

На правах рукописи

Рогачева Александра Васильевна

**ДЕФЕКТНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ПЕРЕБРОСА И  
СОЛИТОНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМ  
ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2004

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Емельянов Владимир Ильич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Акципетров Олег Андреевич;

кандидат физико-математических наук  
Семиногов Владимир Николаевич.

Ведущая организация: Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики.

Защита состоится "09" декабря 2004 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, КНО, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан "27" октября 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.31,  
доцент

Т.М. Ильинова

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

При воздействии внешних потоков энергии (лазерного излучения или пучков частиц) на поверхность твердых тел в них происходят структурные и морфологические перестройки. Изучение этих структурных трансформаций и результирующей модификации свойств твердых тел является одной из актуальных задач современной физики. Исследования в этой области стимулируются развитием микроэлектроники, а также потребностями промышленности в материалах с новыми, заранее заданными свойствами. Помимо этого результаты этих исследований важны для прикладных проблем лучевой стойкости материалов и деградации оптоэлектронных приборов в процессе их эксплуатации и под действием лазерного излучения. При разработке методов направленной модификации материалов особый интерес представляет детальное изучение процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом и свойств поверхности материалов, модифицированных этим взаимодействием.

Лазерно-индуцированная модификация приповерхностных слоев может происходить на различных масштабах. Модификация на микроуровне, происходящая на масштабах межатомных расстояний ( $10^{-8} - 10^{-7}$  см), обусловлена генерацией точечных дефектов (междоузлий и вакансий) и не приводит к структурным перестройкам. Структурные перестройки на мезоуровне (на масштабах порядка нескольких или десятков нанометров) происходят благодаря самоорганизации точечных дефектов с образованием локализованных и периодических структур с размерами  $10^{-7} - 10^{-6}$  см. К структурным перестройкам на мезоскопическом уровне относятся лазерно-индуцированная аморфизация полупроводников и образование в них протяженных дефектов, образование нанометровых периодических решеток протяженных дефектов в диэлектрических оптических материалах и металлах при их облучении нейтронными пучками, образование нанометровых уединенных и периодических слоевых и стержневых скоплений междоузлий при облучении кремния электронными пучками. Наконец, модификация на макроуровне представляет собой возникновение структур дефектов и рельефа поверхности на масштабах порядка длины волны или радиуса лазерного пучка. Примером такой модификации является образование крупномасштабных периодических структур дефектов (с периодом  $\sim 1$  мкм) в приповерхностном слое облучаемого полупроводника.

Микромодификация (генерация точечных дефектов) может происходить как в одноимпульсном, так и в многоимпульсном режимах. В

одноимпульсном режиме процесс модификации идет через расплав с захватом большого числа дефектов, при этом в данном режиме интенсивность лазерного излучения больше интенсивности плавления. В многоимпульсном режиме, когда интенсивность лазерного излучения меньше интенсивности плавления, генерация точечных дефектов идет либо через каскад дефектных реакций, либо носит термофлуктуационный характер. При этом с ростом числа импульсов происходит постепенное накопление дефектов, концентрация которых может достигать очень больших значений порядка  $10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$  (до 10% от числа атомов в кристалле), что приводит к появлению коллективных эффектов в системе взаимодействующих дефектов.

Примером таких эффектов является образование крупномасштабных (с периодом  $\sim 1 \text{ мкм}$ ) периодических структур дефектов в приповерхностном слое облучаемого полупроводника. Для объяснения образования крупномасштабных структур дефектов, а также самоорганизации дефектов на мезоскопическом уровне была предложена модель дефектно-деформационной (ДД) неустойчивости (см. обзоры [I]). Характерный масштаб этих периодических поверхностных ДД структур пропорционален толщине дефектно обогатенного слоя, которая составляет обычно величины порядка  $10^{-4} - 10^{-5} \text{ см}$ .

Был предложен и развит также ДД-механизм образования мелкомасштабных (нанометровых) периодических и локализованных ДД-структур и было показано, что период структуры пропорционален характеристической длине взаимодействия дефектов с атомами кристалла  $l_d$  [I]. Этот механизм был использован для объяснения целого ряда практически важных эффектов, таких как лазерно-индуцированные аморфизация полупроводников и образование в них протяженных дефектов, образование нанометровых периодических решеток протяженных дефектов в диэлектрических оптических материалах и металлах при облучении их энергетическими пучками и других.

Образование ДД-наноструктур в модели ДД-неустойчивости описывается системой уравнений для дефектов, взаимодействующих через деформацию упругого континуума с учетом нелокальности взаимодействия атомов решетки друг с другом и с дефектами. Стационарные решения этой системы уравнений описывают характеристики стационарных кластерных и периодических ДД-наноструктур.

Рассмотренные до сих пор задачи самоорганизации в ДД системах относятся к классу стационарных. Динамический аспект этих задач, связанный с временной зависимостью ДД переменных, заключается лишь в описании переходной стадии образования стационарных ДД структур (ДД

неустойчивости). Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию нового класса принципиально динамических эффектов самоорганизации в системе дефектов, взаимодействующих через поле упругих деформаций. Их особенностью является наличие временной зависимости ДД переменных на всех стадиях рассматриваемого процесса ДД самоорганизации.

К первому типу таких эффектов относятся волна генерации точечных дефектов (ВГД), возбуждаемая в полупроводниках и прозрачных диэлектриках при интенсивной генерации в них электронно-дырочных пар лазерным излучением, рекомбинационно-стимулированный рост дислокационных петель в поле лазерного излучения и медленная волна рекомбинации неравновесных точечных дефектов в лазерно-возбужденных средах.

Быстрая ВГД представляет собой волну переброса концентрации дефектов, распространяющуюся в кристалле с постоянной скоростью порядка скорости звука без изменения своей формы. Она аналогична волне взрывной кристаллизации, инициируемой в аморфном кристалле лазерным облучением. Роль энергии, запасенной в метастабильном аморфном состоянии, при распространении ВГД играет энергия электрон-дырочных пар, т.е., в конечном счете, энергия лазерного излучения. Распространение ВГД приводит к насыщению области ее прохождения точечными дефектами и может сопровождаться дальнейшими структурными перестройками (например, аморфизацией или образованием дислокационных петель).

Модель ВГД основана на существовании обратной связи в ДД системе: деформационное поле сгенерированных дефектов увеличивает скорость генерации новых дефектов. Идея существования обратной связи в ДД системе была ранее использована авторами работы [II], которые рассмотрели, на основе модели каскада дефектных реакций, абсолютную деформационно-индуцированную неустойчивость генерации дефектов в объеме взаимодействия лазерного излучения с кристаллом и построили количественную модель многоимпульсного лазерного повреждения прозрачных диэлектриков. Пространственное распределение сгенерированных дефектов в этом механизме соответствует распределению интенсивности лазерного излучения в объеме взаимодействия. Критерием многоимпульсного лазерного повреждения, определенным в работе [II], является достижение дефектно-индуцированным напряжением значения, равного порогу механического разрушения кристалла.

В отличие от этого, в механизме ВГД механическое разрушение отсутствует, а повреждение обусловлено насыщением дефектами той области кристалла, через которую проходит ВГД. При этом благодаря упругой

анизотропии кристалла и гауссовскому распределению интенсивности возбуждающего лазерного излучения эта область может приобретать вид «звезды» с иглами, вытянутыми вдоль кристаллографических направлений (в кубических кристаллах - типа [100]). Образование подобных трехмерных звезд оптического повреждения часто наблюдается на эксперименте. Общепринятое объяснение состоит в том, что образование кристаллографически ориентированных областей оптического повреждения является следствием анизотропии предела прочности в кристалле (т.е. следствием анизотропии упругих модулей). Однако, микроскопический механизм, посредством которого кристаллографическая анизотропия упругих характеристик кристалла навязывает свою симметрию области повреждения, выяснен не был. В попытке найти такой механизм и было проведено исследование Главы 2 настоящей работы. Полученный ответ заключается в том, что на первом этапе кристаллографически ориентированного разрушения в результате самоорганизации возникает кристаллографически ориентированная область повышенной концентрации точечных дефектов.

Помимо генерации точечных дефектов лазерное облучение приводит к образованию протяженных дефектов-пор и дислокаций. Обычно для описания лазерно-индуцированного образования дислокаций привлекается механизм их генерации за счет действия сдвиговой деформации, возникающей при пространственно-неоднородном лазерном нагреве среды. В настоящей работе предложен новый механизм спонтанного роста дислокационной петли в полупроводнике при наличии высокой концентрации электрон-дырочных пар, генерируемых лазерным излучением. Рост петли по этому механизму происходит за счет энергии рекомбинации локализованных электрон-дырочных пар, поэтому данный механизм можно, по аналогии с механизмом лазерно-индуцированной генерации точечных дефектов, назвать рекомбинационно-стимулированным. Рекомбинационно-стимулированный рост петель в поле лазерного излучения может приводить, после достижения критического радиуса петель, к необратимым структурным изменениям (оптическому повреждению) полупроводников.

Неравновесные точечные дефекты, сгенерированные по механизму волны генерации дефектов или по какому-либо другому механизму лазерно-индуцированной генерации дефектов, рекомбинируют, и при этом происходит выделение тепла. В настоящей работе показано, что этот процесс может приобретать вид медленных (скорость порядка 1 см/сек) спаренных волн переброса температуры и концентрации дефектов (волна рекомбинации дефектов (ВРД)), зажигающихся и распространяющихся в средах с высокой концентрацией неравновесных (релаксирующих) точечных дефектов. Такая медленная ВРД, также как и быстрая ВГД, описывается уравнениями,

аналогичными нелинейному уравнению диффузии, впервые рассмотренному Колмогоровым с соавторами (аналогичные уравнения используются в теории горения и химических реакций). ВРД, рассмотренная в настоящей работе, сопровождается волной переключения коэффициента отражения, которая может быть зарегистрирована оптическими методами. В настоящей работе модель ВРД рассмотрена в качестве возможного механизма, лежащего в основе эффекта стационарного распространения импульса изменения коэффициента отражения и проводимости со скоростью порядка 1 см/сек, наблюдаемого в твердых телах, облучаемых инфракрасным импульсным лазером.

Ко второму типу динамических эффектов в кооперативной ДД системе относится ДД солитон – движущееся с постоянной скоростью и без изменения формы скопление точечных дефектов, захваченных в самосогласованную деформационную яму. Мелкомасштабный ДД солитон (с размерами порядка  $10^{-6}$  см) был впервые рассмотрен в работе [III].

Представляет интерес дальнейшее развитие теории мелкомасштабных ДД-солитонов, рассмотрение новых моделей ДД солитонов, а также их возможных приложений к задачам взаимодействия излучения с веществом и модификации свойств материалов.

В настоящей работе рассмотрен новый тип нанометровых ДД-солитонов – медленные (скорость меньше 1 см/с) ДД-солитоны в средах с заданным постоянным (или медленно меняющимся) градиентом деформации. Такой ДД-солитон описывается модифицированным уравнением Кортевега де Фриза (КдФ). Скорость его пропорциональна заданному градиенту деформации, а размер определяется дисперсионным параметром  $l_d$  - длиной взаимодействия дефект-атом решетки.

На основе модели медленного ДД солитона в деформационном поле рассмотрена возможность кооперативного гетерирования дефектов. Известно, что в деформационном поле с заданным градиентом деформации точечные дефекты дрейфуют со скоростью, пропорциональной этому градиенту, причем междоузлия дрейфуют по градиенту деформации, а вакансии против градиента (гетерирование точечных дефектов). Рассмотрение, проведенное в настоящей работе, впервые обращает внимание на возможность переноса в поле неоднородной деформации сгустка дефектов с той же скоростью дрейфа, что и скорость дрейфа одного дефекта. Такой сгусток дефектов, благодаря связанному с ним локализованному деформационному полю (самосогласованной деформационной ямой), может легче преодолевать различные стопоры (неподвижные точечные дефекты, дислокации и другие) на своем пути. Поэтому кооперативное (солитонное) гетерирование, возникающее при высокой концентрации дефектов,

рассмотренное в настоящей работе на основе модели ДД-солитона, может быть более эффективным, чем гетерирование, осуществляемое посредством дрейфа индивидуальных точечных дефектов. В настоящей работе показано, что при действии на пластины или пленки внешнего потока энергии (лазерного, электронного или ионного пучка) условия образования и распространения медленного ДД солитона возникают автоматически, и может осуществляться эффективный солитонный перенос междуузлий с облучаемой стороны пластины на ее противоположную сторону.

В связи с этим теоретическим предсказанием отметим, что в последнее время активно исследуется эффект фотомеханического дальнего действия при пучковом облучении тонких пластин, заключающийся в изменении механических свойств (твердости) на стороне пластины, противоположной облучаемой. Авторы эффекта выдвигают гипотезу, что механизмом, ответственным за этот эффект, является генерация волн деформации. Солитонное автогетерирование междуузлий, создаваемых на облучаемой поверхности, на противоположную поверхность пластины, изогнутой закаленными неравновесными вакансиями, может служить альтернативным механизмом эффекта дальнего действия.

Помимо точечных дефектов роль дефектной подсистемы ДД-системы могут играть тепловые фононы. При действии лазерного импульса на сильно поглощающее твердое тело создается нагретый приповерхностный слой. Этот тепловой слой можно рассматривать как состоящий из фононных мод (пакетов) с различными значениями волнового вектора  $q$  и определенным пространственным размером вдоль оси  $z$  (перпендикулярной поверхности), которые можно рассматривать как частный случай дефектов. Благодаря упругому ангармонизму фононные пакеты создают самосогласованную деформацию расширения среды  $\xi$ , которая в свою очередь действует на пакеты. Такое локализованное скопление фононных пакетов, находящихся в самосогласованной деформационной яме может распространяться вдоль оси  $z$  в ангармоническом твердом теле как одномерный деформационно-тепловой (ДТ) солитон с постоянной скоростью, без изменения своей формы.

В настоящей работе впервые рассмотрены ДТ-солитоны двух новых типов: быстрые ДТ-солитоны (скорость пропорциональна скорости звука) и медленные ДТ-солитоны в средах с постоянным градиентом деформации (скорость пропорциональна градиенту деформации).

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью данной диссертации является исследование новых классов динамических эффектов самоорганизации в системе дефектов, взаимодействующих через поле упругих деформаций, построение новых и

дальнейшее развитие известных моделей такой самоорганизации с целью интерпретации существующих экспериментальных данных по модификации твердых тел лазерным излучением в том числе: по модификации поверхности Si последовательностью пико- и наносекундных импульсов и импульсов с длительностью  $10^{-7}$  с, по образованию кристаллографически ориентированных областей лазерного повреждения; с целью объяснения эффекта медленного (1 см/с) стационарного распространения импульса изменения коэффициента отражения и проводимости в твердых телах, облучаемых инфракрасным импульсным лазером, а также эффекта фотомеханического дальнего действия, возникающего при пучковом облучении тонких пластин.

### **Научная новизна**

- В настоящей работе предложены два новых механизма лазерного повреждения твердых тел при низких лазерных интенсивностях (ниже порога механического разрушения), которое обусловлено насыщением области повреждения точечными или протяженными дефектами: модель волны генерации точечных дефектов и модель рекомбинационно-стимулированного зарождения, роста и релаксации спаренных вакансионно-междоузельных дисков (дислокационных петель) в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках.

- На основе системы уравнений, описывающих волну генерации точечных дефектов, при учете анизотропии в ней анизотропии деформации в кубическом кристалле, построена модель фокусировки волны генерации точечных дефектов вдоль кристаллографических направлений при действии на кристаллы лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности.

- Впервые показано, что эндотермический процесс рекомбинации лазерно-индуцированных неравновесных дефектов может приобретать вид медленной волны переключения температуры. Модель медленной волны переключения температуры использована для интерпретации экспериментальных результатов, полученных при изучении эффекта медленного распространения волны (импульса) изменения коэффициента отражения и проводимости в кристаллах и стеклах, возбужденных инфракрасным лазерным излучением.

- Построена новая модель медленного мелкомасштабного дефектно-деформационного солитона в твердых телах с заданным постоянным градиентом деформации, которая использована для качественной интерпретации экспериментальных данных по изучению эффекта фотомеханического дальнего действия в тонких пластинах и пленках.

## **Практическая ценность**

- Построенные модели волны генерации точечных дефектов и роста спаренных междоузельно-вакансионных дисков (петель) в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках представляют собой два новых механизма лазерного повреждения оптических материалов, работающих, в отличие от существующих механизмов (лавинная ионизация, многофотонное поглощение, модель поглощающих включений), при интенсивностях ниже порога механического разрушения материала.
- Медленные (со скоростями порядка см/с) волны переброса температуры и дефектно-деформационные и деформационно-тепловые солитоны представляют практический интерес как новые каналы эффективного, недиффузионного переноса энергии и вещества в неравновесных (лазерно-возбужденных) средах.
- Солитонное автогетерирование лазерно-индуцированных дефектов в металлических пленках объясняет основные экспериментальные данные по эффекту фотомеханического дальнего действия.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При превышении критического значения скорости генерации электрон-дырочных пар в полупроводниках и диэлектриках зажигается и распространяется волна генерации точечных дефектов со скоростью, критически зависящей от интенсивности излучения.
2. Образование кристаллографически ориентированных «звезд» повреждения кристаллических диэлектриков лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности обусловлено фокусировкой волны генерации точечных дефектов вдоль кристаллографических осей.
3. Зависимости критического числа импульсов, приводящих к разрушению поверхности, от интенсивности лазерного излучения и от периода следования импульсов, полученные при изучении лазерного повреждения Si последовательностью лазерных импульсов с длительностью  $\tau_p = 3 \cdot 10^{-7}$  с количественно описываются моделью образования и роста спаренных междоузельно-вакансионных дисков при генерации электрон-дырочных пар лазерным излучением.
4. Процесс рекомбинации неравновесных лазерно-индуцированных дефектов в твердых телах может приобретать характер волны переключения (импульса) концентрации дефектов и температуры среды, распространяющейся со скоростью порядка 1 см/с, совместно с волной переключения (импульсом) изменения оптических свойств материала.

5. В твердых телах с постоянным градиентом деформации распространяются солитоны нового типа: медленные (скорость  $\sim 1$  см/с) дефектно-деформационные солитоны, описываемые модифицированным уравнением Кортевега де Фриза, скорость которых пропорциональна градиенту деформации.

6. При действии лазерного излучения на металлические пленки условия распространения медленного дефектно-деформационного солитона выполняются автоматически и может осуществляться кооперативный перенос дефектов с облучаемой стороны на противоположную поверхность пленки.

### **Апробация работы и публикации**

Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на XVI международной конференции по когерентной и нелинейной оптике – «ICONO'98» (29 июня-3 июля 1998, Москва, Россия); VII международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2000: молодежь и наука на рубеже XXI века» (12-15 апреля 2000, Москва, Россия); I международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика лазеров 2000» (26-30 июня 2000, Санкт-Петербург, Россия); XVII международной конференции по когерентной и нелинейной оптике – «ICONO'01» (26 июня-1 июля 2001, Минск, Белоруссия); VII семинаре «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (МНТ-VII) (16-19 июня 2003, Обнинск, Россия).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 работах, список которых приведен в конце автореферата, из них 8 статей в рецензируемых журналах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка цитированной литературы. Объем диссертации 159 страниц, в том числе 15 иллюстраций. Список литературы содержит 130 названий.

### **Личный вклад**

Все полученные в диссертации результаты получены автором либо лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, интерпретации и обсуждении результатов.

## II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** формулируются цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и кратко рассматривается содержание диссертационной работы по главам.

В **первой главе** построена модель волны генерации точечных дефектов в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках при интенсивной лазерной генерации электрон-дырочных пар [1]. Аналитически определены характеристики ВГД: критическая интенсивность зажигания, форма, скорость распространения и концентрация точечных дефектов, создаваемая ВГД. В Приложении I приведено графическое определение области применимости одномерной модели ВГД для двумерного случая. На основе полученных результатов в разделе 1.5 проведена количественная интерпретация экспериментов по пикосекундному и наносекундному многоимпульсному повреждению поверхности Si. Получено согласие теоретических и экспериментальных результатов.

В Приложении II на основе исходных уравнений для концентрации свободных носителей, по аналогии с ВГД, построена модель зажигания и распространения волны ионизации в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках [2]. Получены характеристики волны: критическая интенсивность зажигания, форма и скорость распространения.

Зажигание ВГД, как для пико, так и для наносекундных импульсов, происходит пороговым образом при превышении лазерной интенсивностью определенного критического значения. При использовании более длинных импульсов ( $10^{-7}$  сек) с меньшими интенсивностями критическая интенсивность зажигания ВГД может быть не достигнута. В этом случае оптическое повреждение может быть обусловлено образованием и ростом дислокационных петель в полупроводнике под действием лазерного излучения. В разделе 1.6 предложена и развита новая модель рекомбинационно-стимулированного зарождения, роста и релаксации спаренных междоузельно-вакансионных дисков (дислокационных петель) в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках [3,4]. Получено выражение для скорости роста дислокационной петли в течение действия лазерного импульса как функции интенсивности лазерного излучения и температуры среды, а также скорость релаксации петли после окончания лазерного импульса. На основе полученных теоретических результатов в разделе 1.7 проведена качественная и количественная интерпретация

экспериментальных результатов по изучению твердофазного разрушения поверхности кремния при воздействии импульсами лазерного излучения длительностью  $10^{-7}$  сек.

Во **второй главе** рассмотрен процесс пространственной самоорганизации ВГД в лазерно-возбужденных кубических диэлектрических и полупроводниковых кристаллах. Показано, что при действии лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности происходит фокусировка ВГД вдоль кристаллографических направлений, происходящая благодаря упругой анизотропии кристалла и приводящая к образованию трехмерных кристаллографически ориентированных «звезд» оптического повреждения. Этот процесс состоит из двух этапов: на первом этапе, благодаря упругой анизотропии кристалла происходит угловая самоорганизация ВГД, в результате которой формируются три независимых плоских ВГД, распространяющихся вдоль ортогональных направлений типа [100]; на втором этапе происходит фокусировка ВГД вдоль этих направлений благодаря неоднородному (гауссовому) распределению интенсивности [5,6]. Фокусировка ВГД рассмотрена для случая сферического гауссова распределения и случая цилиндрического распределения интенсивности лазерного пучка с осью, направленной вдоль оси [100], с гауссовским распределением интенсивности в поперечном сечении. Показано, что фокусировка ВГД в обоих случаях приводит к образованию кристаллографически ориентированных трёхмерных областей повышенной концентрации дефектов («звезд»). На основе полученных результатов проведена качественная интерпретация экспериментальных результатов по повреждению кристаллов KDP и CLBO наносекундными лазерными импульсами.

В **третьей главе** построена модель медленной волны рекомбинации неравновесных лазерно-индуцированных дефектов (ВРД) [7]. Получено уравнение для волны переключения температуры, распространяющейся совместно с ВРД, имеющее вид уравнения нелинейной диффузии, аналогичного уравнению для быстрой ВГД. Определены форма и скорость распространения волны. На основе модели ВРД проведена интерпретация ряда экспериментальных результатов по изучению распространения медленной волны изменения отражения и проводимости в кристаллах и стеклах, возбужденных инфракрасным излучением импульсного лазера [8].

В **четвертой главе** рассмотрены два новых типа солитонов в лазерно-возбужденных средах. К первому типу относится медленный нанометровый

дефектно-деформационный (ДД) солитон в средах с постоянным градиентом деформации [9], скорость которого ( $\leq 1$  см/сек) пропорциональна градиенту деформации. Показано, что при пучковых воздействиях на тонкие твердые пластины и пленки условия распространения ДД-солитонов возникают автоматически. На основе полученных результатов предложен механизм солитонного дальнедействующего автогетерирования точечных дефектов при пучковых воздействиях на тонкие пластины и пленки. Проведена качественная интерпретация экспериментов по наблюдению эффекта фотомеханического дальнедействия в металлических пленках.

Ко второму типу относятся деформационно-тепловые (ДТ) солитоны, возбуждаемые действием лазерного импульса на сильно поглощающие твердые тела и пластины и распространяющиеся с поверхности вглубь среды [10]. Рассмотрены два класса ДТ солитонов: быстрые (со скоростями пропорциональными, но меньшими скорости звука) и медленные ДТ солитоны (со скоростями порядка нескольких см/с). Быстрые солитоны описываются солитонным уравнением Кортевега-де-Фриза (КдФ), а медленные солитоны-обобщенным уравнением КдФ. Получены выражения для формы, размеров и скоростей ДТ солитонов в зависимости от параметров и исходной температуры среды и температуры лазерно-нагретой поверхности.

В Приложении III дан вывод уравнения температуропроводности с учетом деформационно-индуцированного дрейфа фононов, используемое в качестве исходного при построении модели ДТ солитона.

В **Заключении** сформулированы следующие основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Развита модель волны генерации точечных дефектов (ВГД), распространяющейся в лазерно-возбужденных полупроводниках и диэлектриках со скоростью порядка скорости звука. Получены аналитические выражения для скорости и формы волны генерации точечных дефектов, критической интенсивности зажигания и максимальной концентрации дефектов, сгенерированных волной. На основе модели ВГД проведена количественная интерпретация экспериментальных данных по повреждению поверхности Si последовательностью пико- и наносекундных лазерных импульсов.

2. Развита модель рекомбинационно-стимулированного роста и релаксации спаренных междоузельно-вакансионных дисков (петель) в лазерно-возбужденных полупроводниках. Получены выражения для скорости роста дислокационной петли как функции лазерной интенсивности и

температуры и скорости релаксации петли после окончания лазерного импульса. Проведена количественная интерпретация экспериментальных данных по повреждению поверхности Si последовательностью лазерных импульсов длительностью  $10^{-7}$  сек и определены микропараметры модели роста и релаксации спаренных дислокационных петель.

3. Построена модель двухэтапной пространственной самоорганизации волны генерации дефектов, возбуждаемой лазерным излучением с гауссовским распределением интенсивности в кристаллических диэлектриках и полупроводниках с кубической симметрией. На первом этапе происходит угловой коллапс спектра дефектно-деформационных мод вдоль направлений типа [100]. На втором этапе происходит пространственная фокусировка плоских волн генерации точечных дефектов вдоль направлений типа [100] и образование кристаллографически ориентированных звездообразных областей, насыщенных дефектами.

4. Построена модель медленной волны переключения температуры (волны рекомбинации неравновесных дефектов), распространяющейся в твердом теле с неравновесными (релаксирующими) дефектами, индуцированными лазерным импульсом. Получены аналитические выражения и численные оценки для скорости распространения и формы волны переключения температуры. На основе полученных теоретических результатов проведена интерпретация экспериментальной температурной зависимости скорости лазерно-индуцированной волны изменения отражения и проводимости для Ge.

5. Развита модель медленного ( $V \ll V_{\text{звука}}$ ) нанометрового дефектно-деформационного солитона, распространяющегося в твердых телах с постоянным градиентом деформации. Получены выражения скорости солитона и концентрации дефектов и деформации, описывающие солитон. Показано, что при пучковых воздействиях на тонкие твердые пластины и пленки условия распространения дефектно-деформационного солитона возникают автоматически. Проведены численные оценки для скорости и размера ДД-солитона.

6. На основе полученных результатов предложен механизм солитонного гетерирования точечных дефектов, объясняющий эффект фотомеханического дальнего действия, наблюдаемый при пучковых (лазерных) воздействиях на металлические и полупроводниковые пленки.

7. Развита модель медленного ( $V \ll V_{\text{звука}}$ ) деформационно-теплового солитона, распространяющегося в твердых телах с постоянным градиентом деформации.

### Цитируемая литература

- I. Емельянов В.И. // Квантовая электроника, т.28, № 1, с.2 (1999);  
// Laser Physics, v.2, №4, p.389 (1992).
- II. Jones S.C., Braunlich P., Casper R.T., Shen X.A. // Opt. Eng., v.28, p.1039 (1989).
- III. V.I. Emel'yanov // Physics of Vibrations, v.7, № 1, p.11 (1999).

### Публикации по теме диссертации

1. В.И. Емельянов, А.В. Рогачева, *Зажигание и распространение уединенной волны образования точечных дефектов при интенсивной лазерной генерации электрон-дырочных пар в полупроводниках и диэлектриках* // Квантовая Электроника, т.25, № 11, сс.1017-1022 (1998).
2. V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *Solitary wave of point defect formation and wave of impact ionization propagated under intensive generation of electron-hole pairs in semiconductors and dielectrics* // Proc. SPIE, v.3734, pp.111-121 (1999).
3. В.И. Емельянов, А.В. Рогачева, *Рекомбинационно-стимулированный рост дислокационной петли в полупроводнике при интенсивной лазерной накачке электрон-дырочных пар* // Письма в ЖТФ, т.28, вып.11, сс.91-95 (2002).
4. V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *Recombination-stimulated growth and relaxation of dislocation loops as a mechanism of multi-pulse damage of semiconductors* // Laser Physics Letters, v.1, № 7, pp.362-367 (2004).
5. В.И. Емельянов, А.В. Рогачева, *Фокусировка волны образования точечных дефектов вдоль кристаллографических направлений при действии на кристаллы лазерного гауссовского пучка* // Вестник Московского университета, Серия 3, Физика. Астрономия, №5, сс.55-60 (2001).
6. В.И. Емельянов, А.В. Рогачева, *Пространственная самоорганизация волны генерации дефектов и образование упорядоченных, кристаллографически ориентированных областей оптического повреждения при действии на кристаллы лазерного гауссовского излучения* // Квантовая электроника, т.34, №6, сс.531-536 (2004).
7. V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *The slow temperature switching wave in solids with nonequilibrium laser-generated defects* // Physics Letters A, v.264, pp.478-481 (2000).
8. E.M. Kudriavtsev, E.N. Lotkova, S.D. Zotov, M. Autric, V.I. Emel'yanov and A.V. Rogacheva, *Temperature dependence of the velocity of a slow*

- soliton wave of change in optical reflection and conductivity excited by a laser pulse in solids // Laser Physics, v. 10, №3, pp.733-740 (2000).*
9. В.И. Емельянов, А.В. Рогачева, *Лазерно-возбужденные медленные дефектно-деформационные солитоны в твердых телах с постоянным градиентом деформации // Изв. РАН, Сер. физ., т.66, № 8, сс.1074-1077 (2002).*
  - 10.10.V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *Laser-excited fast and slow deformation-thermal solitons in solids // Proc. SPIE, v.4748, pp.283-292 (2002).*
  - 11.V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *Fast waves of point defect formation and amorphization in laser-excited semiconductors and dielectrics // Technical Digest of XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 1998), p. 147, Moscow, June (1998).*
  - 12.V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *The focusing of the laser-induced wave of point defect generation along crystallographic axes in laser-excited semiconductors and dielectrics // Technical Digest of I International Conference on Laser Optics for Young Scientists (LO-YS 2000), p. 66, St. Petersburg, June (2000).*
  - 13.V.I. Emel'yanov, A.V. Rogacheva, *Slow laser-induced deformation-thermal and defect-deformational solitons in thin solid films // Technical Digest of XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2001), p. 99, Minsk, June (2001).*