

На правах рукописи
УДК 538.975: 535.21:548.4
548.4.001

БАНИШЕВ Александр Федорович

**ЛАЗЕРНО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ МИКРОСТРУКТУРНЫЕ
ПРОЦЕССЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

Специальность: 01.04.21-“Лазерная физика”

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

М о с к в а - 2004

Работа выполнена в Институте проблем лазерных
и информационных технологий Российской Академии наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Доктор физико-математических наук, профессор

ПЛОТНИКОВ

Геннадий Семёнович

Доктор физико-математических наук, профессор

МАЛЮТА

Дмитрий Дмитриевич

Доктор физико-математических наук, профессор

БУБЛИК

Владимир Тимофеевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Научный центр волновых исследований ИОФ РАН

Защита состоится “ 15 ” апреля 2004г. в 15-00 час
на заседании диссертационного совета Д501.001.31
в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова
по адресу: 119899, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, ул.Академика Хохлова,
д.1, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А.Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
физического факультета МГУ

Автореферат разослан “ 12 ” марта 2004 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета Д 501.001.31

к.ф.-м.н., доцент

Т.М.ИЛЬИНОВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Во многих современных технологиях обработки (модификации поверхности) материалов используется лазерное излучение (лазерное легирование, отжиг, термообработка, нанесение покрытий и т.д.). Возможность локально воздействовать на участки поверхности размером до долей микрона, высокая скорость нагрева и мобильность в управлении лазерным лучом делают методы лазерной модификации материалов все более привлекательными. Однако, наряду с очевидными преимуществами использования лазерного излучения для обработки материалов, воздействие мощного излучения может сопровождаться рядом нежелательных последствий, связанных с генерацией дефектов, структур дефектов, неоднородным плавлением и образованием периодических структур рельефа поверхности. Особенно критично наличие дефектов влияет на свойства кристаллических материалов, имеющих микронные и субмикронные размеры. Именно такого размера элементы используются в современной электронике.

Другой важный в практическом отношении пример, где генерация и накопление дефектов приводят к необратимым изменениям свойств материала – это разрушение оптических элементов (зеркал, оптических покрытий и т.д.), находящихся длительное время под воздействием мощного лазерного излучения (особенно импульсно-периодического).

Для выбора оптимальных режимов лазерной обработки материалов и создания, стойких к воздействию лазерного излучения оптических элементов необходимо детальное знание механизмов генерации, взаимодействия и накопления структурных дефектов.

Возможность лазерной генерации в кристаллах (диэлектриках, полупроводниках, металлах) высокой концентрации структурных дефектов (вакансий, междоузлий, дислокаций, пор) – давно известное явление. Однако до настоящего времени не до конца понятыми остаются механизмы аномально высокой лазерно-стимулированной диффузии дефектов, механизмы

образования и роста макродефектов (дислокаций, кластеров) в инициируемых лазерным излучением неоднородных полях температуры и концентрации точечных дефектов, а также механизмы формирования упорядоченных структур макродефектов (упорядоченных структур дислокаций, кластеров). Как правило, твердофазное разрушение материала связано именно с ростом макродефектов.

При воздействии на материалы лазерных импульсов с плотностью мощности выше порога плавления на поверхности расплава могут наблюдаться упорядоченные структуры рельефа поверхности. Для плоской геометрии эти структуры достаточно хорошо изучены и изложены в ряде книг, обзоров и в большом количестве оригинальных работ. В ряде практических приложений мощных лазеров (в лазерной резке, пробивке отверстий) подобные структуры часто образуются на поверхности расплава в канале проплавления (КП) и остаются на его стенках после остывания расплава, тем самым, ухудшая качество обработки. Формирование упорядоченных структур-это фундаментальное физическое явление, связанное с развитием неустойчивостей рельефа поверхности расплава к действию различных сил: капиллярных, термокапиллярных, давления отдачи паров, испарительных. Исследование (особенно экспериментальное исследование) динамики движения расплава в КП и формирования поверхностных структур представляет серьезные трудности, и до настоящего времени существует потребность в экспериментальных работах в этом направлении.

Целью работы является выявление закономерностей и механизмов лазерно-стимулированных процессов генерации, взаимодействия и самоорганизации структурных дефектов и рельефа поверхности в конденсированных средах (в тонких металлических пленках, в приповерхностном слое полупроводников, металлов и на поверхности расплава на стенках канала проплавления).

В частности:

1. Определение особенностей газофазного осаждения металлических пленок на неоднородно нагретую поверхность и определение механизмов, приводящих к разрушению пленок.
2. Установление последовательности генерации структур дефектов в поверхностном слое полупроводников и влияние их на неоднородное плавление поверхности полупроводников (на примере кремния) при воздействии миллисекундных импульсов Nd³⁺:YAG лазера.
3. Выявление механизмов и построение модели твердофазного разрушения поверхности полупроводников (на примере кремния) при импульсно-периодическом воздействии субмикросекундных импульсов Nd³⁺:YAG лазера в вакууме и в атмосфере различных газов.
4. Выявление механизмов деформационно-стимулированной люминесценции хрупких металлических пластин и тонких металлических пленок, возникающей при воздействии лазерных импульсов
5. Экспериментальное исследование механизмов формирования рельефа поверхности расплава на стенках канала проплавления и определение зависимости скорости её образования от давления и типа окружающего газа и плотности мощности воздействующего лазерного излучения.

Научная новизна работы

Выполнен цикл экспериментальных работ, направленный на изучение новых механизмов генерации, взаимодействия и самоорганизации структурных дефектов в тонких металлических пленках, в поверхностном слое полупроводников и металлов, а также формирования рельефа поверхности расплава на стенках КП при воздействии лазерного излучения

1. Обнаружено новое явление, представляющее собой образование упорядоченных структур пор в металлических пленках при их лазерном осаждении на неоднородно нагретую поверхность. Определены критические режимы осаждения, приводящие к образованию структур пор. Для интерпретации наблюдаемого явления предложена модель пористо-

деформационной неустойчивости (ПДН), которая качественно согласуется с экспериментальными результатами.

2. Впервые зарегистрированы обратимые (релаксирующие после окончания лазерного импульса) дислокационные структуры. Определены условия и последовательность генерации обратимых и необратимых дислокационных структур на поверхности кремния при воздействии лазерного излучения.

3. Обнаружен эффект аномально продолжительной деформации поверхности кремния, возникающий при воздействии лазерных импульсов в газовой атмосфере. Установлено, что наблюдаемый эффект связан с лазерно-стимулированной, ускоренной диффузией атомов окружающего газа в приповерхностный слой и образованием медленно релаксирующих локальных неоднородностей, представляющих собой дислокации в окружении повышенной концентрации атомов газа.

4. Установлены механизмы и предложена физическая модель роста дислокаций при импульсно-периодическом воздействии коротких лазерных импульсов в вакууме и в атмосфере окружающего газа, качественно описывающая разрушение поверхности полупроводников (на примере монокристаллического кремния).

5. Зарегистрирована деформационно-стимулированная люминесценция хрупких мелкодисперсных металлов. Установлена связь между порогом возбуждения люминесценции и дисперсностью материала.

6. Зарегистрирован колебательный режим движения (абляции) расплава из канала проплавления при воздействии миллисекундных лазерных импульсов на металлы. Обнаружена новая форма крупномасштабных структур рельефа поверхности на стенках КП (спиралеподобная структура), характеризующая форму колебательного движения расплава по стенкам канала (вид неустойчивости рельефа поверхности расплава).

Практическая ценность работы

1. Предложены рекомендации по выбору режима осаждения пленок, при котором, можно избежать образования структур пор и тем самым получать однородные, с хорошей адгезией пленки.
2. Результаты исследования деформационно-стимулированной люминесценции могут быть использованы для создания бесконтактного, неразрушающего метода диагностики дефектов и начальной стадии разрушения твердых тел.
3. Результаты исследования зависимости скорости образования канала проплавления от давления внешней атмосферы могут быть использованы в таких практических приложениях, как глубоководная лазерная резка и сварка.
4. Результаты по многоимпульсному разрушению поверхности полупроводников могут быть использованы в технологии лазерной обработки полупроводников для определения критических параметров используемого лазерного излучения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Обнаружение и определение основных характеристик нового явления образования упорядоченных структур пор в пленках в процессе их осаждения из газовой фазы на неоднородно нагретую поверхность. Образование упорядоченных структур пор зависит от условий осаждения (скорости осаждения, градиента температуры) и наблюдается в местах, где пленка достигает критической толщины.
2. Результаты экспериментального определения последовательности микроструктурных изменений в приповерхностном слое монокристаллического кремния обусловленных твердофазной генерацией дефектов и структур дефектов при воздействии миллисекундных импульсов $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазера. Полученные экспериментальные результаты позволили установить, что до определенного, порогового значения плотности энергии E_{th} лазерного импульса имеет место генерация обратимых структур дефектов (структур дислокаций), которые релаксируют после окончания лазерного импульса, а выше E_{th} -

необратимых (сохраняющихся) структур дислокаций. Неоднородное плавление поверхности начинается в местах пересечения линий дислокаций и связано с понижением порога плавления поверхности по E_d в этих местах.

3. Физическая модель и подтверждающие ее экспериментальные результаты исследования твердофазного разрушения поверхности монокристаллического кремния при импульсно-периодическом воздействии субмикросекундных импульсов $Nd^{3+}:YAG$ лазера в вакууме и в атмосфере окружающего газа. Твердофазное разрушение поверхности в вакууме определяется конкуренцией процессов роста дислокаций за время действия лазерного импульса и их релаксацией в период между импульсами. В атмосфере окружающего газа на разрушение поверхности оказывает существенное влияние лазерно-стимулированная диффузия газа в приповерхностный слой материала.

4. При импульсной пластической деформации хрупких мелкозернистых металлов с низкой подвижностью дислокаций может возбуждаться люминесценция. Возможной причиной люминесценции являются реакции взаимодействия зернограницных дислокаций с примесями, локализованными в межзеренной области.

5. Развитие неустойчивостей в расплаве на стенках канала проплавления образующегося при воздействии лазерного излучения, может приводить к образованию как крупномасштабных некогерентных (с периодом $d \approx 30-40$ мкм), так и мелкомасштабных когерентных (с периодом $d \approx \lambda$, где λ -длина волны лазера) упорядоченных структур. Крупномасштабные структуры определяют колебательную форму выноса (абляции) расплава из канала проплавления. Наличие высокого внешнего давления оказывает существенное влияние на развитие неустойчивостей в расплаве и на формирование упорядоченных структур.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации обсуждались на семинарах ИПЛИТ РАН, ИОФАН, ФИАН, МГУ и ТРИНИТИ, а также докладывались на национальных и международных конференциях:

VII Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом, Ленинград, 1988, 1990, 1996гг.; Всесоюзном семинаре “Лазерная техника и технология”, Вильнюс, 1988г.; XIII-Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике”, 1988, 1991, 1998, 2001гг.; II-Всесоюзном симпозиуме по ВТСП, Харьков, 1988г.; II-Всесоюзной конференции по ВТСП, Киев, 1989г., III-Всесоюзной конференции “Применение лазеров в народном хозяйстве”, Шатура, Моск.обл., 1989г.; Всесоюзной конференции “Физика и применение твердотельных лазеров”, Москва, 1990г.; Int.Conf. on Advanced Materials and Laser Technology ALT'92, IOFAN, Moscow, 1992г.; VII-Международной конференции “Оптика лазеров”, Санкт-Петербург, 1993; Всесоюзной конференции “Лазерные технологии-93”, Шатура, Моск.обл., 1993г., The International Symposium on High Power Lasers and Laser Applications, Vienna, Austria, 1994; Int.Conf. ILLA-98, Shatura, Moscow region, Russia, 1998, 2001гг, Международной конференции по росту и физике кристаллов. Москва, Россия, 1998, 2000, 2002гг; Advanced High-Power Laser and Applications AHPLA '99, Osaka, Japan, 1999, Russian-German laser symposium, Vladimir-Suzdal, 2000, International Symposium Laser technologies and lasers, LTL'2001, Plovdiv-Smolyan, Bulgaria, 2001\$ Conference on Lasers, Applications and Technologies, LAT-2002, Moscow, Russia, 2002.

Личный вклад автора

В диссертацию вошли результаты исследований проведенных автором в ИПЛИТ РАН. Автором поставлены научные задачи, выбраны пути их решения и предложены методы и схемы экспериментальных исследований. Все вошедшие в диссертацию оригинальные результаты получены либо самим автором, либо при его определяющей роли.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 статьях в различных журналах. Кроме этого, результаты работы опубликованы в 16 статьях в трудах SPIE, 3 статьях в трудах школ и 3 препринтах, а также в тезисах докладов

более чем 45 различных конференций. Список публикаций приведен в конце диссертации в списке литературы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал диссертации изложен на 285 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 1 таблицу, библиографию из 284 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, анализируется современное состояние работ в этом направлении и определяются цели и конкретные задачи, которые предполагается решить в работе.

Первая глава посвящена исследованию механизмов генерации, взаимодействия и самоорганизации структурных дефектов в тонких металлических пленках в процессе их осаждения на поверхность подложки с неоднородным распределением температуры. Для получения неоднородного распределения температуры на поверхности подложки использовалось лазерное излучение. Осаждение пленок проводилось методом пиролитического разложения паров карбониллов на неоднородно нагретой таким способом подложке. Кратко изложены экспериментальная установка и методика осаждения. Обнаружено, что при определенных режимах осаждения в пленке наблюдается явление образования периодических структур пор. На рис.1 показан характерный вид пленки с периодической структурой концентрических сквозных пор. Определены режимы осаждения и измерены критические параметры осаждаемой пленки (скорость осаждения, толщина пленки, распределение толщины пленки вдоль подложки, распределение температуры вдоль подложки) при которых наблюдается образование периодических структур пор.

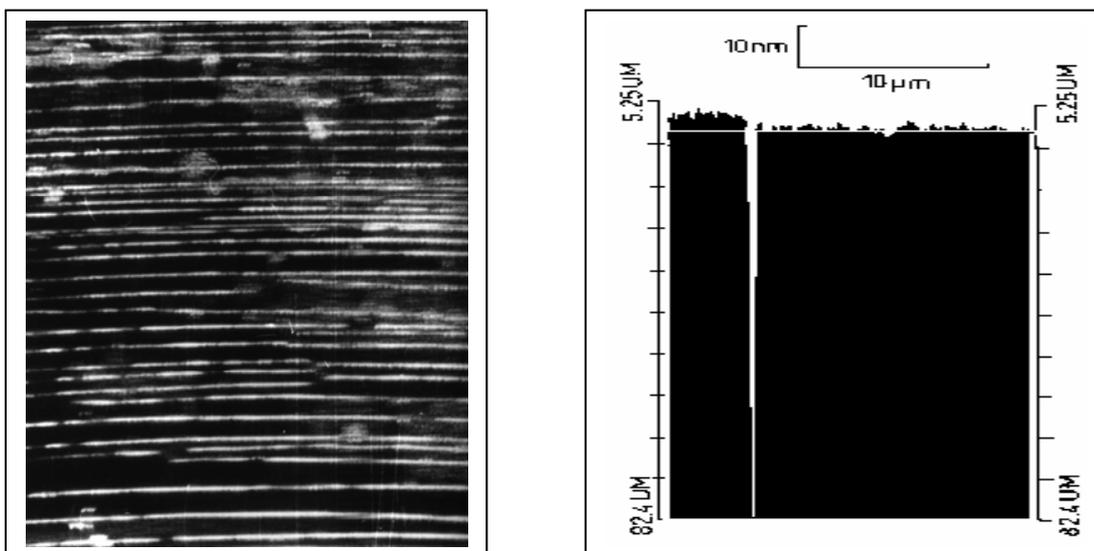


Рис.1. а) периодическая структура пор в пленке, период структуры $d \approx 30-40$ мкм., б) отдельная пора прописанная на профилемере “Talystep”, ширина поры $\delta < 0.4$ мкм.

Показано, что при определенных условиях осаждения начинается периодическое отслоение пленки по местам скопления пор. Измерены основные параметры образующихся структур пор-период структур и зависимость периода от температуры и градиента температуры. Измерения толщины пленок проводились на интерферометре “Zygo”, а измерения параметров структур на профилемере “Talystep”. Установлено, что образование структур пор зависит от скорости осаждения пленки и, что существуют режимы осаждения, при которых можно избежать образования структур пор и, таким образом, получать качественные пленки с высокой адгезией с подложкой. Обсуждаются основные механизмы, определяющие пространственное распределение дефектов (пор) в пленке. Дана интерпретация наблюдаемого явления. Согласно модели, предложенной в работах [1,5,7], образование периодических кольцевых структур пор происходит в результате развития пористо-деформационно-тепловой неустойчивости (ПДН), физический механизм которой состоит в следующем. Известно, что в пленках, получаемых из газовой фазы, содержится высокая концентрация пор [1*]. При превышении определенной скорости осаждения (роста пленки) концентрация пор достигает некоторой критической концентрации, и однородное распределение становится неустойчивым. Возбуждение затравочной изгибной

деформации в пленке приводит к образованию периодически повторяющихся областей растяжения и сжатия. Вследствие деформационно-индуцированного дрейфа в областях сжатия пленки скапливаются вакансии, а в областях растяжения поры. Это усиливает затравочные деформации и таким образом организуется положительная обратная связь, приводящая к неустойчивости связанных между собой деформационной и концентрационной гармоник. В результате в областях растяжения достигается высокая неравновесная плотность пор и, как следствие, возможно образование макропор. С учетом симметрии задачи (условий осаждения пленки) это приводит к образованию концентрических скоплений из пор. В местах скопления пор уменьшается адгезия пленки с подложкой, в результате происходит периодическое отслоение пленки от подложки.

Исследовалось влияние структурных дефектов на свойства ВТСП пленок полученных методом лазерного испарения мишени из керамики $YBaCuO$ с последующим осаждением продуктов испарения на соответствующую подложку. По спектрам эмиссии продуктов испарения показано, что при испарении мишени и транспортировке продуктов испарения к подложке происходит частичная потеря кислорода, в результате чего нарушается стехиометрия напыляемых пленок по кислороду и образуется значительное количество дефектов структуры: -кислородных вакансий, что, согласно существующим представлениям, понижает температуру сверхпроводящего перехода. При напылении в атмосфере кислорода, в результате взаимодействия продуктов испарения с кислородом, происходит восполнение недостающего кислорода, и таким образом пленки получают стехиометричного состава.

Исследовалось влияние радиационного дефектообразования (генерации вакансий) в кислородной подрешетке ВТСП-пленок, возникающего при облучении их ионами Ne^+ , на сверхпроводящие свойства пленок. Установлено, что с увеличением дозы облучения, и таким образом, с увеличением концентрации вакансий в кислородной подрешетке происходит падение температуры сверхпроводящего перехода ВТСП -пленок.

Во второй главе диссертации представлены результаты исследования процессов генерации, взаимодействия и самоорганизации структурных дефектов в приповерхностном слое кремния, возникающих при воздействии миллисекундных импульсов Nd:YAG и Nd:YAlO₃ лазеров с р-поляризацией и непрерывного излучения Nd:YAG лазера. Описана экспериментальная установка, применяемые методы диагностики и методика исследований. Диагностика изменений рельефа поверхности в процессе воздействия лазерного импульса осуществлялась по зеркальному и дифракционному рассеянию луча пробного лазера. После лазерного воздействия поверхности образцов подвергались травлению и далее исследовались с помощью оптического микроскопа и на профилометре. В ряде опытов, для выявления нестабильных структур дефектов, облучение образцов лазерными импульсами осуществлялось непосредственно в травителе. На рис.2 показаны структуры на поверхности кремния, полученные при разных режимах облучения.

Показано, что образование структур дислокаций (Д-решеток) на поверхности кремния начинается при плотностях энергии, меньших порога локального плавления и имеет пороговый характер: при $E_{л} < 6.5$ Дж/см² структур на поверхности кремния не зарегистрировано, при $6.5 < E_{л} < 7.5$ Дж/см² на поверхности формируются нестабильные структуры дислокаций, которые быстро релаксируют после окончания лазерного импульса; при $E_{л} \geq 7.5$ Дж/см² образование структур дислокаций имеет необратимый характер. Установлено, что дислокационная структура на поверхности (100) кремния является суперпозицией двух, направленных соответственно по кристаллографическим осям X и Y, дислокационных структур (структур линий скольжения дислокаций). Следует отметить, что на возможность образования структур дислокаций на поверхности кремния при воздействии миллисекундных лазерных импульсов ранее обращалось внимание в работе [2*].

Показано, что в местах пересечения линий дислокаций, при $8.5 \leq E_{л} < 35$ Дж/см², начинается локальное плавление поверхности и формирование упорядоченной ячеистой структуры. Увеличение плотности ячеек и их слияние

приводят к образованию периодической структуры (решеток) неоднородного плавления поверхности с постоянным периодом $d_1 \approx 3-3.5 \mu\text{м}$ и ориентацией определяемой взаимной ориентацией вектора \mathbf{E} лазерного излучения и кристаллографических осей кремния.

Дальнейшее увеличение $E_{\text{л}} > 35 \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию решетки, период и ориентация которой определяются параметрами лазерного излучения (И-решетки), в результате на поверхности наблюдается суперпозиция решеток с зависящим и не зависящим от длины волны лазера периодом. При больших $E_{\text{л}}$, преобладают И-решетки.

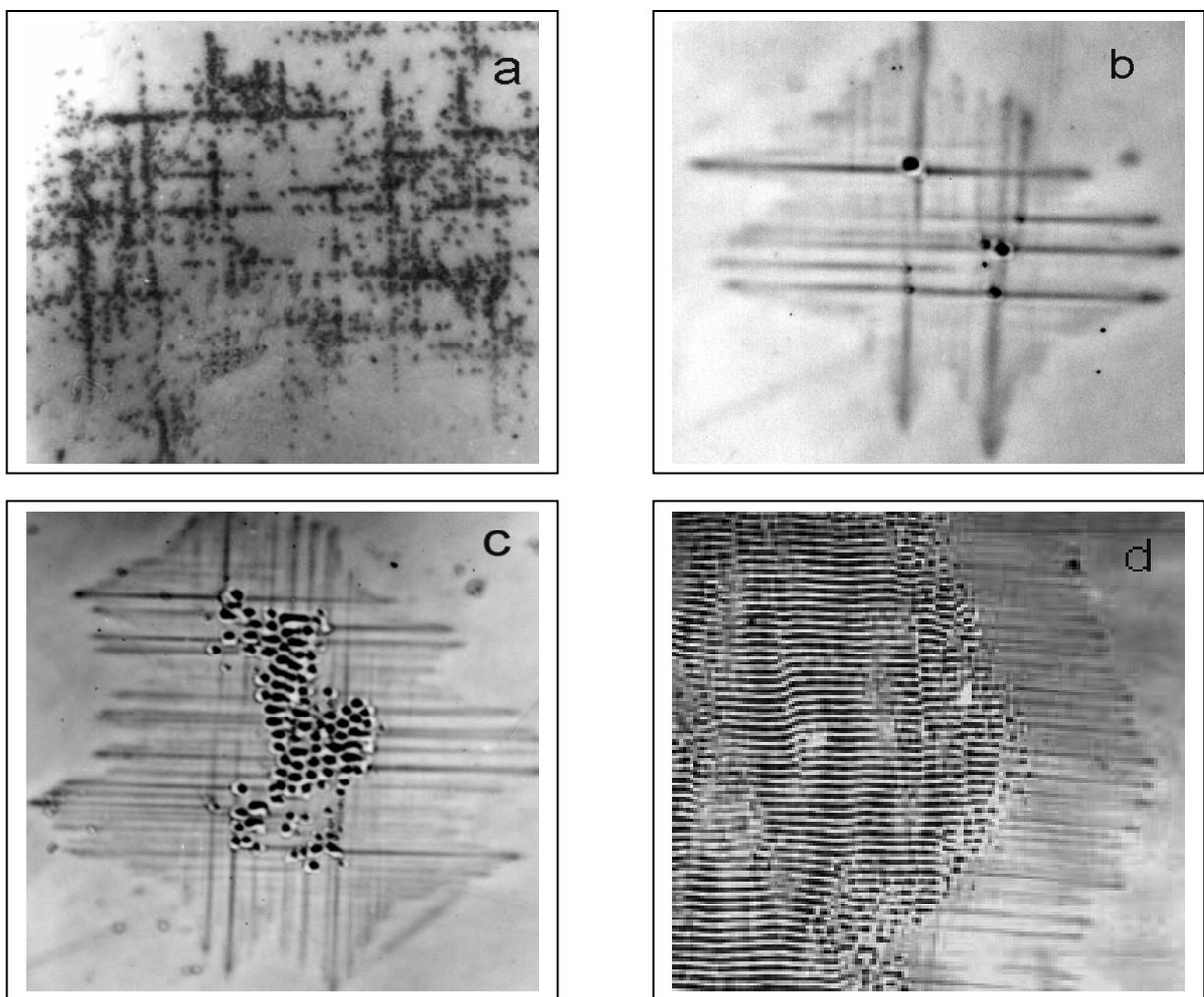


Рис.2. а) Увеличение $M=500$, $E_{\text{л}} \approx 6.5 \text{ Дж/см}^2$, поверхность кремния после облучения непосредственно в травителе; б) $M=250$, $E_{\text{л}} \approx 7.5 \text{ Дж/см}^2$, на облученном участке поверхности после обработки в травителе проявляется структура дислокаций в виде прямых линий, ориентированных вдоль кристаллографических направлений; в) $M=250$, $E_{\text{л}} \approx 12 \text{ Дж/см}^2$, локальное плавление начинается на пересечениях линий дислокаций; г) $M=250$, $\mathbf{E} \perp \mathbf{X}$, $E_{\text{л}} \approx 35 \text{ Дж/см}^2$, решетка с не зависящим от длины волны лазерного излучения периодом $d \approx 3 \div 3.5 \mu\text{м}$, образованная в результате слияния локальных лунок плавления.

Показано, что при длительном облучении ($t \approx 60-70$ с) поверхности кремния непрерывным лазерным излучением имеет место генерация упорядоченных структур дислокаций [9].

Интерпретация экспериментальных результатов проводится на основе теории диффузионно-деформационной неустойчивости (ДДН), предложенной в работах [9,11]. Появление Д-структур решеток при воздействии миллисекундных лазерных импульсов связывается с процессом генерации и упорядочения точечных дефектов в тонком (толщиной порядка $\sim 10^{-5}$ см) приповерхностном слое полупроводника [11]. Действие лазерного излучения приводит к генерации большого числа точечных дефектов (вакансий и междоузлий) в приповерхностном слое полупроводника. Пространственно-однородное поле точечных дефектов с концентрацией n_{do} при превышении определенной критической концентрации $n_{do} > n_{dc}$ становится неустойчивым, и развивается ДДН с образованием либо протяженных дефектов (пор или дислокационных петель), либо с образованием периодических решеток скоплений точечных дефектов. Механизм ДДН состоит в следующем. Локальная флуктационная фурье-гармоника концентрации дефектов n_{d1} приводит к появлению сил $F \sim \text{grad}(n_{d1})$, деформирующих упругий континуум и создающих фурье-гармонику деформации $\xi = \text{div}(u)$, где u - вектор смещения среды. Поскольку в поле деформаций дефект обладает энергией $w = \theta_d \cdot \xi$, где $\theta_d = \text{const}$, то это вызывает появление потоков дефектов $j \sim \text{grad}(\xi)$, направленных к потенциальным деформационным ямам. Это усиливает исходную амплитуду затравочной фурье-гармоники концентрации дефектов, так что при $n_{do} > n_{dc}$ возникает неустойчивость. В результате дефекты автолокализуются в созданных ими же самими потенциальных ямах. ДДН стабилизируется нелинейностью упругого континуума. В местах скопления точечных дефектов начинается образование дислокационных петель.

Механизм упорядочения дислокаций при воздействии непрерывного лазерного излучения связан с межплоскостным перераспределением дислокаций за счет деформационно-индуцированного дрейфа вакансий [9].

В третьей главе диссертации исследуются процессы твердофазного разрушения поверхности кремния при импульсном и импульсно-периодическом воздействии субмикросекундных импульсов излучения Nd:YAG: -лазера с допороговой плотностью мощности $I < I_m$, где I_m -порог плавления поверхности. Диагностика изменений рельефа поверхности в процессе лазерного облучения осуществлялась по диффузному рассеянию луча пробного He-Ne лазера. В ряде случаев проводилась последующая обработка образцов в травителе (состав травителя позволял выявлять дислокации и микротрещины) и исследование с помощью оптического микроскопа. Теоретически процессы многоимпульсной генерации и накопления дефектов ранее рассматривались, например, в работе [3*] для металлов и в работе [4*] для полупроводников.

Исследовалось влияние окружающей атмосферы и типа газа на процесс генерации дефектов в поверхностном слое и порог разрушения поверхности. С этой целью эксперименты проводились в вакууме ($P \approx 10^{-2}$ Торр.) и в атмосфере ($P_{\text{газ}} \approx 1$ атм.) различных газов:-активных (кислород, азот, углекислый газ) и пассивных (инертные газы гелий, аргон, криптон).

Исследования в вакууме. Установлено, что при воздействии одиночного импульса с плотностью мощности вплоть до порога плавления (I_m) твердофазного разрушения поверхности не происходит. Твердофазное разрушение наблюдается только при импульсно-периодическом воздействии. Построена зависимость критического числа лазерных импульсов $N_c(I, \tau)$ (где $N_c(I, \tau)$ -минимальное необходимое число лазерных импульсов, воздействие которых приводит к появлению диффузного рассеяния зондирующего луча поверхностью) от их плотности мощности и периода следования см.рис.3. На рис.4 показаны изменения (разрушение) поверхности после воздействия лазерных импульсов.

Анализ полученных зависимостей $N_c(I, \tau)$, а также исследования изменений структуры поверхности образцов позволяют заключить, что разрушение поверхности связано с генерацией и ростом дислокаций.

Качественно, образование и увеличение размера дислокации R_k (R_k - радиус дислокационного диска после воздействия k импульсов) в зависимости от числа лазерных импульсов k можно интерпретировать следующим образом. В течение действия лазерного импульса происходит разогрев тонкого приповерхностного слоя и генерация в нем значительной концентрации (до $n \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$) точечных дефектов.

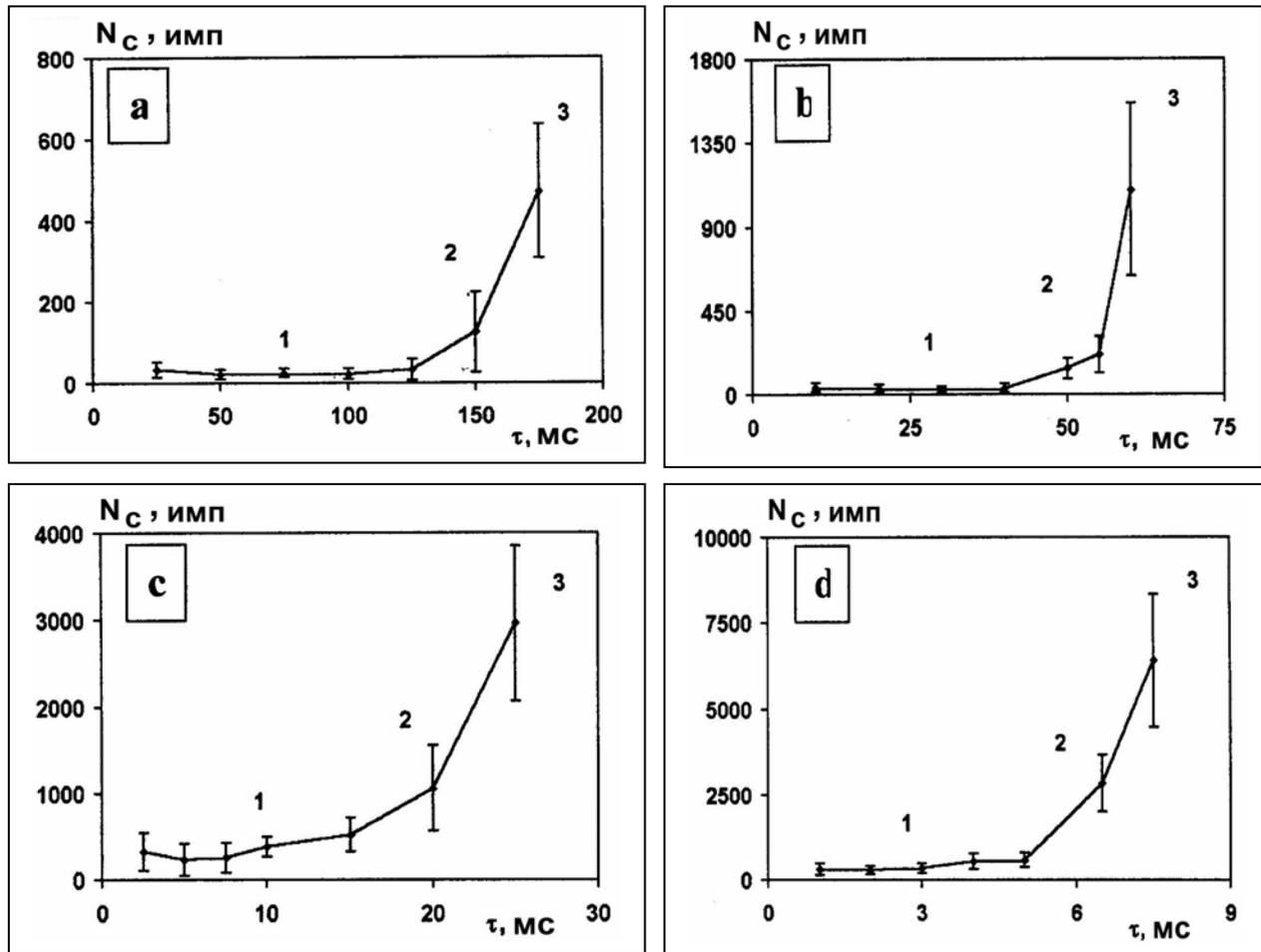


Рис 3. Зависимости критического числа N_c от плотности мощности и периода следования лазерных импульсов $N_c = N(I, \tau)$:
 а) $I = 3.4 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$; б) $I = 3.1 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$; в) $I = 2.8 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$; д) $I = 2.5 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$

За время между импульсами температура быстро падает до начальной, а концентрация дефектов в результате взаимной рекомбинации, диффузии и стока уменьшается, в результате прекращается рост дислокаций и начинается обратный процесс- релаксация дислокаций.

Конкуренция процессов роста и релаксации дислокаций, в конечном итоге и определяет разрушение поверхности.

Исследования в атмосфере газов. Обнаружено, что воздействие одиночного субмикросекундного лазерного импульса на кремний в атмосфере окружающего газа инициирует появление anomalно продолжительного по времени скачка интенсивности рассеянного излучения пробного луча.

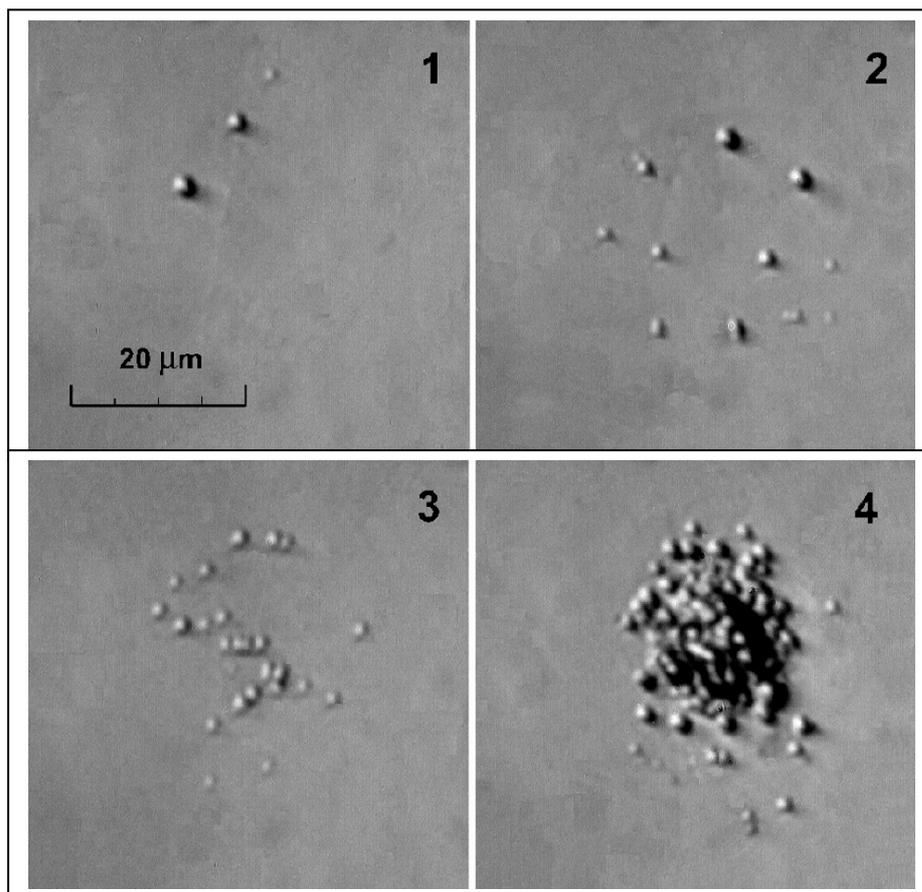


Рис.4. Фотографии поверхности образцов после облучения ($I=2.8 \times 10^6$ Вт/см², $\tau=20$ мс) и обработки в травителе (время облучения: **1** - 10 с, **2** - 20 с, **3** - 50 с, **4** - 100 с).

Длительность anomalного рассеяния составляет ~ 0.5 с, что почти на шесть порядков превышает длительность воздействующего лазерного импульса. Для выяснения причин anomalного рассеяния исследования проводились в различных газах: в активных газах, таких как кислород, азот, углекислый газ, способных образовывать химические соединения с кремнием при высоких температурах, и инертных газах-гелий, аргон, криптон которые не образуют соединений. Выбранные газы существенно отличаются друг от друга также

атомными размерами (в несколько раз), химической активностью, растворимостью в кремнии (на несколько порядков) и коэффициентами диффузии (на несколько порядков).

Показано, что порог (по I) появления аномального пика рассеяния на кремнии зависит от типа окружающего газа: наименьший порог наблюдается в атмосфере гелия, а максимальный - в атмосфере криптона см.рис.5.

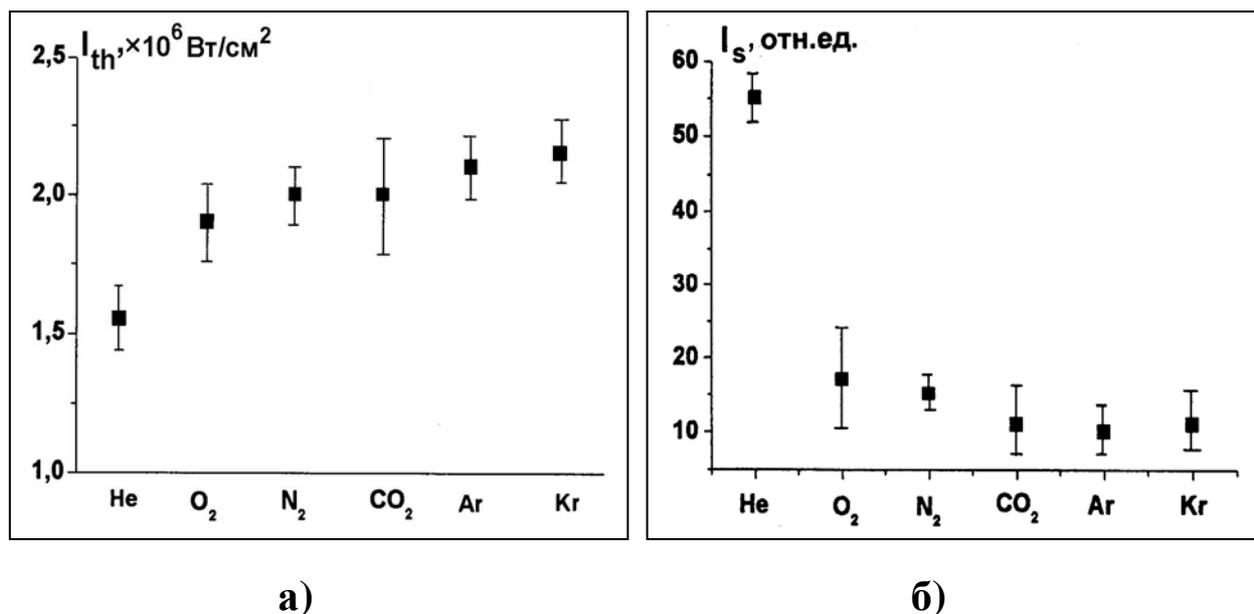


Рис.5. а) Изменение порогового значения I_{th} , приводящего к появлению аномального рассеяния в среде различных газов, б) Зависимость интенсивности рассеянного излучения от типа окружающего газа при одинаковом I ($I \approx 2.5 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$).

Наблюдаемые аномалии в рассеянии зондирующего излучения связываются с образованием нестабильных локальных неоднородностей (рассеивающих центров) в приповерхностном слое. Локальные неоднородности образуются в результате генерации дислокаций и лазерно-стимулированной диффузии атомов окружающего газа в приповерхностный слой и представляют собой систему “дислокация + облако примесных атомов”.

Четвертая глава посвящена исследованиям механолюминесценции (МЛ) хрупких мелкодисперсных материалов, возбуждаемой импульсными пластическими термомодеформациями при воздействии лазерных импульсов.

Для проведения исследований был подготовлен набор металлических пластин из W, Mo, (хрупкие мелкодисперсные материалы с низкой

подвижностью дислокаций) и из Al, Cu, Ti (пластичные материалы с высокой подвижностью дислокаций) с толщинами-от 50мкм до 500мкм и набор пленок из этих же материалов с толщинами $\approx 1-2$ мкм, напыленных на кварцевые подложки. Импульсная деформация образцов осуществлялась воздействием миллисекундных и субмикросекундных импульсов Nd:YAG лазеров. Регистрация МЛ осуществлялась с тыльной по отношению к воздействию лазерному лучу стороны образца. Контроль состояния исследуемой поверхности проводился с помощью оптического и атомно-силового микроскопов.

Установлено, что в хрупких мелкодисперсных металлах в вольфраме и в молибдене, при импульсной термомодеформации может возбуждаться МЛ.

Измерены характерные значения интенсивности МЛ в исследованных материалах. Показано, что имеется тенденция к росту пороговых значений термонапряжений $\sigma_{th}(T_{th})$, необходимых для возбуждения МЛ, с уменьшением толщины образца, см.рис.6. На рис.7 для сравнения показаны характерные значения $\sigma_{th}(T_{th})$ для мелкодисперсных пленок из разных материалов.

Получены спектральные зависимости интенсивности МЛ вольфрама и молибдена в диапазоне $\lambda=460-760$ нм, возбуждаемой воздействием лазерных импульсов. Показано, что МЛ вольфрама и молибдена имеют широкий спектр и наблюдаются во всем исследуемом спектральном диапазоне.

Согласно существующим в настоящее время представлениям, в мелкозернистых материалах дислокации в объёме зерен практически отсутствуют, а пластическая деформация происходит в основном за счет межзеренного проскальзывания, поэтому можно предположить, что механолюминесценция таких материалов обусловлена активацией реакций взаимодействия зернограницных дислокаций с примесными состояниями, локализованными в межзеренной области (в результате туннельных переходов). Полученные результаты и предлагаемый подход к их объяснению в целом коррелируют с результатами других авторов, известными из литературы,

например, см. [5*]. Предложенная модель позволяет качественно интерпретировать результаты экспериментов.

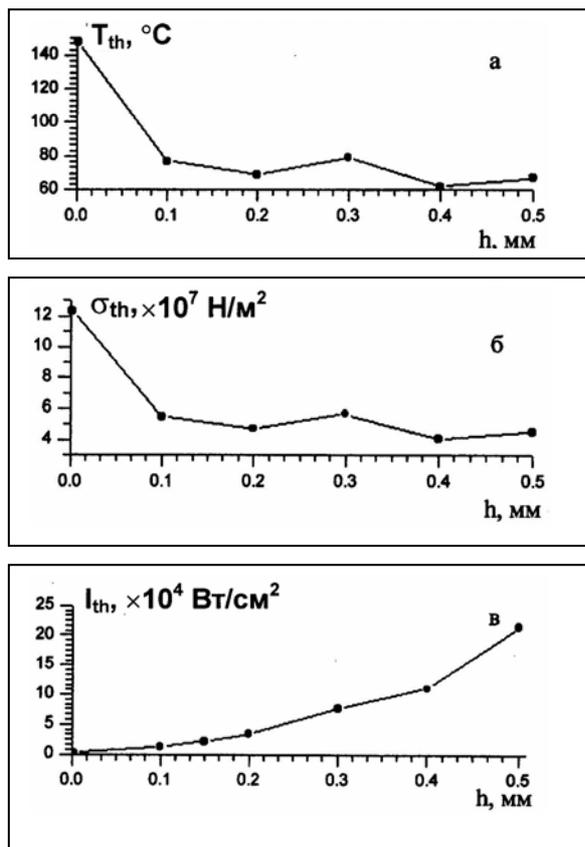


Рис.6

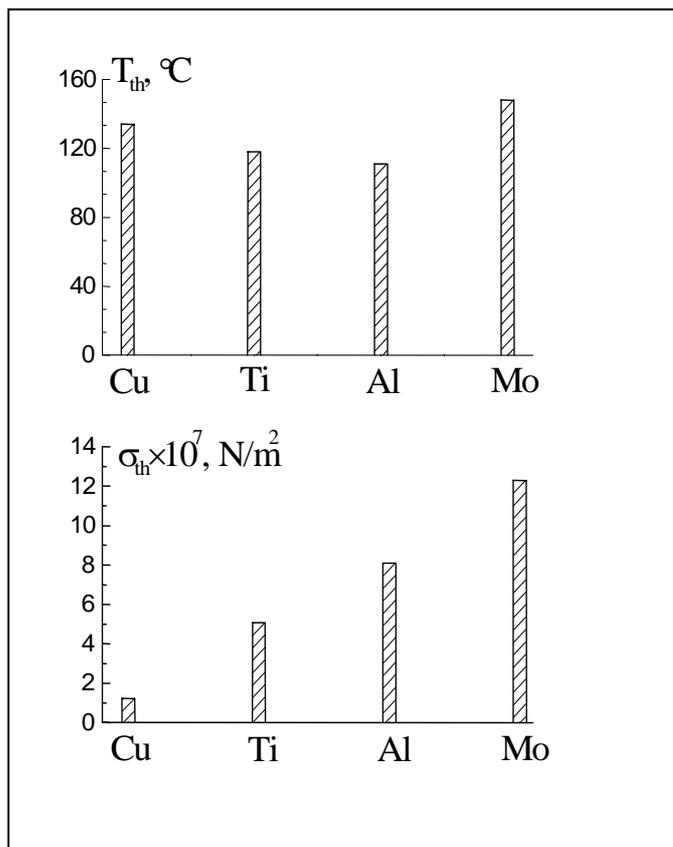


Рис.7

Рис.6. Измеренная зависимость пороговой плотности мощности лазерного импульса $I_{th}(h)$, необходимой для возбуждения механолюминесценции в молибдене, от толщины h образца и соответственно рассчитанные зависимости пороговых температур $T_{th}[I_{th}(h)]$, и термонапряжений $\sigma_{th}(T_{th})$, ($h=1, 100, 200, 300, 400, 500\mu\text{м}$).

Рис.7. Пороговые значения температуры $T_{th}[I_{th}(h)]$ и термонапряжений $\sigma_{th}(T_{th})$, необходимые для возбуждения МЛ в различных пленках ($h \approx 1-2 \mu\text{м}$).

В пятой главе исследуются механизмы формирования структур рельефа поверхности на стенках канала проплавления и скорость движения дна канала в металлах при воздействии миллисекундных и субмиллисекундных импульсов Nd:YAG лазера. Исследования проводились на воздухе, в вакууме и в атмосфере газов (кислород, аргон) при давлениях до 15 атмосфер. Для выявления вклада окисления на формирование рельефа поверхности стенок и скорость образования канала исследования проводились в разных по химической активности газах: кислороде (активный газ) и аргоне (инертный газ).

Построены зависимости скорости движения дна канала проплавления $v(I,P)$ от плотности мощности лазерного импульса и давления окружающего газа. Показано, что вид зависимостей $v(I,P)$ в атмосфере кислорода и аргона существенно различаются. В кислороде, при повышенных значениях (I,P) , скорость образования канала заметно выше, чем в аргоне.

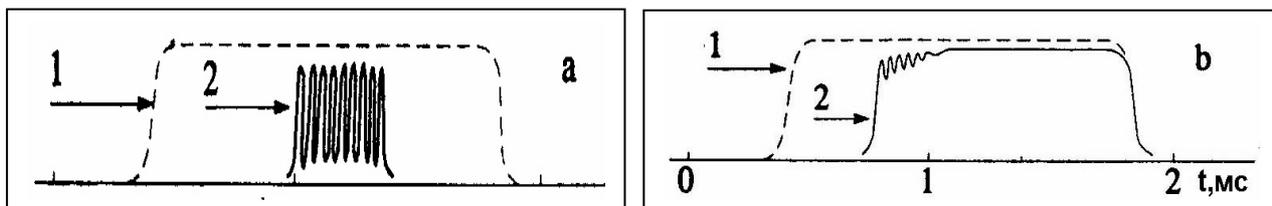
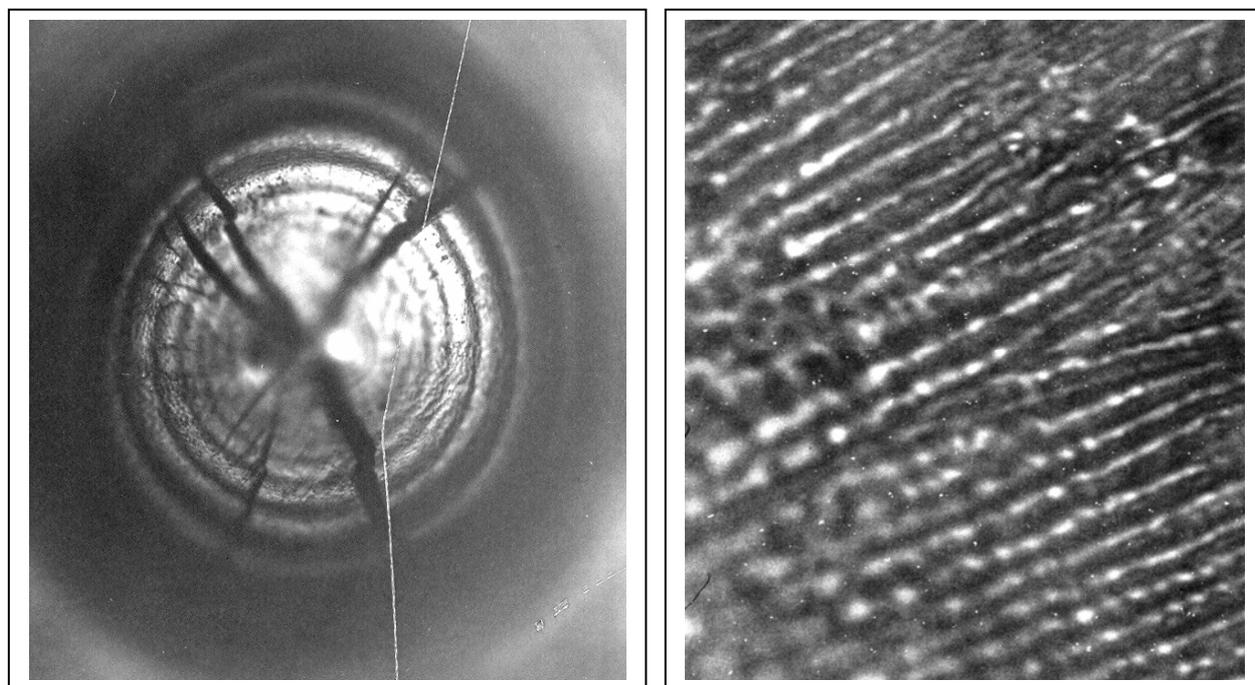


Рис. 8. Пульсирующий режим пробивки пластины из нержавеющей стали: **а)**-при $I=2.5 \cdot 10^5$ Вт/см²; **б)** при $I=4 \cdot 10^5$ Вт/см²; кривая 1-лазерный импульс, 2- интенсивность проходящего лазерного излучения в момент пробивки пластины

Зависимости $v(I,P)$ состоят из нескольких характерных участков, наличие которых вероятно связано со сменой механизмов удаления расплава из канала при увеличении I .



а)

б)

Рис. 9. **а)** крупномасштабная спиралеподобная структура с шагом $d \approx 30-40$ мкм на дне канала, образец вольфрам, **б)** мелкомасштабная структура с периодом $d \approx \lambda$ ($\lambda \approx 1.06$ мкм) на стенках канала, образец никель

Обнаружен пульсирующий режим образования сквозного канала проплавления (пробивки) металлических пластин см.рис.8. Зарегистрированы колебания температуры дна канала. Частота колебаний температуры хорошо коррелирует с пульсирующим режимом пробивки пластин, что дает основание полагать, что колебания температуры связаны с колебательным характером вытеснения (абляции) расплава из канала проплавления.

Обнаружена новая форма крупномасштабной периодической структуры, представляющей собой спиралеобразную модуляцию рельефа поверхности стенок канала с шагом $d \sim 30-40$ мкм. см рис.9а.

Установлено, что наряду с крупномасштабными структурами имеет место образование на стенках канала мелкомасштабных периодических структур с периодом $d \sim 1-3$ мкм (период меняется по глубине) и ориентацией, направленной по касательной к стенкам канала (штрихи решетки направлены вглубь каверны) см.рис.9б. Подобные структуры, вероятно, вносят существенный вклад в поглощение лазерного излучения. Мелкомасштабные структуры имеют интерференционную природу и для “плоской” геометрии достаточно полно изучены. Для гидродинамики расплава в канале проплавления значительный интерес представляют крупномасштабные структуры.

Обсуждаются возможные механизмы образования крупномасштабных упорядоченных структур, связанные с развитием неустойчивости рельефа поверхности расплава к действию термокапиллярных сил (термокапиллярная неустойчивость-ТКН) и давлению отдачи паров (капиллярно-испарительная неустойчивость-КИН). При интерпретации экспериментальных результатов и проведении оценок использовались результаты работы [6*].

Развитие неустойчивостей во многом определяется скоростью вклада энергии лазерного излучения в зону облучения. Наличие повышенного внешнего давления может изменить газодинамику испарения и разлета паров, в результате изменится вклад энергии и условия развития неустойчивостей. Обнаружено, что с повышением давления окружающего газа подавляется

тенденция к формированию рельефа поверхности на стенках канала проплавления.

Основные результаты и выводы по работе.

I. Исследование процессов дефектообразования в пленках:

1. Обнаружено явление образования периодических структур пор в металлических пленках в процессе их газофазного осаждения на неоднородно нагретую с помощью лазерного излучения подложку. Измерены основные характеристики структур (время образования, период, распределение вдоль поверхности подложки).

2. Установлено, что в местах скопления пор начинается отслоение пленки от подложки. Указаны режимы осаждения, при которых можно избежать образования структур пор и разрушения пленки.

3. По спектрам эмиссии продуктов испарения показано, что при импульсном лазерном напылении ВТСП- пленок в атмосфере кислорода, стехиометрический состав пленок обеспечивается за счет доставки недостающего кислорода в виде окислов Y_2O_3 , BaO , CuO .

II. Исследование процессов дефектообразования в поверхностном слое кремния:

1. Обнаружено, что в зависимости от плотности энергии воздействующего на поверхность (100) монокристаллического кремния лазерного импульса ($\tau_p \approx 1.5 \text{ мс}$) может образоваться либо обратимая структура дислокаций, которая быстро релаксирует после окончания лазерного импульса, либо необратимая структура дислокаций, которая сохраняется после окончания лазерного импульса.

2. Показано, что локальное плавление поверхности начинается на пересечениях линий дислокаций. Увеличение плотности локальных участков плавления и их слияние вдоль кристаллографических направлений приводит к формированию периодической структуры неоднородного плавления поверхности с

независящим от длины волны лазера периодом. Ориентация структуры (вдоль X или Y) определяется ориентацией вектора поляризации лазерного излучения E относительно кристаллографических осей.

3. Установлено, что в условиях вакуума ($P \approx 10^{-2}$ Торр) воздействие на поверхность кремния одиночного субмикросекундного импульса Nd³⁺:YAG лазера с плотностью мощности вплоть до порога плавления (I_m) не приводит к твердофазному разрушению поверхности. Твердофазное разрушение наблюдается только при импульсно-периодическом воздействии.

4. Построена зависимость критического числа лазерных импульсов $N_c(I, \tau)$ (где $N_c(I, \tau)$ -минимальное необходимое число лазерных импульсов, воздействие которых в вакууме приводит к появлению диффузного рассеяния поверхностью зондирующего луча) от их плотности мощности и периода следования.

5. Анализ полученных зависимостей $N_c(I, \tau)$, а также исследования изменений структуры поверхности образцов позволяют заключить, что разрушение поверхности кремния в вакууме связано с генерацией дислокаций и определяется конкуренцией процессов роста дислокаций за время действия лазерного импульса и их релаксацией в период между лазерными импульсами.

6. Обнаружено, что воздействие одиночного субмикросекундного лазерного импульса ($\tau_p \approx 0.3$ мкс) на кремний в атмосфере окружающего газа инициирует появление аномально продолжительного по времени всплеска рассеяния пробного луча поверхностью. Длительность аномального рассеяния составляет ~ 0.5 с, что почти на шесть порядков превышает длительность воздействующего лазерного импульса.

7. Показано, что порог (по I) появления аномального пика рассеяния на кремнии зависит от типа окружающего газа:- наименьший порог наблюдается в атмосфере гелия, а максимальный- в атмосфере криптона. Наблюдаемые аномалии в рассеянии зондирующего излучения связываются с лазерно-стимулированной, ускоренной диффузией атомов окружающего газа (примесных атомов) в поверхностный слой и образованием нестабильных локальных неоднородностей (рассеивающих центров) в поверхностном слое,

представляющих собой систему “дислокация + облако примесных атомов”, которые медленно релаксируют после окончания лазерного импульса за счет выхода (низкопороговой диффузии) примесных атомов по ядрам дислокаций на поверхность.

III. Исследование деформационно-стимулированной люминесценции металлов:

1. Показано, что при импульсной лазерной термомодеформации хрупких, мелкозернистых металлов вольфрама и молибдена может возбуждаться МЛ. Особенности строения этих материалов – малые размеры дислокационных ячеек (субзерен), отсутствие дислокаций внутри ячеек и развитая структура субзеренных границ - позволяют заключить, что деформация этих материалов в значительной степени происходит вследствие межзеренного проскальзывания, а люминесценция обусловлена активацией реакций взаимодействия зернограницных дислокаций с примесными состояниями, локализованными в межзеренной области.

2. Установлено, что существует тенденция роста пороговых значений термонапряжений, необходимых для возбуждения МЛ с уменьшением толщины (размеров зерен) образца.

3. Показано, что МЛ вольфрама и молибдена имеют широкий спектр и наблюдается во всем исследуемом спектральном диапазоне.

IV. Исследование процессов формирования рельефа поверхности на стенках канала проплавления при воздействии лазерных импульсов на металлы:

1. Обнаружена новая форма крупномасштабной периодической структуры, которая представляет собой спиралеподобную модуляцию рельефа поверхности стенок канала проплавления и является следствием развития нового типа неустойчивости движения расплава в канале проплавления.

2. Зарегистрирован колебательный режим образования сквозного канала проплавления (пробивки) металлических пластин. Зарегистрированы колебания

температуры дна канала проплавления. Установлена корреляция между периодом колебаний температуры дна канала проплавления и периодом пробивок, что указывает на колебательный режим удаления (абляции) расплава из канала проплавления.

3. Построены зависимости скорости образования канала проплавления в металлах при воздействии миллисекундных и субмиллисекундных лазерных импульсов на воздухе, в вакууме и в атмосфере газов (кислород, аргон) при давлениях до 15 атмосфер. Показано, что скорость образования канала проплавления зависит от типа и давления окружающего газа и максимальна в атмосфере кислорода. Установлено, что с повышением давления окружающего газа подавляется тенденция к формированию рельефа поверхности на стенках канала проплавления.

Цитируемая литература:

1*. Палатник Л.С., Черемский П.Г., Фукс М.Я., /Поры в пленках, М.: Энергоиздат, 1982.

2*. Вейко В.П., Имас Я.А., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б., //Известия АН СССР, сер. физ., 1985, Т. 49, № 6, С. 1236

3*. Бойко В.И., Лукьянчук Б.С., Царев Е.Р.. Лазерная генерация неравновесных дефектов в твердом теле //Труды ИОФАН, 1991, Т. 30, С.

4*. Володин Б.Л., Емельянов В.И., Шлыков Ю.Г.. //Квантовая электроника, 1993, Т. 20, № 1, С. 57.

5*. К.Б. Абрамова, А.И. Русаков, А.А. Семенов, И.П. Щербаков. //ФТТ **40**, 6, 957 (1998).

6*. В.С.Голубев. Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением, //Шатура, Препринт №83, 1999, с.161

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.Н.Баграташвили, А.Ф.Банишев, С.А.Гнедой, В.И.Емельянов, В.Н.Семиногов, К.С.Мерзляков, В.Я.Панченко, А.Н.Жерихин. Образование периодических кольцевых структур рельефа при лазерном осаждении металлических пленок, //Препринт НИЦТЛ АН СССР, г.Шатура, №32, 1987г.
2. С.В.Антоненко, В.Н.Баграташвили, А.Ф.Банишев, С.А.Гнедой, Е.А.Казначеева и др., Лазерное напыление ВТСП-пленок, //XIII-Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, Минск, Тезисы докладов, 6-9 сентября, 1988г., т.1, с.10.
3. С.В.Антоненко, В.Н.Баграташвили, А.Ф.Банишев, А.Ф.Басков, С.А.Гнедой, А.Н.Жерихин и др. Исследование влияния параметров лазерного излучения, температуры и отжига в атмосфере кислорода на свойства ВТСП-пленок при лазерном напылении, //Препринт НИЦТЛ АН СССР, г.Шатура, №44, 1988г.
4. Баграташвили В.Н., Банишев А.Ф., Казначеева Е.А. Исследование продуктов лазерного испарения $YBa_2Cu_3O_7$ при напылении ВТСП-пленок, //Сверхпроводимость: физика, химия, техника, т.2, №9, 144(1989).
5. V.N.Bagratashvili, A.F.Banishev, S.A.Gnedoy, V.I.Emel'yanov, A.N.Jerikhin, K.S.Merzljakov, V.Ya.Panchenko, V.N.Seminogov. Formation of Periodic Ring Structures of Relief and Voids Under Laser Vapor Deposition of Thin Films, //Applied Physics, A 52, 438(1991).
6. А.Ф.Банишев, М.М.Новиков. Исследования структурных изменений поверхности кремния, возникающих под действием лазерного излучения, //VIII-Всесоюзная конференция по взаимодействию оптического излучения с веществом, Ленинград, Тезисы докладов, 6-11 сентября, 1990г., с.183.
7. В.Н.Баграташвили, А.Ф.Банишев, С.А.Гнедой, В.И.Емельянов, В.Н.Семиногов, К.С.Мерзляков, В.Я.Панченко, А.Н.Жерихин. Эффект образования периодических структур пор при осаждении металлических пленок, //Поверхность, №2, 115(1991).

8. A.F.Banishev, I.M.Chistykov. Dynamics of the development of microrelief structure on silicon surface under action of Nd:YAG -laser pulses, // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, USSR, Leningrad, **Technical Digest, 1991. vol.1, p.35.**
9. А.Ф.Банишев, Б.Л.Володин, В.И.Емельянов, К.С.Мерзляков. Образование периодических структур дислокаций при лазерном воздействии на поверхность полупроводников, //ФТТ, т.32, №9, 2529(1990).
10. А.Ф.Банишев, М.М.Новиков. Структурные изменения поверхности кремния под действием лазерного излучения, //Препринт НИЦТЛ АН СССР, г.Шатура, №73, 1991г.
11. A.F.Banishev, V.I.Emel'yanov, M.M.Novikov. Defect Ordering and Changes in Silicon Surface Morphology under Linearly Polarized Millisecond Pulsed Laser Irradiation, //Laser Physics, vol.2, №2, 178(1992).
12. А.Ф.Банишев, М.М.Новиков. Структурные изменения поверхности кремния под действием лазерного излучения, //Физика и химия обработки материалов, №1, 50(1992).
13. А.Ф.Банишев, Л.В.Новикова. Образование обратимых и необратимых структурных дефектов на поверхности кремния под действием лазерного импульса, //Физика и химия обработки материалов, №4, 55(1992).
14. A.F.Banishev, L.V.Novikova, M.M.Novikov. Formation of Reversible and Anreversible Structural Defects on Silicon Surface Under Laser Pulse Effect, //Proc. SPIE, vol.1856, 193(1993).
15. A.F.Banishev, E.A.Balykina. Destruction of silicon and copper surface under pulsed and pulse periodic action of Nd:YAG laser, //Proc. SPIE, vol.2993, 149(1997).
16. А.Ф.Банишев, Е.А.Балыкина. Разрушение поверхности кремния и меди при импульсном и импульсно-периодическом воздействии Nd:YAG-лазера, //Квантовая электроника, т.24, №6, 557(1997).
17. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Особенности деформации поверхности кремния облучаемой импульсами YAG:Nd лазера связанные с

генерацией дефектов в поверхностном слое. //Международная конференция по росту и физике кристаллов, Москва, Россия, **Тезисы докладов, 17-19 ноября, 1998г, с.247**

18. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Разрушение поверхности кремния в твердой фазе при воздействии импульсов Nd:YAG лазера, //Квантовая электроника, т.25, №10, **941(1998)**

19. A.F.Banishev, V.S.Golubev, A.Yu.Kremnev. Emission of particles by solid-phase laser-induced destruction of silicon surface, //Proc. SPIE, vol.3734, **271(1999).**

20. A. F. Banishev, V.S.Golubev, A. Yu. Kremnev. Abnormal increase of time of oxygen diffusion with oxidation of silicon surface under action of powerful laser pulses, //Advanced High-Power Laser and Applications AHPLA '99, Osaka, Japan, **Technical Digest, 1-5 November, 1999, p.144**

21. A.F. Banishev, V.S. Golubev, A.Yu. Kremnev. Variation of deformation response of silicon surface due to surface layer saturation with defects under pulsed and pulse-periodic laser radiation, //Proc. SPIE, vol.3688, **387(1999).**

22. A.F. Banishev, V.S. Golubev, A.Yu. Kremnev. Abnormal increase of time of oxygen diffusion with oxidation of silicon surface under action of powerful laser pulses, //Proc. SPIE, vol.3888, **339(2000).**

23. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Влияние дефектообогащенного поверхностного слоя на динамику деформации поверхности кремния при воздействии импульсного и импульсно-периодического лазерного излучения. //Известия РАН, сер.физ., т.63, №10, **1964(1999).**

24. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Накопление дислокаций в поверхностном слое монокристаллического Si(100) при импульсно-периодическом лазерном облучении, //IX Национальная конференция по росту кристаллов, Москва, ИК РАН, **Тезисы докладов, 16-20 октября, 2000г, с.408.**

25. A.F.Banishev, V.S.Golubev, A.Yu.Kremnev. Influence of oxidation on process of particle emission from silicon surface at solid-phase laser destruction, //ICONO-2001, XVII-International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk, Belarus, **Technical Digest, 26 June-1 July, 2001, p.60,**

26. A.F.Banishev, V.S.Golubev, A.Yu.Kremnev. Investigation of regimes of structural defect accumulation and relaxation on silicon surface under periodic-pulse laser radiation, Russian-German laser simposium, //Proc. SPIE, vol. 4429, 89(2001).
27. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Аномальная диффузия газов на облучаемой короткими лазерными импульсами поверхности кремния, //Труды межвузовской школы “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике и медицине”, 13-14 ноября, МГУ, Москва, с.101-105, 2001г.
28. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев, Твердофазное лазерное разрушение поверхности кремния в атмосфере различных газов, //International Symposium Laser technologies and lasers “ LTL’2001”, Plovdiv-Smolyan, Bulgaria, Technical Degest, September 23-26, 2001, p.25.
29. A.F.Banishev, V.S.Golubev, A.Yu.Kremnev. Paculiarities of solid-phase silicon surface destruction with laser in air and in vacuum, //Proc. SPIE, vol. 4644, 162(2001).
30. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Иницируемая воздействием лазера аномальная диффузия кислорода в обогащенном дефектами поверхностном слое кремния, //Письма в ЖТФ, т.26, вып.2, 8(2000).
31. А.Ф. Банишев, В.С.Голубев, А.Ю.Кремнев. Генерация и накопление дислокаций на поверхности кремния при воздействии импульсно-периодического излучения Nd:YAG-лазера, //ЖТФ, т.71, №8, 33(2001).
32. Банишев А.Ф., Чистяков И.М. Динамика развития микрорельефа на поверхности кремния под действием мощного лазерного импульса, //Квантовая электроника, т.19, №5, 449(1992).
33. A.F.Banishev, I.M.Chistykov. Dynamics of the development of microrelief structure on silicon surface under action of YAG:Nd-laser pulses, //Proc. SPIE, vol.1856, 213(1993).
34. A.F.Banishev, V.S.Golubev, M.M.Novikov, O.D. Khramova. Oscillatory regime of metallic plate breakdown under laser beam, //Proc. SPIE, vol.2257, 14(1993)

35. A.F.Banishev, V.S.Golubev, O.D.Khramova. Study of the Keyhole Formation Dynamics under the High-Power Laser Pulse Action upon Metals, // **Laser Physics**, vol.3, No.6, 1198(1993).
36. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, М.М.Новиков, О.Д.Храмова. Колебательный режим пробивки металлов импульсом лазерного излучения, // **Изв. АН СССР, сер.физ.**, т.57, №12, 99(1993).
37. A.F.Banishev, V.S.Golubev, A.M.Zabelin. The International Symposium on High Power Lasers and Laser Applications, // **Proc. SPIE**, vol.2207, 248(1994).
38. A.F.Banishev, V.S.Golubev, V.D.Dubrov. Influence of external pressure and gas type on mechanism and velocity of metal punching with Nd:YAG-laser pulses, // **Proc. SPIE**, vol.3093, 318(1996).
39. А.Ф.Банишев, В.С.Голубев, В.Д.Дубров. Влияние внешнего давления и типа газа на механизм и скорость пробивки металлов импульсами YAG:Nd-лазера, // **Квантовая электроника**, т.23, №11, 1029(1996).
40. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. Mechanoluminescence of metal surface initiated by Nd:YAG laser pulses, // **Proc. SPIE**, vol.3734, 275(1999).
41. A.F. Banishev, V.Ya. Panchenko, A.V. Shishkov. ICONO-98, XVI-International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Mechanoluminescence of metal surface initiated by Nd:YAG laser pulses, //Symposium: Fundamental Aspects of Laser-Matter Interaction. Moscow, Russia, **Technical Digest, 29 June-3 July, 1998**, p.54.
42. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. Peculiarities of metal surface glow under YAG:Nd laser pulses, // **Proc. SPIE**, vol.3688, 382(1999).
43. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков. Нетепловое свечение поверхности металлов инициируемое термомодеформациями при воздействии лазерных импульсов, // **ФТТ**, т.41, вып.9, 1538(1999).
44. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В Шишков. Нетепловое свечение поверхности W, возникающее при импульсном лазерном воздействии, // **Известия РАН, сер.физ.**, Т.63, №10, 2013(1999).

45. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков. Исследование деформационно-стимулированного, нетеплового свечения тонких металлических пластин и пленок, //Известия РАН, сер.физ., т.66, №7, 976(2002).
46. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. Triboluminescence of tungsten initiated by termodeformations under laser action, Russian-German laser simposium, //Proc. SPIE, vol. 4429, 139(2001).
47. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. Особенности механолюминесценции тонких металлических пластин и пленок возбуждаемой воздействием лазерных импульсов, //Труды межвузовской школы “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике и медицине”, 13-14 ноября, МГУ, Москва, с.96-100, 2001г.
48. A. F. Banishev, V.Ya. Panchenko, A. V. Shishkov. Deformation stimulated emission of light from thin metal film surface, //Proc. SPIE, vol. 4644, 182(2001)
49. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. Investigation of the Mechanoluminescence Spectrum of Tungsten Excited with Laser Pulses, //Laser Physics, №8, vol.11, 926(2001).
50. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков. Люминесценция тонких пластин и пленок молибдена возбуждаемая импульсными термодетформациями, //X-Национальная конференция по росту кристаллов, Москва, ИК РАН, Тезисы докладов, 24-29 ноября, 2002г, с.612
51. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. Нетепловое свечение тонких пластин и пленок молибдена, возбуждаемое воздействием лазерных, //Труды III межвузовской школы “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике и медицине”, 18-19 ноября, МГУ, Москва, с.96-100, 2002г.
52. А.А. Банишев, А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. Механолюминесценции мелкозернистых металлических пленок возбуждаемой длинными и короткими лазерными импульсами, // Труды IV- межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки

энергии в космической технике, электронике и медицине”, 17-18 ноября, МГУ, Москва, с.28-32, 2003г.

53. A.F.Banishev. “Laser-induced processes of structural defects generation and interaction in semiconductors and metals”, ILLA-2003, VIII-Internation Conference Laser and laser-information technologies: Fundamental Problems and applications, Plovdiv-Smolyan, Bulgaria, **Technical Digest, September 27-October 1, 2003, p.15**

54. A.F.Banishev, V.Ya.Panchenko, A.V.Shishkov. Laser-induced radiative rising of defects on surface and metal surface destruction. // **Applied Surface Science, vol.153, №2-3, 166(2000).**

55. А.Ф.Банишев, В.Я.Панченко, А.В.Шишков. Исследование спектра нетеплового свечения поверхности вольфрама в результате импульсной пластической термодформации, // **Поверхность, №6, 48(2002).**

56. А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков. Нетепловое свечение тонких металлических пластин и пленок возбуждаемое воздействием лазерных импульсов, // **ЖТФ, т.73, №5, 90(2003).**

Всего по теме диссертации опубликовано **более 95 работ.**