPLASMA OF MULTIPLY IONIZED GASES

*С. В. ГАРНОВ, В. В. БУКИН, А. А. МАЛЮТИН,
В. И. КОНОВ, Н. С. ВОРОБЬЕВ, ИНСТИТУТ
ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А. М. ПРОХОРОВА РАН*

Изучение неравновесной плазмы высокой плотности, создаваемой в газах и конденсированных средах при их многократной ионизации острогофокусированными (в область с диаметром порядка нескольких микрон) ультракороткими лазерными импульсами является одним из важных направлений в физике взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом. Данная проблема актуальна как с точки зрения фундаментальной науки — получения новых экспериментальных данных о свойствах неравновесной, пространственно неоднородной плазмы высокой плотности и механизмах ее формирования, развития и взаимодействия с лазерным излучением пико- и фемтосекундной длительности, так и в свя-

зи с многочисленными прикладными задачами, в которых возбуждаемая лазерным излучением плазма играет принципиальную и, во многом, определяющую роль. В этой связи получение лазерной микроплазмы на относительно простых и компактных установках предоставляет уникальную возможность для ее исследования.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований динамики формирования и развития лазерной микроплазмы, возникающей в микрообъемах газов при многократной ионизации высокоинтенсивными ($I \sim 10^{17}$ Вт/см²), острогофокусированными лазерными импульсами длительностью ~ 100 фс (длина волны $\lambda = 800$ нм). Проведены прецизионные интерферометрические измерения (с пространственным разрешением ~ 1 мкм и временным разрешением ~ 100 фс) распределения коэффициента преломления и электронной плотности непосредственно *во время действия* возбуждающего излучения (на этапе формирования плазмы) и при ее последующем расширении.

Также в ходе работы были получены временные развертки спектра излучения плазмы. В течение первых 1–2 нс после инициации искры плазма в видимой области спектра не имеет ярко выраженных спектральных линий газа, а в течение последующих 10 нс соотношение интенсивностей спектральных линий имеет нестационарный характер, указывающий на отсутствие термодинамического равновесия.

Показано, что во время действия возбуждающего импульса происходит практически полная ионизация исходного газа.

Впервые в фемтосекундной лазерной плазме зарегистрирована генерация второй гармоники лазерного излучения и зафиксировано наличие областей с большим единицы показателем преломления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект №06-02-17014).

ПЛАЗМЕННАЯ МАГНИТНАЯ КОМПРЕССИЯ НА ОСНОВЕ БЫСТРЫХ Z-ПИНЧЕЙ

А. С. БОЛДАРЕВ, В. А. ГАСИЛОВ,
С. В. ДЬЯЧЕНКО, Е. И. КАРТАШЕВА,
О. Г. ОЛЬХОВСКАЯ, ИММ РАН, МОСКВА,
А. С. ЧУВАТИН, ECOLE POLYTECHNIQUE,
PALAISEAU, FRANCE

В первой части доклада представлен разработанный в ИММ РАН код MARPLE, предназначенный для вычислительных экспериментов с двумерными моделями радиационной магнитной гидродинамики. Для разработки данного кода применялись вычислительные методики на основе эйлеровых неструктурированных сеток, и технологии объектно-ориентированного программирования.

Во второй части доклада рассматриваются постановки задач, связанные с проблемой усиления мощности электрогенератора методом плазменной магнитной компрессии (ПМК). Исследования ориентированы на существующие генераторы (Spielman 1998: 2105), в которых достигается ток на уровне ~ 10 МА с характерным временем фронта формирования импульса 0.1-1 мксек, поскольку схема ПМК может быть на них протестирована. Теоретические оценки эффективности схемы ПМК сопоставляются с результатами расчетов на основе двумерных моделей радиационной МГД.

Лит.: R. В. Spielman, С. Deeney *et al.*, Phys. Plasmas, vol.5, 1998; В. А. Гасилов, А. С. Чуватин и др. Матем. моделирование, 2003, Т. 15, №9, с. 107.

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБОКОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО- ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА YAG:ND МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Г. Г. ГЛАДУШ, А. Ф. ГЛОВА, С. В. ДРОБЯЗКО,
ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ТРОИЦК, МОСКОВСКАЯ ОБЛ.

В работе проводится поиск условий, при которых удельные затраты на проплавление

металлов минимальны. Исходя из существующих теоретических представлений о механизме импульсно-периодической сварки исследования проводились в области небольших частот следования излучения Nd-лазера.

Показано, что при частотах $\sim 25-50$ Гц и скважности $\sim 200-300$ удельные затраты на проплавление нержавеющей стали и алюминия на 1-2 порядка меньше, чем при сварке непрерывными и импульсно-периодическими СО₂-лазерами.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРЕМНИЙ

Д. К. ИЛЬНИЦКИЙ, В. И. МАЖУКИН,
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН

Разработана математическая модель короткоимпульсного лазерного воздействия на кремний. Резонансное взаимодействие мощного лазерного излучения, имеющего вид коротких импульсов (пико- или фемтосекундного диапазона), с полупроводниковыми материалами приводит к целому каскаду процессов преобразования энергии, включающих в себя возбуждение и релаксацию электронной подсистемы, электрон-фононную релаксацию, фонон-фононную релаксацию и тепловые процессы (нагрев, плавление и испарение). Параметры электронно-дырочной плазмы, возникающей в полупроводнике при данном взаимодействии, могут достаточно сильно изменяться (плотность носителей $10^{12} < N < 10^{22}$ см⁻³, температура $100 < T < 10^5$ К), поэтому для моделирования данных процессов использовалась модель, основанная на кинетическом уравнении Больцмана с интегралом столкновений Батнагара-Гросса-Крука и равновесными функциями распределения Ферми. Если лазерно-индуцированный нагрев среды достаточно велик, то происходят плавление и испарение вещества, но многие полупроводники в расплавленном состоянии демонстрируют ме-

таллические свойства, поэтому для описания процессов, происходящих в расплаве, использовалась модель, разработанная специально для металлов. Вычислительные проблемы, связанные с наличием подвижных межфазных границ, разрешались с помощью метода динамической адаптации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №04-01-00701).

О ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СРЕДАХ

Р. Ш. ИСЛАМОВ, ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
ЛАЗЕРНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ РАН

Схемы второго порядка точности по пространственной координате позволяют воспроизвести картину самоорганизации двумерных токовых структур (включая процессы вторичной перестройки возникших структур) в тлеющем газовом разряде в рамках диффузионно-дрейфового приближения.

ANOMALIES IN ABSORPTION AND REFLECTION OF A HIGH-POWER ULTRASHORT LASER PULSE BY A PLASMA WITH A SOLID-STATE DENSITY

В. А. ИСАКОВ, А. П. КАНАВИН,
С. А. УРЮПИН, ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П. Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

Various opportunities of electron heating and radiation absorption within the framework of the normal skin effect are considered. Conditions under which it is necessary to take into account both the spatial structure of the field in the skin layer and heat removal from it are established. The calculations performed illustrate various opportunities of heating and cooling of electrons at quite certain values of the dimensionless time and parameter D . There are specific features in optical properties of a

dense plasma interacting with an ultrashort laser pulse caused by either short duration of the pulse, or fast heating of electrons.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛО- МАССОПЕРЕНОС И ПРОБЛЕМА ГЛУБОКОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С. В. КАЮКОВ, ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П. Н. ЛЕБЕДЕВА РАН,
САМАРСКИЙ ФИЛИАЛ

Исторически первые применения лазерного излучения были связаны с импульсным режимом генерации: пробивка отверстий на рубиновых лазерах. Однако, очень скоро было установлено, что режим свободной генерации (миллисекундный диапазон длительности) не пригоден для сварки с глубиной плавления более 1–2 мм. Поэтому в течение многих лет считалось общепризнанным, что импульсные твердотельные лазеры могут быть применены для сварки металлов только малой толщины.

Главная цель работы — решение принципиальной проблемы получения большой глубины продвижения фронта плавления под действием миллисекундных импульсов лазерного излучения с большой энергией без выброса расплава из зоны нагрева.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ НОГОКОМПОНЕНТНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

КОЛДОБА А. В., ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА,
КОЛДОБА Е. В., МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ МГУ, МОСКВА

Используются модели, которые недостаточно хорошо изучены для случая сжимаемых флюидов. Используются термодинамически

согласованные функции, но в силу сложности уравнения состояния (уравнение Пенга-Робинсона и др.) значения функций хранятся в табличном виде и при моделировании используются интерполированные значения.

NON-VACUUM LASER DEPOSITION OF THIN CARBON COATINGS

*T. V. KONONENKO, V. I. KONOV, NATURAL
SCIENCES CENTER A. M. PROKHOROV GENERAL
PHYSICS INSTITUTE MOSCOW, RUSSIA*

All necessary conditions for formation of hard amorphous carbon film can be created under pulsed laser deposition in standard air environment. Presence of dense gas environment essentially affects parameters of plasma plume and its interaction with substrate. Modeling of expansion of carbon plasma in dense air atmosphere could be very useful for understanding of revealed features of non-vacuum deposition process.

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОБЛЕМАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

*В. И. МАЖУКИН,
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН*

Рассматривается оригинальный метод численного решения дифференциальных уравнений в частных производных — метод динамической адаптации. В основу метода положена идея перехода к произвольной нестационарной системе координат, в которой неизвестными при численном решении являются сеточные функции и координаты узлов сетки. Тем самым в методе динамической адаптации проблемы поиска решения исходной задачи и построения расчетной сетки формулируются в виде единой дифференциальной модели, в которой часть уравнений описывает физические явления, а другая —

динамику узлов сетки. Переход к произвольной нестационарной системе координат осуществляется посредством автоматического преобразования координат, выполняемого с помощью искомого решения. Учитывая, что функции преобразования всегда зависят от искомого решения, получаемая расширенная система дифференциальных уравнений в расчетном пространстве оказывается сильно нелинейной, даже если ее исходная постановка осуществлялась в рамках линейной модели. Тесная взаимосвязь между двумя частями дифференциальной модели проявляется, в частности, в том, что динамика узлов сетки полностью определяется поведением решения уравнений, описывающих физические процессы. Определение оптимальной функции преобразования из принципа квазистационарности позволяет строить адаптирующиеся сетки без каких-либо подгоночных параметров. Число дифференциальных уравнений, описывающих поведение расчетной сетки, равняется числу пространственных переменных. Поскольку механизм управляемого распределения узлов сетки сформулирован на дифференциальном уровне, метод динамической адаптации не чувствителен к способу разностной аппроксимации. С одинаковым успехом для этой цели могут использоваться методы конечных разностей и конечных элементов.

Использование произвольной нестационарной системы координат обеспечивает методу универсальность. С единых позиций и с одинаковым успехом можно строить адаптивные сетки (с процедурами концентрации, генерации и уничтожения узлов) для нестационарных проблем математической физики с существенно различающимися математическими особенностями, среди которых: наличие сильных градиентов в известных проблемах нелинейной теплопроводности, Бюргерса, Бакли-Левретта; подвижные межфазные границы в проблеме Стефана, контактные и свободные границы в гидродинамике; распространение слабых разрывов в проблемах горения и сильных разрывов (ударные волны) в газовой динамике.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №04-01-00701).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ
В ВОЗДУХЕ ПОВЕРХНОСТЬЮ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ

*М. М. ДЕМИН, МОСКОВСКИЙ
ГУМАНИТАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ,
В. И. МАЖУКИН, ИНСТИТУТ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН*

Рассматривается задача лазерного испарения металлической мишени в среду с противодавлением с учетом образования плазмы в паре. Разработана математическая модель, описывающая последовательно сменяющиеся процессы испарения и конденсации, вызванные взаимодействием плазмы с поверхностью мишени. Предложен метод численной реализации, основывающийся на методе динамической адаптации. Выполнено моделирование процесса лазерного воздействия, в котором возобновление испарения сопровождается образованием в паре контактного разрыва — плазменно-конденсационного скачка. Проведено сравнение результатов для двух режимов воздействия с различной длительностью лазерного импульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект №04- 01-00701).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕРАВНОВЕСНОЙ
КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ
МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА
MATHEMATICAL MODEL OF NONEQUILIBRIUM
KINETIC OF ELECTRICAL BREAK-DOWN OF
MOLECULAR GAS

*О. Н. КОРОЛЕВА, МОСКОВСКИЙ
ГУМАНИТАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ,
В. И. МАЖУКИН, А. В. МАЖУКИН, ИНСТИТУТ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН,
МОСКУ, FRANÇOIS GENTILS, SCHNEIDER ELECTRIC*

*О. N. KOROLEVA, MOSCOW UNIVERSITY
FOR THE HUMANITIES,
V. I. MAZHUKIN,
A. V. MAZHUKIN, INSTITUTE FOR MATHEMATICAL
MODELING OF RUSSIAN ACADEMY
OF SCIENCES, MHUMU, FRANÇOIS GENTILS,
SCHNEIDER ELECTRIC*

Рассматривается кинетическая модель кинетики электрического пробоя молекулярного азота. В модели учитываются заселенности электронно-колебательных возбужденных состояний молекул и молекулярных ионов, заселенности электронно-возбужденных состояний атомов и атомарных ионов, каскадная ионизация и трехчастотная рекомбинация атомов и молекул. Учитываются также основные молекулярно-ионные реакции.

В модели полагается, что все температуры: электронная, колебательная и поступательная атомов и молекул сильно различаются между собой. Для их определения вводятся три уравнения баланса энергии, в которых учтены процессы энергообмена между электронами, колебательными степенями свободы и поступательной энергии молекул.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект №04- 01-00701).

Kinetic model of electrical break-down of molecular Nitrogen is considered. Model takes into account populations of the vibronics excited states of molecules and molecular ions, populations of the electron-excited atoms and atomic ions, cascade ionization and three-party recombination of atoms and molecules. Basic molecular-ionic reactions are taken into account as well.

The model also assumes that all temperatures: electron, oscillatory and translational of atoms and molecules are significantly different. Three equations of energy balance are introduced to determine these temperatures with account of energy exchange between electrons, oscillatory degrees of freedom and translational energy of molecules.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*О. Н. КОРОЛЕВА, МОСКОВСКИЙ
ГУМАНИТАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ,
В. И. МАЖУКИН, ИНСТИТУТ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН*

На примере лазерного переплава 3-х слойной мишени Al+Ni+Cr рассматривается применение метода динамической адаптации к решению многофронтной задачи Стефана с явным выделением фронтов плавления и испарения. С помощью динамической адаптации строятся квазиравномерные расчетные сетки в областях с подвижными границами, характерные размеры которых по ходу решения меняются на несколько порядков. Алгоритм построения сеток учитывает изменяющиеся размеры области и скорости перемещения границ, что обеспечивает автоматическое распределение узлов сетки без применения подгоночных параметров.

Математическое моделирование процесса легирования посредством расплава относительно толстой подложки и тонких легирующих пленок, показало, что в процессе важную роль играет последовательность нанесения покрытий. Расчеты показали, что если верхним облучаемым слоем оказывается хром, то в силу его теплофизических свойств он может к концу импульса полностью испариться или сублимировать. Ситуацию легко изменить, если легирующие слои расположить по схеме Al+Cr +Ni, согласно которой верхним облучаемым слоем окажется никель, испарение которого протекает менее эффективно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект №04-01-00701).

ПРЕДСКАЗАНИЕ РАЗВИТИЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЕЯ-ТЕЙЛОРА
С ПОМОЩЬЮ ОБУЧАЕМЫХ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*А. С. НУЖНЫЙ, ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П. Н. ЛЕБЕДЕВА РАН*

Найдено упрощенное сжатое описание процессов развития РТ-неустойчивости.

Построена программа-предиктор, предсказывающая примерный вид картины распределения плотности поздних состояний процессов по их начальному возмущению.

На основе вейвлет-обработки данных и последующего энтропийного анализа было показано доминирование ближнего порядка корреляции в процессах РТ-перемешивания.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОНТРАСТНЫХ СТРУКТУР
В АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
ПЛАЗМЕ

*В. Ю. ПОПОВ, МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА, ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ, КАФЕДРА МАТЕМАТИКИ*

В различных областях науки, в том числе в математической физике, физике плазмы, астрофизике, геофизике, биофизике и т. д. часто возникает необходимость исследования нелинейной эволюции физических полей различной природы.

В качестве физического поля могут рассматриваться, например, концентрация вещества, величина напряженности магнитного поля, плотность тока, концентрация заряженных частиц и т. д.

В процессе эволюции физических полей в нелинейном режиме часто возникают своеобразные конфигурации, называемые контрастными структурами (КС), в которых обширные участки медленного изменения поля разделяются малыми по объему областями быстрого изменения с большим градиентом поля — внутренними переходными слоями (ВПС).

Результаты наблюдений за различными природными объектами демонстрируют возможность существования нестационарных КС, которые могут, как постепенно приближаться к стационарным КС, так и исчезать, образуя плавные распределения поля.

ИОНИЗАЦИЯ И РЕКОМБИНАЦИЯ
В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ,
СОЗДАННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ
ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ
IONIZATION AND RECOMBINATION
IN EXPANDING PLASMA CREATED
BY FEMTOSECOND LASER PULSE

А. А. РУСАНОВ, А. Б. САВЕЛЬЕВ,
Д. С. УРЮПИНА, МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕНТР МГУ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА
RUSANOV A. A., SAVEL'EV A. B., URYUPINA D. S.

В работе проводится интерпретация данных спектральных время-пролетных измерений для плазмы Si и W, полученной лазерным импульсом с длительностью 200 фс и интенсивностью $4 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ Вт/см². В работе также дается объяснение экспериментальному наблюдению ионов с аномально высокой кратностью ионизации.

The report is devoted to interpretation of spectral time-of-flight measurements for a plasma of Si and W. The plasma is created by laser pulse with intensity $4 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ W/cm² and duration 200 fs. In the report it is given the explanation of experimental observations of ions with anomalous high charge.

MATHEMATICAL MODELLING
OF THE DYNAMICS AND RADIATION
OF LASER-INDUCED EROSION PLASMAS

К. Л. СТЕПАНОВ, HEAT AND MASS TRANSFER
INSTITUTE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF BELARUS, MINSK

Development of models for description of thermal-physic properties of substance in a wide range of conditions. Optical properties of plasma. Radiation transfer in high-temperature gases and plasmas. Development of a numerical code allowing 2D simulation of laser-induced plasmas at their different applications.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО
НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. Н. ТОКАРЕВ, Н. А. БУТВИНА, ЦЕНТР
ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ИНСТИТУТЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ИМ. А. М. ПРОХОРОВА РАН,
К. Э. ЛАПШИН, В. А. ЯМЩИКОВ, ЦЕНТР
ФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ИНСТИТУТА
ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А. М. ПРОХОРОВА РАН

В настоящее время большой практический интерес представляет разработка физических основ новых методов наноструктурирования поверхности ряда высокотехнологичных материалов, т. е. создания одномерных и двумерных рельефов с характерными периодами менее 100 нм. В данной работе предлагается использовать лазерно-индуцированную неустойчивость поверхности под воздействием наносекундного излучения в вакуумном ультрафиолете (ВУФ) F₂-лазера с рекордно короткой длиной волны 157 нм для прямого лазерного наноструктурирования поверхности. «Прямое» предполагает здесь, что такая модификация поверхностного профиля происходит наиболее просто —

одним лазерным лучом, а не двумя (сведенными для создания интерференционной картины), и без использования для записи структур в дополнение к лазерному лучу иглы атомно-силового или туннельного микроскопа, как это было в ряде первых работ по наноструктурированию. Рассматриваются два типа поверхностной неустойчивости — «резонансная» и «нерезонансная». Например, показано, что для «нерезонансного» типа неустойчивости можно ожидать развития поверхностных рельефов с нанопериодами для таких процессов как лазерно-индуцированное испарение и осаждение в отсутствие расплава, если использовать материалы, отличающиеся низкой температуропроводностью ($10^{-2} — 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$) и высоким коэффициентом поглощения (порядка 10^6 см^{-1}) на данной длине волны 157 нм. К таким материалам относятся графит, некоторые полимеры и керамики.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ КОНВЕКЦИИ С РЕАЛИСТИЧНОЙ ФИЗИКОЙ

*С. Д. УСТЮГОВ, ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ
МАТЕМАТИКИ ИМ. М. В. КЕЛДЫША РАН*

Трехмерное моделирование фотосферной солнечной конвекции проведено в рамках метода крупных вихрей с использованием реалистичной физики. Исследованы структура конвективных движений в поверхностных радиационных слоях и диапазон характерных масштабов конвективных

ячеек. Моделируется часть солнечной фотосферы и верхние слои конвективной зоны размером 24×24 Мм горизонтально и 18 Мм ниже видимой поверхности. Решаются уравнения сжимаемой радиационной гидродинамики с учетом динамической вязкости и гравитации. Моделирование проведено на однородной сетке 256×256 ячеек в горизонтальном направлении с периодическими граничными условиями и на неоднородной сетке 144 ячеек по вертикали с учетом равновесия сил на нижней и верхней границе при постоянной внутренней энергии.

COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR CALCULATION OF CONVECTIVE FLOWS IN PHASE TRANSFORMATION PROBLEM

*V. MAZHUKIN, INSTITUTE OF MATHEMATICAL
MODELLING, RAS, M. CHUIKO, INSTITUTE
OF MATHEMATICS, NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES OF BELARUS, MINSK,
A. LAPANIK, BELORUSSIAN STATE UNIVERSITY,
MINSK*

Mathematical modelling of phase transformation with explicit tracking of interfaces in 2D. Application: phase transition in laser technologies. Distinguishing features:

- domains of arbitrary shape,
- movable boundaries (interfaces).

Method (dynamic adaptation):

1. Transition to a curvilinear non-stationary coordinate system.
2. Numerical solving of the problem in rectangular domain.