

На правах рукописи

**СТРИГИН Михаил Борисович**

**СВЕТОДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА, ВОЗБУЖДАЕМАЯ  
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПРОЗРАЧНОМ  
ДИЭЛЕКТРИКЕ.**

Специальность 01.04.03 - "Радиофизика"

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико - математических наук.

Челябинск - 1996

Работа выполнена в вузовско - академическом отделе нелинейной оптики Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук и Челябинского государственного технического университета.

Научные руководители : член - корреспондент РАН

Б.Я. Зельдович ;

кандидат физико - математических наук

А.Н.Чудинов ;

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук

А.В.Сухов ;

доктор физико-математических наук

С.М. Шандаров ;

Ведущая организация - Институт оптики атмосферы Сибирского отделения РАН.

Защита состоится "\_\_\_"\_\_\_\_\_ 1996 года , в \_\_\_ часов , на заседании диссертационного совета К 063.53.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук при Томском государственном университете (634010, г. Томск -10, пр. Ленина, 36) .

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разслан "\_\_\_"\_\_\_\_\_ 1996 г.

Ученый секретарь специализированного

совета

кандидат физико - математических наук

Г.М.Дейкова

*Дейкова*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблемы взаимодействия лазерного излучения с веществом широко изучаются. Использование стекол для изготовления оптических элементов обусловило необходимость исследования физических процессов, происходящих при оптическом пробое прозрачных диэлектриков. Механизмы разрушения прозрачных диэлектриков могут различаться в зависимости от характера лазерного излучения, качества обработки поверхности образца, степени загрязненности объема, процентного содержания примесей в диэлектрике. В литературе рассматриваются различные механизмы инициирования оптического пробоя, среди которых ВРМБ, эффекты, связанные с самофокусировкой, эффекты, связанные с поглощением в примесях.

Проведенное исследование оптического пробоя в различных диапазонах изменения частоты следования лазерных импульсов позволило получить дополнительные сведения о механизмах несобственного многоимпульсного пробоя. Экспериментально получены цепочки микроразрушений, идущих от задней к передней грани образца. Предположительно, волна пробоя, образующая микроразрушение, распространяется в режиме "световой детонации". Построена модель зарождения, развития и затухания такой волны. Исследование морфологии микротрещин, имеющих характерную форму воронок, подтвердили соответствие экспериментальной и теоретической модели.

На основе этих исследований предложен новый способ обработки прозрачных диэлектриков, выявлены параметры, определяющие качество обработки, что имеет также практическое значение данного исследования.

Отдельные практические результаты данного исследования использованы (апробированы) в Германии, в Labor für Lasertechnik der FH Münster, и описаны в работе [1].

**Целью** данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование светодетонационной волны, возбуждаемой пикосекундными лазерными импульсами в прозрачных диэлектриках.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Экспериментально обнаружена нелинейная зависимость скорости роста канала микротрещин в зависимости от частоты следования лазерных импульсов.

2. Предложена теоретическая модель зависимости скорости роста канала от частоты следования лазерных импульсов.

3. Предложена теоретическая модель образования микротрещины на основании зарождения, развития и распада светодетонационной волны, генерируемой лазерным импульсом.

4. Экспериментально исследована морфология микротрещин и предложена теоретическая модель зависимости наблюдаемой геометрической формы от параметров лазерного импульса и условий распада светодетонационной волны.

**Практическая ценность работы:**

1. Предложен новый метод резки прозрачных диэлектриков с существенным уменьшением на два - три порядка энергетических затрат, на порядок уменьшены материальные затраты на создание технологической установки по сравнению с  $\text{CO}_2$  - лазером. Показана возможность оптимизации технологии резки с качеством, не уступающим по результатам, достигнутым при резке другими способами.

2. В работе [1] на основе наших методов предложен новый способ маркировки стекол внутри объема. При записи таким образом какое-либо стирание надписи исключено.

**Положения**, выносимые на защиту:

1. Нелинейная зависимость скорости роста канала микро-трещин от частоты следования лазерных импульсов вследствие рассеяния и поглощения лазерного излучения на точечных дефектах, изначально присутствующих в диэлектрике, а также индуцированных лазерным импульсом.

2. Механизм образования микротрещин в прозрачном диэлектрике при распаде светодетонационной волны.

3. Обусловленность структуры микротрещины распадом светодетонационной волны.

**Апробация работы**:

Материалы диссертации опубликованы в 11 работах и докладывались на конференции OSA Annual Meeting в 1993 г. в Канаде, на шестом межреспубликанском заочном научно-техническом семинаре "Применение лазеров в науке и технике" в 1994 г. в Иркутске, на международных конференциях "Оптика лазеров" в 1993 и 1995 гг. в Санкт-Петербурге, на семинарах в Челябинском Государственном Техническом университете.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обосновывается актуальность темы работы, формулируется ее цель, научная новизна и практическая ценность, перечисляются защищаемые положения, приводится аннотация содержания диссертации по главам.

**В первой главе, в первом параграфе** приведен литературный обзор по работам, посвященным оптическому пробое.

Рассмотрены материалы, посвященные различным механизмам взаимодействия лазерного излучения с диэлектриком, приводящим к пробое. Приведены следующие механизмы:

- 1) взаимодействие лазерного излучения с диэлектриком на его границе;
- 2) генерация оптических или акустических фононов в результате вынужденного комбинационного рассеяния;
- 3) генерация акустических фононов на частоте равной разности частот двух типов колебаний лазера;
- 4) эффекты, связанные с самофокусировкой лазерного излучения;
- 5) нагрев диэлектрика при поглощении лазерного излучения точечными дефектами, изначально присутствующими и индуцированными предыдущими импульсами.

Основная часть обзора посвящена пятому пункту, так как в проводимом исследовании изучается несобственный оптический пробой, связанный с разогревом поглощающих дефектов.

Рассмотрены работы, посвященные термохимическому механизму тепловой неустойчивости. Пробой, реализующийся в этом случае, протекает в равновесном теплопроводном режиме, аналогом которому является режим "медленного горения". Температура, которая достигается в этом случае, равна температуре кипения  $\approx 2500^\circ \text{K}$ . Режим "медленного горения" возникает при невысоких плотностях светового потока  $< 10^7 \text{ Вт/см}^2$  и при длительностях импульса  $\approx 10^{-3} \text{ с}$ . При этих условиях невозможно поджечь заряд в объеме слабопоглощающих сред или так называемую светодетонационную волну, аналогом которой является режим детонации в теории горения. Основное отличие режимов, по теории горения, - потребление волной пробоя не внутренней

химической энергии, а световой, поэтому скорость волны детонации является функцией интенсивности.

Рассмотрены работы, посвященные фотоионизационным, термоионизационным механизмам пробоя, а также механизмам многоимпульсного накопления точечных дефектов, которые, как мы считаем, приводят к движению искры пробоя в режиме детонации.

Сделан обзор работ Ю.П.Райзера, где описан режим световой детонации в газах. В проводимом исследовании была выявлена применимость описанных режимов для прозрачных диэлектриков.

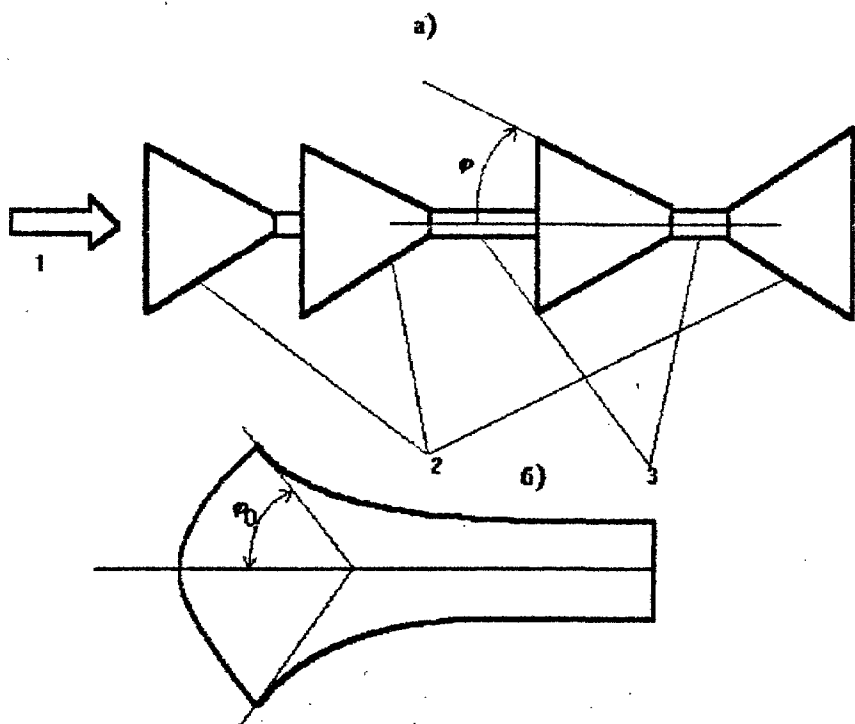
Рассмотрены работы, посвященные морфологии микротрещин, образуемых при пробое.

Во втором параграфе первой главы описана экспериментальная установка, которая была создана для исследования роста канала микротрещин. Для пассивной синхронизации мод была изготовлена кювета с задним 100% зеркалом, через которую прокачивался раствор красителя 3274У, благодаря чему достигнута длительность отдельного пика в шуте порядка 100 пс, с энергией порядка  $10^{-3}$  Дж.

Описаны методики экспериментов по измерению зависимости скорости роста канала микротрещин от частоты следования лазерных импульсов. Установка позволяла перемещать образец в трех измерениях, что обеспечивало возможность фигурной резки образцов диэлектрика.

Для проведения морфологических исследований применялся микроскоп марки МБС - 10, с разрешением до 7 мкм. Более мелкие детали морфологии изучены и сфотографированы при помощи электронного микроскопа.

В третьем параграфе второй главы описаны экспериментальные параметры формирования лазерного излучения при



**Рис.7.** Схематическое изображение роста канала микротрещины [а] и развития светодетонационной волны [б]



исследовании роста канала микротрещин (рис.1). Микротрещина образуется при световом пробое последующим лазерным импульсом в серии. Излучение фокусировалось таким образом, чтобы длина фокусной перетяжки равнялась ширине плоско-параллельного образца стекла  $K = 8$ . Определены причины инициирования канала на задней грани, основная из которых - интерференция падающего и отраженного излучения, понижающая порог пробоя до четырех раз. Определены экспериментальные погрешности при исследовании зависимости скорости роста канала микротрещин от частоты следования лазерных импульсов (рис.2). Выявлены три диапазона частоты следования лазерных импульсов:

1) 1 - 10 Гц - диапазон, в котором пробой диэлектрика вызывают только изначально присутствующие примеси;

2) 10 - 20 Гц - диапазон, в котором начинают существенно скапливаться точечные дефекты, генерируемые предыдущими импульсами, что ведет к накоплению и дополнительному поглощению, а следовательно, к уменьшению скорости движения волны генерации;

3) 25 -  $\infty$  Гц - диапазон, в котором велика роль самофокусировки, вызванной изменением показателя преломления вследствие накопления от импульса к импульсу точечных дефектов:

$$\Delta n = \frac{dn}{d\rho} \cdot \Delta\rho,$$

где  $n$  - показатель преломления,  $\rho$  - плотность точечных дефектов. Вследствие того, что  $\rho$  повторяет профиль интенсивности излучения, в диэлектрике наводится линза, приводящая к самофокусировке.

В четвертом параграфе второй главы предлагается теоретическая модель роста канала микротрещин на основании зарождения, развития и распада светодетонационной волны. Рассчитана локальная скорость движения  $V = (I/\delta)^{1/3}$ , где  $I$  - ин-

СКОРОСТЬ, мм/с.

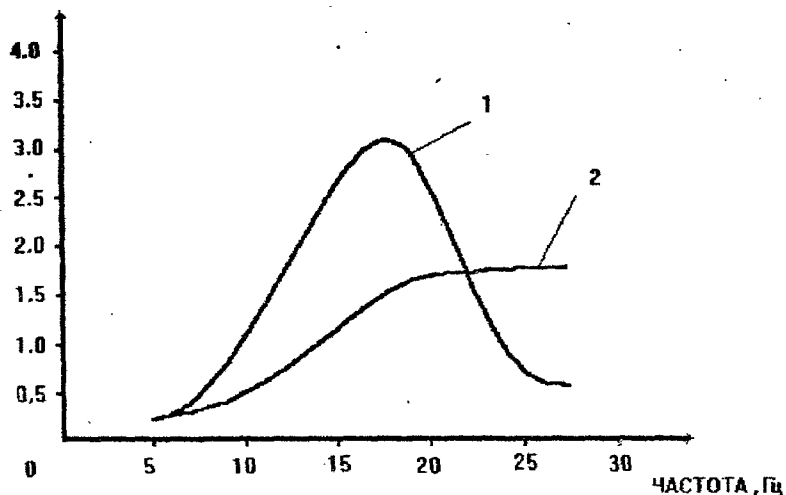


рис.2. Экспериментальная зависимость средней скорости роста канала микротрещины от частоты следования лазерных импульсов;

1 - фокусная перетяжка внутри образца;

2 - фокусная перетяжка на задней грани

тенсивность светового излучения в месте взаимодействия с фронтом канала микротрещин,  $\delta$  – плотность диэлектрика.

Сделана оценка средней скорости роста канала  $\approx 1$  мм/с, которая достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Также оценена температура плазмы в светодетонационной волне – порядка 20 000°K. Из формулы Унзольда - Крамерса, учитывающей промежуточные переходы, рассчитан критерий развития светодетонационной волны. Из теории горения известно, что для реализации режима детонации параметр  $\omega \approx l/R$ , где  $l$  – длина фронта светодетонационной волны,  $R$  – его ширина, должен быть меньше единицы. Показано, что в нашем случае  $\omega \approx 10^{-2}$ . Причина отсутствия режима детонации при частоте следования лазерных импульсов  $< 3$  Гц в том, что длительность светового пика меньше характерного времени релаксации, которое уменьшается при увеличении частоты следования лазерных импульсов.

Рассматривается математическая модель роста канала микротрещин, используемая для компьютерного моделирования. Интенсивность падающего излучения на фронт канала  $I(t) = I_0 e^{-\alpha z(t)}$ , где  $z(t)$  – координата фронта канала, отсчитываемая от передней грани образца,  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \rho$ , где  $\alpha_0$  – поглощение за счет изначально присутствующих дефектов,  $\alpha_1 \rho$  – поглощение за счет индуцированных дефектов. В результате расчета получено:

$$\rho \approx A / (1 - \exp(-l/v\tau)) - A/\rho_0,$$

где  $A$  – плотность индуцированных дефектов одиночным отдельно стоящим лазерным импульсом,  $v$  – частота следования лазерных импульсов,  $\tau$  – время релаксации,  $\rho_0$  – плотность точечных дефектов, при которой начинает сказываться самовоздействие.

В качестве модели релаксации плотности точечных дефектов принята термодинамическая модель. Для генерации точечных

СКОРОСТЬ, мм/с.

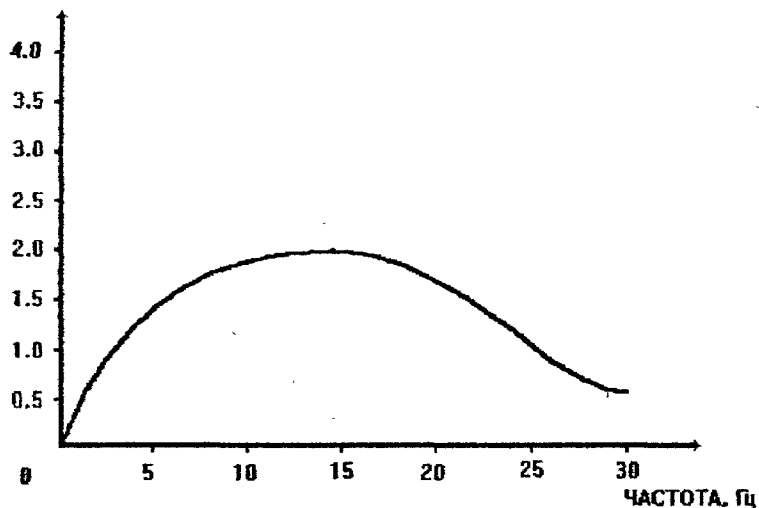


рис.3. Теоретическая зависимость средней скорости роста канала микротрещины от частоты следования лазерных импульсов

дефектов - аррениусовская модель самовоздействия  $\Delta \sim A \exp(P/p_0)$ , где  $\Delta$  - разность между плотностями точечных дефектов до и после импульса. Определена граничная частота следования лазерных импульсов, по превышении которой режим генерации точечных дефектов с насыщением переходит во взрывной режим  $\nu = 1/\tau \ln(p_0/(p_0 - A)) \approx 25$  Гц. Данный факт хорошо подтверждается экспериментально. При  $\nu > 20$  Гц канал микротрещин не успевал дорасти до передней грани, пробой происходил в каком-либо месте между передней гранью и фронтом канала микротрещин. Далее канал начинал расти с места пробоя, выходя на переднюю грань образца, либо прерываясь очередным пробоем. Место и время пробоя определяются случайными флуктуациями интенсивности излучения (амплитуда  $A$  генерации дефектов сильно зависит от интенсивности света  $A \sim 1/(I - I_1)^2$ , где  $I_1$  - интенсивность излучения, приводящая к пробоем в объеме образца) и формой микротрещины, образованной предыдущим импульсом.

С учетом всего вышесказанного, интегрируя выражение  $V=(I/I_1)^{1/3}$  от задней до передней грани стеклянного образца шириной 8 мм, получено достаточно хорошее качественное согласие между экспериментальными и теоретическими выводами (рис.2 и 3). В данной модели световое излучение рассматривалось в виде глаской бесконечной волны. Для более полного описания необходимо учитывать зависимость как от продольной, так и от поперечной координаты и эффекты самофокусировки.

**В пятом параграфе третьей главы** рассматривается морфология микротрещин, механизмы, определяющие ориентацию микротрещин. Микротрещины, образующиеся в результате пробоя, преимущественно растут под углом полного внутреннего отражения, т.е. под данным углом максимален энерговод световой энергии на

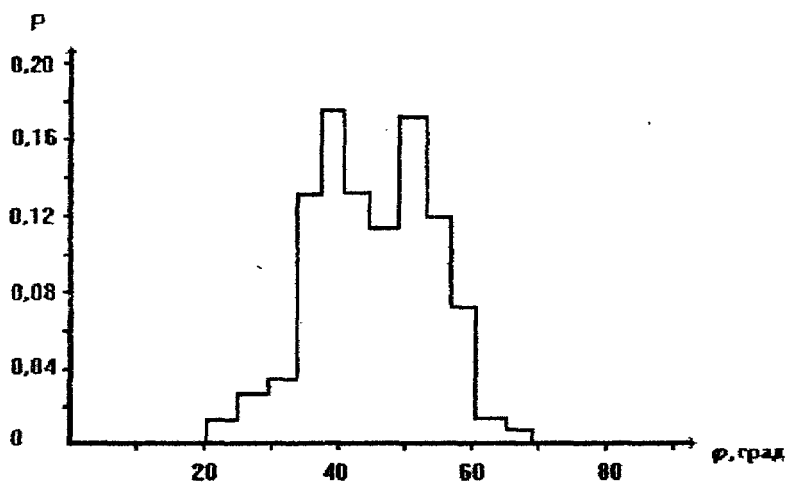


рис.4. Гистограмма количества микротрещин с данным половинным углом при основании конуса.

единицу площади растущей трещины. Грубо его можно определить произведением двух факторов: коэффициента прохождения через границу "диэлектрик - плазма" трещины и доли поглощенной энергии. Максимум этого произведения лежит вблизи угла полного внутреннего отражения. На рис. 4 представлена гистограмма половинного угла основания конуса микротрещин. Для ее построения было исследовано приблизительно 200 микротрещин. Отчетливо виден второй максимум, который соответствует углу на  $10^\circ$  меньше угла полного внутреннего отражения. Предположительно этот угол равен углу дифракции светодетонационной волны на последней стадии перед ее распадом. Причина дифракции следующая: скорости различных участков фронта светодетонационной волны различны вследствие гауссовости луча по поперечной координате и нелинейной зависимости скорости волны от интенсивности излучения. Поэтому с течением времени фронт принимает грушевидную форму с углом раствора, соответствующим второму обнаруженному максимуму. Нами наблюдались воронкообразные микротрещины, стороны которых по мере удаления от центра канала изгибались, приближаясь к асимптоте угла полного внутреннего отражения. Мы полагаем, эти микротрещины создавались несколькими лазерными импульсами, когда время формирования светодетонационной волны превышает время длительности лазерного пика. В этом случае пробой приводит лишь к увеличению предыдущей воронки. Из гистограммы можно определить, что количество трещин, образованных за один лазерный импульс, и количество трещин, образованных несколькими лазерными импульсами, приблизительно одинаково. Знание этого соотношения необходимо для уточнения результатов по измерению скорости роста канала микротрещин. В модели, описанной выше,

мы принимали, что светодетонационная волна инициируется каждым лазерным импульсом, а, соответственно, каждый импульс образует новую микротрещину.

Описаны эксперименты по определению эллиптичности воронок микротрещин. Эллиптичность должна наблюдаться при различных коэффициентах энерговода для различной поляризации. Поскольку эта разница лежит в пределах ошибки эксперимента, эллипсоидальность обнаружить не удалось.

В шестом параграфе третьей главы рассмотрен новый способ резки прозрачных диэлектриков. Описаны эксперименты по исследованию структуры канала для определения возможности резки предложенным методом.

Его основные преимущества по сравнению с методом, использующим  $\text{CO}_2$ -лазер:

- 1) небольшие габариты установки, простота в управлении;
- 2) энергетические затраты снижаются на два-три порядка;
- 3) стоимость промышленной установки снижена на порядок.

При исследовании морфологии канала определена зависимость его параметров от интенсивности лазерного излучения. Из теоретического рассмотрения зависимость длины канала должна быть:  $V \cdot \tau \sim I^{1/3} \cdot \tau \sim \tau / (1 + z/z_0)^{1/3}$ , где  $z_0$  - длина фокусной перетяжки,  $V$  - скорость светодетонационной волны,  $\tau$  - длительность лазерного импульса. Показано, что теоретические и экспериментальные данные согласуются.

Далее рассмотрена модификация метода резки, предложенного выше. Для резки диэлектриков указанным методом необходимо, чтобы толщина пластины не превышала длину фокусной перетяжки. Это накладывает ограничения на ширину перетяжки - соответственно, и на энергию в импульсе, которая



должна быть достаточной для инициирования оптического пробоя вблизи задней поверхности образца. Поэтому, для получения аналогичной нитки микротрещин в более толстом образце потребуется более длиннофокусная линза и существенное увеличение энергии лазерного импульса. Все вышеперечисленное накладывает ограничение на качество резки, т.к. при больших вкачиваемых энергиях увеличивается диаметр получаемых микротрещин.

Модификация метода заключается в том, что по мере роста канала фокусная перетяжка перемещается вглубь образца, синхронно с фронтом канала микротрещин.

Исследована морфология микротрещин при отстройке синхронности движения фокуса и фронта канала микротрещин. Рассматриваются случаи отставания и опережения фокуса по сравнению с фронтом канала. Результаты исследования показывают, что при точной синхронности возможно добиться диаметра микротрещин  $< 50$  мкм. Выявлено, что диаметр канала,  $d \approx 4a$ , где  $a$  - ширина фокусной перетяжки. Таким образом, решая уравнения энергетического баланса, получаем:  $d \approx a(T_d/T_n)^{1/2} \approx 4a$ , где  $T_d$  - температура плазмы в светодетонационной волне,  $T_n$  - температура плавления, что также доказывает, -  $T_d \approx 20000\text{K}$ .

Определено, что максимальное расстояние между каналами с диаметром  $d$  не должно превышать  $3d$ . Качество резки повышается при уменьшении размера микротрещин за счет снижения скорости резки,  $V \sim 1/d$ .

**В. Заключение** сформулированы основные результаты работы:

1. Экспериментально обнаружена нелинейная зависимость скорости роста канала микротрещин в зависимости от частоты следования лазерных импульсов. Показано, что на разных

диапазонах изменения частоты к пробое приводят различные физические механизмы.

2. Предложена и обоснована модель динамики накопления точечных дефектов, приводящих к поглощению лазерного излучения. Показано достаточно хорошее согласие между экспериментальной зависимостью скорости роста канала микротрещин и зависимостью, полученной из компьютерного моделирования.

3. Впервые предложена и обоснована модель образования канала микротрещин путем инициирования светодетонационной волны и последующего ее распада с образованием микротрещины в виде характерной воронки. Показано, что параметры лазерного излучения, используемого в нашей экспериментальной установке, удовлетворяет пороговым условиям инициирования светодетонационной волны.

4. Экспериментально исследована морфология микротрещин. На основе этих исследований удалось оценить качество резки прозрачных диэлектриков методом, предложенным нами. Обнаружены микротрещины, ориентированные к направлению распространения не под углом полного внутреннего отражения, что связано с распадом светодетонационной волны. Получены дополнительные доказательства хорошего согласия между экспериментальными и теоретическими результатами.

Автор выражает искреннюю благодарность Б.Я.Зельдовичу, А.Н.Чудинову за постановку актуальной темы диссертации, постоянную помощь и внимание к работе.

Автор признателен А.А.Постникову за помощь в проведении экспериментов, а также В.В.Шкунову за полезные обсуждения и внимание к работе.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Klaus Dickmann, Elena Dir/ "Innenbearbeitung von Glass mit Nd : YAG - Laser"//Laser magazin, 1995, № 1, p. 16 -19.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

#### В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ :

2. А.А.Постников, М.Б.Стригин, А.Н.Чудинов/ "Резка толстых стеклянных пластин пикосекундными импульсами света"//Физика твердого тела. 1994, Т.36, № 8, С.2273 - 2276.

3. М.Б.Стригин, А.Н.Чудинов/"Лазерная обработка стекла пикосекундными импульсами"//Квантовая электроника. 1994, Т.21, № 8, С.787 - 790.

4. А.А.Постников, М.Б.Стригин, А.Н.Чудинов/"Механизмы ориентации микротрещин в оптических стеклах, образованных излучением лазера с пассивной синхронизацией мод"//Письма в ЖТФ. 1994, Т.20, вып.15, С.22 - 27.

5. М.Б.Стригин, И.Б.Царев, А.Н.Чудинов/"Модель образования канала пробоя в прозрачном диэлектрике"//Материалы шестого межреспубликанского заочного научно - технического семинара "Применение лазеров в науке и технике". Иркутск. 1994, С. 18 - 20.

6. А.А.Постников, М.Б.Стригин, А.Н.Чудинов/"Применение пикосекундных лазерных импульсов для резки толстых стеклянных пластин"//Материалы шестого межреспубликанского заочного научно - технического семинара "Применение лазеров в науке и технике". Иркутск. 1994, С.12 - 18.

7. Е.Я.Зельдович, М.Б.Стригин, А.Н.Чудинов/"Новый метод лазерной резки прозрачных диэлектриков"//Письма в ЖТФ. 1993, т.19, вып. 7, С.59 - 61.

8. A.N.Chudinov, M.B.Strigin/"Cutting of glass by picosecond laser radiation"/Optics Communications. 1994, V.106, P.223:

9. A.N.Chudinov, M.B.Strigin//In : OSA Annual meeting. 1993, (Optical Society of America, Washigton, D.C., 1993) V.16, P.125.

10. A.N.Chudinov, M.B.Strigin/"Model of breakdown channel forming in transparent dielectrics"/Technical Digest "8-th Laser Optics". 1995, V.1, P.223 - 224.

11. A.N.Chudinov, A.A.Postnicov, M.B.Strigin/"Optics mechanical method druling transparent dielectrics"/Technical Digest "8-th Laser Optics". 1995, V.1, P.225 - 226.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A.N. Chudinov', located in the lower right quadrant of the page.

Издательство Челябинского  
государственного технического университета

---

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 01.10.96. Формат  
60x84 1/16. Печать офсетная. Уч.-изд.л. 1,25. Тираж 100 экз.  
Заказ 219/499.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76.