

УДК 621.9.048.7
На правах рукописи



ИВАНОВ Игорь Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ
ПРОЗРАЧНЫХ ХРУПКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ**

**Специальность 05.03.01 — Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Иванов

Работа выполнена в Московском Государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Григорьянц А.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гладков Э.А.

кандидат технических наук, доцент
Борисовский В.Е.

Ведущая организация: ИПЛИТ РАН

У1751364

Защита со
вета Д 2
105005, 2-
Ваш отз:
указанном

Иванов И.А.
Разработка и исследование
способа разделения
прозрачных хрупких
диэлектрических материал...
2006

дании диссертационного
а по адресу:
й печатью, просим выслать по
0-00

У 1751364

Н.Э. Баумана

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

В.В.П.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1751364

Иванов И.А. Разработка и

ж 100 экз.
Э. Баумана

В диссертационной работе рассматриваются вопросы, связанные с процессами разделения прозрачных хрупких диэлектрических материалов с помощью излучения лазера на парах меди.

Актуальность работы.

Лазерная обработка прозрачных хрупких диэлектриков (стекло, сапфир, алмаз, рубин и др.) является постоянно развивающимся и важным методом обработки для электронной промышленности, электровакуумного производства и приборостроения. Операции лазерного разделения хрупких материалов, применяемые в указанной области, обеспечивают требуемые высокие показатели чистоты получаемых изделий, точности геометрии и качества обработанных поверхностей. В этой области применяются различные типы лазеров, и для каждого случая обработки доминирующим является тот или иной механизм разделения материала: абляция или термоупругое разрушение. Наиболее часто применяемыми для обработки являются CO_2 -лазеры, эксимерные лазеры, твердотельные лазеры с неодимом и лазеры на парах меди (ЛПМ), в области создания которых за последние несколько лет были достигнуты значительные результаты.

На сегодняшний день лазер на парах меди представляет собой источник мощного (средняя мощность до 100 Вт) импульсного видимого излучения с длиной волны 0,51 и 0,58 мкм, с высокой частотой следования импульсов от 2 до 50 кГц, короткой длительностью импульсов порядка 20 нс с высоким качеством, близким к дифракционному (расходимость порядка 0,2 мрад), и высокой пиковой мощностью (от 10 до 1000 кВт). Такое сочетание параметров излучения является идеальной комбинацией для прецизионной микрообработки с испарением практически любых материалов и на сегодняшний день является причиной повышенного интереса к излучению ЛПМ как к технологическому инструменту. При этом современные модели являются простыми в использовании, надежными и обладают низкими эксплуатационными расходами, что также послужило причиной их широкого применения в промышленности для операций пробивки микроотверстий и прецизионной резки металлов.

В настоящее время отсутствует систематизированное представление о возможностях использования импульсно-периодического излучения для обработки прозрачных хрупких диэлектриков. Поэтому в полной мере не используются технологические возможности современных лазеров с указанным типом излучения, в частности, твердотельных лазеров и ЛПМ.

В связи с изложенным, исследование процессов взаимодействия излучения лазера на парах меди с прозрачными хрупкими диэлектрическими

материалами и разработка способа технологического воздействия данного излучения на указанные материалы при операциях разделения является актуальной задачей.

Цель работы.

Исследовать процессы разрушения и разработать способ разделения прозрачных хрупких диэлектрических материалов излучением ЛПМ.

Задачи исследования.

1. Проанализировать существующее лазерное оборудование на базе ЛПМ и разработать технические требования к оборудованию для обработки прозрачных хрупких диэлектрических материалов.

2. Разработать и создать экспериментальную лазерную установку для обработки указанных материалов.

3. Определить особенности механизма поглощения излучения ЛПМ прозрачными хрупкими диэлектрическими материалами.

4. Определить механизм возникновения разрушения при взаимодействии излучения ЛПМ с материалом на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

5. Установить диапазон параметров излучения ЛПМ, необходимых для процессов разделения различных классов рассматриваемых материалов.

Методы исследования.

В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические задачи решались с применением научных основ технологии лазерной обработки материалов, теории термоупругости и теплопроводности с элементами дифференциального и интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились на разработанной технологической установке на базе ЛПМ. Обработка данных экспериментов проводилась при помощи стандартной программы Microsoft Excel.

Научная новизна.

1. Установлено, что в случае воздействия импульса излучения ЛПМ с интенсивностью выше критической при превышении термоупругими растягивающими напряжениями предела прочности в прозрачном хрупком материале образуется трещина. Это происходит при превышении

температурой и скоростью изменения температуры материала критической величины.

2. Установлено, что для избежания вызванного действием термоупругих напряжений растрескивания поверхности, образованной в процессе резки или прошивки отверстия с удалением материала путем абляции, интенсивность импульса излучения ЛПМ должна обеспечивать нагрев материала выше температуры абляции, но быть ниже критической для образования трещины.

3. Разработан способ двухимпульсной обработки с удалением материалов, для которых нагрев выше температуры абляции не может быть обеспечен одним импульсом ЛПМ с интенсивностью ниже критической, при которой образуется трещина. В этом способе нагрев материала до температуры абляции происходит последовательно двумя импульсами волновых составляющих (0,51 и 0,58 мкм) излучения ЛПМ, интенсивность каждого из которых ниже критической для образования трещины.

Практическая ценность.

1. Разработаны способ и устройство объемной лазерной маркировки прозрачных хрупких материалов, позволяющие повысить разрешение и яркость получаемого изображения путем уменьшения размеров и устранения зоны трещинообразования около разрушения. В способе воздействие на материал происходит двумя импульсами излучения. Первый импульс имеет допороговую интенсивность. Задержка по времени между первым и вторым импульсом сравнима со временем релаксации температурного поля и поля напряжений в материале, возникающих в результате воздействия первого импульса. Второй импульс формирует полость в объеме материала.

2. На основе разработанных технических требований к лазерному технологическому оборудованию проведена модернизация ЛПМ типа «Кулон» с одним активным элементом. Определены зависимости средней мощности и расходимости излучения от параметров используемого резонатора. В результате проведенных расчетов и экспериментов получены значения размера пучка излучения ЛПМ в фокусе ахроматических склеенных двухлинзовых объективов с различным фокусным расстоянием.

3. Установлен диапазон параметров излучения ЛПМ и соответствующих элементов лазерного оборудования, необходимых для процессов разделения различных марок стекла, алмаза, рубина, сапфира.

Реализация результатов работы.

Разработанные устройства и технологии послужили основой для создания автоматизированного лазерного технологического комплекса на

базе ЛПМ для прецизионной обработки прозрачных материалов в ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2002-2006 г., на конференции «Лазерные системы и их применение. Лазерные системы'2004», Кострома, 2004 г., на международном симпозиуме «Образование через науку», Москва, 2005 г.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано три работы.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Содержит 149 страниц текста, включая 42 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 73 наименований, а также приложения на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность проблемы изучения процессов разделения прозрачных хрупких диэлектрических материалов излучением ЛПМ. Даны общие характеристики результатов исследования и их практическая ценность. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ физических процессов при воздействии лазерного излучения на материалы. Процессы разделены на происходящие в прозрачных и непрозрачных для излучения материалах.

Как известно, для непрозрачного материала поглощение излучения происходит с помощью непосредственно взаимодействия квантов излучения с решёткой. В результате того, что часть энергии излучения, проходящего через среду, затрачивается на колебания молекул, его интенсивность уменьшается в соответствии с законом Бугера-Ламберта. Анализ литературных данных и проведенные исследования показали, что для прозрачных материалов, для которых коэффициент поглощения мал ($\alpha < 10^{-1}$ см⁻¹), значительное поглощение излучения происходит в локальной области (~нескольких мкм) при высоких плотностях мощности излучения

($>10^8$ Вт/см²) и приводит к явлению оптического пробоя в прозрачных твёрдых телах.

Можно выделить два вида пробоя, вызванного локальным поглощением в материале: несобственный пробой и собственный пробой. Первый обусловлен тепловыми эффектами (термоупругие напряжения, тепловая ионизация, фотоионизация излучением нагретых включений, термохимические и механохимические реакции и др.), инициируемыми в оптическом материале различными центрами поглощения (скоплениями примесей, пузырьками газа, микротрещинами, структурными дефектами и т.д.). Второй обусловлен процессами, свойственными самой матрице материала (ударная (электронная лавина) и многофотонная ионизация).

Согласно исследованиям Маненкова А.А. (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН) и др., в области импульсов наносекундной длительности наиболее вероятным механизмом пробоя прозрачного хрупкого диэлектрика является механизм теплового взрыва поглощающей неоднородности. При этом локальная температура достигает значений $>10^3$ К, а разрушения в объеме и на поверхности материала могут сопровождаться образованием трещин.

Для прецизионной обработки прозрачных хрупких материалов в качестве инструмента воздействия излучение ЛПМ было выбрано в силу широких возможностей изменения его параметров, обеспечивающих разнообразные исследовательские и технологические возможности. Указанные возможности реализуются у ЛПМ за счет управления энергией и расходимостью импульса при высокой интенсивности излучения в сочетании с достижимым размером пятна в фокусе ~нескольких мкм, а также за счет поимпульсной модуляции излучения. Кроме указанных преимуществ, следует отметить наличие в импульсе двух длин волн излучения (желтой $\lambda=0,58$ мкм и зеленой $\lambda=0,51$ мкм). Это обстоятельство (как будет показано в главе 4) позволяет путем деления импульса на разнородные составляющие управлять периодом следования импульсов излучения с точностью до наносекунд.

Вторая глава посвящена анализу существующего лазерного оборудования на базе ЛПМ и разработке оборудования для обработки прозрачных хрупких диэлектриков.

По совокупности преимуществ (конструктивная простота и удобство эксплуатации, невысокая стоимость, легкость перенастройки резонатора и его юстировки для изменения параметров излучения, маленькие габариты) перед схемой «генератор-усилитель» с двумя активными элементами для использования в работе была выбрана схема лазерного модуля типа «генератор» с одним активным элементом.

Кроме основных требований, предъявляемых к технологическим лазерам, для ЛПМ для обработки прозрачных хрупких диэлектриков были

сформулированы требования к излучению и конструктивные требования. С учетом указанных требований сотрудниками кафедры МТ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективом лазерной лаборатории ФГУП «НПП «Исток» было составлено техническое задание на создание лазерного модуля с увеличенной с 10-ти до 16 Вт выходной средней мощностью излучения (при частоте следования импульсов 13 кГц), с введением в состав модуля системы высокоскоростной поимпульсной модуляции излучения, позволяющей управлять энергией (и мощностью) любого импульса в последовательности. Использование в модуле неустойчивого оптического резонатора телескопического типа, позволяющего оперативно заменять зеркала резонатора, было вызвано необходимостью получения излучения минимальной расходимости и удобством изменения качества (расходимости) и мощности излучения при технологических операциях.

Теоретические и экспериментальные исследования параметров и характеристик излучения созданного ЛПМ указали на сохранение качества излучения, несмотря на увеличение мощности и введение импульсной модуляции излучения. Экспериментально установлено, что для увеличения резонатора $M=40$ расходимость первого резонаторного пучка находится на уровне $\theta_1=0,65$ мрад, второго— $\theta_2=0,12$ мрад, суммарная выходная мощность излучения составляет около 16 Вт; для $M=200$ $\theta_1=0,17$ мрад, $\theta_2=0,1$ мрад, мощность составляет около 14 Вт.

Присутствие двух длин волн в составе излучения означает, что фокусирующая система кроме прочих, должна быть исправлена и в отношении хроматической аберрации; это потребовало специальных исследований фокусирующих систем для данного типа лазеров.

На практике благодаря простоте конструкции и расчета для технологических целей фокусировки излучения ЛПМ широко применяются двухлинзовые склеенные объективы.

После составления технических требований к объективам в МГТУ им. Н.Э. Баумана с помощью программного продукта, использующего метод, описанный И. А. Турыгиным, с последующей корректировкой по аберрациям высших порядков, были рассчитаны и изготовлены на оборудовании ООО «Арли» (г. Санкт-Петербург) объективы для фокусировки излучения ЛПМ. После изготовления указанные объективы тестировались на установке «Качество», разработанной ФГУП «НПО «ОПТИКА». В результате исследований был определен диаметр аберрационной составляющей сфокусированного луча d_a , который для объективов с фокусным расстоянием 50, 70, 100 и 150 мм при апертуре 14 мм составил соответственно: 0,01 мм, 0,014 мм, 0,02 мм и 0,03 мм. Расчет минимального диаметра сфокусированного луча по формуле:

$$d=d_a+d_{\text{диф}},$$

где $d_{\text{диф}} = f \cdot \theta$ — диаметр дифракционной составляющей сфокусированного луча; f — фокусное расстояние объектива, мм; θ — расходимость излучения, рад,

позволил установить, что для разработанных ЛПМ и объективов величина d составляет не менее 0,015 мм. Найденные значения d позволили оценить интенсивности излучения ЛПМ в фокусе объектива, которые достигают значений $\sim 10^{10}$ Вт/см².

Третья глава посвящена исследованию механизмов лазерного разрушения прозрачных хрупких диэлектриков под действием излучения ЛПМ.

Анализ несобственных механизмов локального поглощения, наиболее часто имеющих место на практике, основан на решении уравнения теплопроводности, описывающего процесс нагрева поглощающей неоднородности. Анализ решения уравнения, полученного Маненковым А.А. и др., показал, что при определенных значениях мощности P , выделяющейся в локальной области, размерах и теплофизических параметрах неоднородности температура в её центре начинает экспоненциально нарастать во времени, что соответствует тепловому взрыву. На основании этих исследований было установлено, что для большинства из рассматриваемых в работе материалов, в случае поглощения на дефектах размером ~ 1 мкм и более механизмом лазерного разрушения является механизм теплового взрыва, а для поглощения дефектами субмикронного размера — фотоионизационный тепловой взрыв.

Несобственный механизм поглощения, обусловленный наличием поглощающих дефектов, характерен для образцов обычной чистоты широкого ряда хрупких материалов: стекло, кристаллический кварц, сапфир и др. В объеме и тем более на поверхности указанных материалов практически всегда присутствуют те или иные поглощающие неоднородности, методам определения характеристик которых посвящен параграф главы 4. Таким образом, эффективность поглощения, а, значит, и процесса обработки, определяется количеством и характеристиками дефектов, определяющими оптическое качество материала.

Встречающиеся в литературе данные по исследованию частотной и температурной зависимости величины критической интенсивности поля пробоя показывают, что для особо чистых образцов материалов указанные зависимости соответствуют теоретически предсказанным для собственного механизма поглощения — электронной ударной ионизации.

Анализ литературных данных по морфологии результатов взаимодействия импульсного излучения наносекундной длительности с объемом прозрачного хрупкого материала (объемного разрушения в виде полости, в некоторых случаях окруженной расходящимися радиальными трещинами), позволил предположить, что хрупкое разрушение вызвано

действием термоупругих напряжений. Сопоставление времен установления термоупругих напряжений ($\sim 10^{-9}$ с) в области локального нагрева размером ~ 1 мкм и раскрытия трещины ($\sim 10^{-8}$ с) позволило установить, что наиболее медленным является последний процесс, причем он происходит практически после действия импульса излучения ЛПМ, рассматриваемого в работе.

Поэтому за основу при рассмотрении механического разрушения хрупких материалов излучением ЛПМ в случае локального поглощения излучения была взята система уравнений теории упругости, которая для сферически-симметричной задачи имеет вид:

$$\rho c(1+\theta) \frac{\partial T'(r, t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial}{r^2} \left[r^2 \frac{\partial T'(r, t)}{\partial r} \right] + B \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[r^{-2} \frac{\partial (r^2 u_r)}{\partial r} \right] = \alpha \frac{(1+\mu)}{(1-\mu)} \frac{\partial T'(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где c , ρ , χ — теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала, зависящие от температуры; $T' = T - T_0$ — превышение температуры в месте разрушения T над начальной температурой T_0 ; r — радиус, отсчитываемый от центра неоднородности; B — плотность мощности тепловых источников; u_r — радиальная компонента вектора перемещений; α — коэффициент линейного расширения; μ — коэффициент Пуассона; $\theta = (T_0/\rho c)[(1+\mu)/(1-\mu)]^2 \alpha^2 c_L^2$ — коэффициент связанности, определяющий отношение энергии механических деформаций среды, вызванных её нагревом, к величине поглощенной энергии; c_L — скорость звука в материале.

Для исследования условий возникновения трещины систему уравнений (1)–(2) необходимо дополнить критерием механического разрушения, который в общем случае имеет вид:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C(T, d\varepsilon/dt),$$

где σ_1, σ_2 и σ_3 — главные напряжения, $d\varepsilon/dt$ — скорость деформации.

Известное решение системы (1)–(2) показало, что максимум тангенциальной компоненты (растягивающих) напряжений $\max \sigma_\phi(r, t)$ всегда находится в “холодной” области прозрачного твердого тела.

Адекватным критерием механического разрушения в этом случае будет неравенство

$$\max \sigma_\phi(r, t) \geq \sigma_{th}, \quad (3)$$

где σ_{th} — предел прочности материала на растяжение, превышение которого обуславливает образование трещины.

А критерии лазерного разрушения по механизму образования трещины, полученные в работах Маненкова А.А. и др., будут иметь вид:

$$\begin{aligned} T' &\geq T'_{cr}, & T'_{cr} &= 3\sigma_{th}(1-\mu)/(E\alpha) \\ dT'/dt &\geq 0,9T'_{cr}/\tau, \end{aligned} \quad (4)$$

где E —модуль упругости материала, τ —длительность лазерного импульса. Второе неравенство означает, что при медленном нагреве напряжение не достигает предела прочности, и, следовательно, трещина не возникает.

Согласно теории механического разрушения, поверхностная энергия трещины с площадью S равна

$$E_m = S\gamma = Zj^2\gamma, \quad (5)$$

где j —линейный размер трещины, Z —параметр, зависящий от пространственной формы трещины, γ —плотность поверхностной энергии. Для формирования трещины необходимо, чтобы механическая энергия, запасенная в поле деформации, превышала энергию, определенную соотношением (5). Это означает, что для реализации лазерного разрушения прозрачного твердого тела по механизму образования трещины необходимо выполнение условия:

$$k\vartheta E_p \geq E_m, \quad (6)$$

где E_p —энергия лазерного импульса; k —коэффициент, определяющий долю поглощенной энергии.

Кроме того, как следует из теории лазерного разрушения, интенсивность излучения должна превышать пороговую I_{th} :

$$I \geq I_{th} \quad (7)$$

Как показывают расчетные оценки и результаты проведенных экспериментов, выполнение условия (7) для большинства прозрачных хрупких диэлектриков (кроме материалов с малым значением коэффициента $\alpha \approx 10^{-6}$ 1/К) в случае воздействия импульсом излучения ЛПМ приводит к выполнению неравенств (4) и (6) и образованию микротрещины.

Для исследования возможности зарождения на полученной микротрещине и роста макротрещины в силу наглядности и известности была выбрана методика, позволяющая исследовать равновесное состояние твёрдого тела, ослабленного трещинами. Соответствующим критерием распространения трещины является выражение:

$$\lim_{x^* \rightarrow 0} [(x^*)^{1/2} \cdot \sigma(x^*, \sigma_{кр})] = K/\pi, \quad (8)$$

где $\sigma(x^*, \sigma_{кр})$ — поперечные растягивающие напряжения в окрестности вершины трещины, вычисленные на основе классической теории упругости при нагрузке, не превышающей критическую ($\sigma \leq \sigma_{кр}$), x^* — расстояние от вершины трещины до точек, лежащих в её плоскости, $K=(\pi E\gamma)^{1/2}$ — модуль сцепления.

Выражение (8), по сути, является условием предельно-равновесного состояния трещины. До тех пор, пока левая часть этой зависимости, характеризующая напряжения в вершине трещины, остаётся меньше K/π (постоянной для данного материала), разрушение не развивается. При выполнении равенства (8) происходит распространение трещины.

Четвертая глава посвящена определению влияния основных параметров излучения ЛПМ на технологический процесс и результат обработки прозрачных хрупких диэлектриков. На основе исследований, проведенных в главе 3, получены важные на практике зависимости характеристик разрушения от энергетических и временных параметров излучения. Так, критическим параметром, определяющим появление разрушения в объеме и на поверхности прозрачного материала, является интенсивность падающего излучения. Степень воздействия (размер разрушения) определяется поглощенной энергией излучения.

Технологические процессы обработки прозрачных хрупких диэлектриков излучением ЛПМ были разделены по типу выполняемых технологических операций на: 1) объемная маркировка, 2) скрайбирование, 3) резка и прошивка отверстий, 4) управляемое термораскалывание.

Установленные экспериментальные зависимости находятся в хорошем соответствии с использованными теоретическими предположениями, что служит доказательством справедливого использования последних для инженерных расчетов.

Для случая зарождения трещины на краю пластины при термораскалывании материалов типа стекла установлены некоторые особенности поглощения и распространения тепла:

1) температура нагрева стекла не должна превышать температуру перехода материала в вязкое состояние—температуру размягчения T_p ($550 \div 1100^\circ\text{C}$), что накладывает ограничение на значение плотности мощности излучения q :

$$q \leq 1/2 T_p \chi [\pi / (at)]^{1/2},$$

2) максимальная скорость перемещения луча относительно образца при обработке должна обеспечивать равномерное распространение теплоты по объему материала, что накладывает ограничение на значение скорости перемещения луча v_n :

$$F \cdot (at)^{1/2} \gg v_n, \quad (9)$$

где F —частота следования импульсов излучения.

Выражение (9) имеет следующий физический смысл: расстояние, преодолеваемое тепловым потоком в течение действия импульса длительностью t , должно быть существенно больше расстояния между точками воздействия соседних импульсов. После подстановки в (9) характерных значений коэффициента температуропроводности стекла ($a = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для Борского листового стекла) и параметров излучения ЛПМ ($F = 14 \text{ кГц}$, $t = 15 \text{ нс}$ для ЛПМ серии «Кулон» с одним активным элементом) получено, что скорость перемещения луча v_n не должна превышать $0,1 \text{ мм/с}$, что в десятки раз меньше скоростей, характерных для операций управляемого термораскалывания стекла, например, с помощью твердотельных лазеров.

Кроме того, с использованием формулы для вычисления минимального размера краевого дефекта J [мкм], необходимого для зарождения трещины и осуществления процесса термораскалывания, полученной Маловым И.Е. для случая термораскалывания пластины из Борского листового стекла было определено характерное, требуемое для зарождения трещины и её стабильного роста, значение мощности излучения. Для пластины Борского листового стекла (имеющего практически одинаковые коэффициенты поглощения излучения с $\lambda=1,06$ мкм и $\lambda=0,51/0,58$ мкм) толщиной 3 мм с краевым дефектом размером 200 мкм поглощенная средняя мощность должна составлять не менее 8 Вт. Следует отметить, что в случае управляемого термораскалывания поглощение излучения ЛПМ должно носить не локальный характер, а происходить по всей толщине материала, а излучение представлять линейный источник тепла. В соответствии с законом Бугера-Ламберта, падающая средняя мощность должна превышать 95 Вт. Импульсно-периодический характер, а также длина волны излучения ЛПМ, обуславливающая низкую эффективность поглощения прозрачными материалами, позволяют сделать вывод о нецелесообразности использования излучения ЛПМ для операций управляемого термораскалывания. Для данной цели в настоящее время с успехом применяют твердотельные лазеры с мощностью непрерывного излучения более 100 Вт, а излучение ЛПМ целесообразно использовать для формирования поверхностных и объемных дефектов, инициирующих зарождение трещины и её распространение в требуемом направлении для осуществления процесса управляемого термораскалывания. Например, в ходе выполнения работы были проведены эксперименты по формированию таких «сигнальных» дефектов в объеме сапфировой подложки с осажденными полупроводниковыми изделиями. После обработки излучением ЛПМ подложка с достаточной точностью разделялась путем управляемого термораскалывания излучением CO_2 -лазера.

При многоимпульсной обработке прозрачных хрупких материалов излучением ЛПМ следует рассматривать два случая: 1) облучение материала с интенсивностью, недостаточной для модификации материала (допороговой), и 2) облучение материала с интенсивностью, превышающей пороговую для разрушения материала.

Практический интерес представляет многоимпульсная обработка для операций скрайбирования, резки и прошивки отверстий в прозрачных хрупких диэлектрических материалах, поглощение излучения в которых происходит по механизмам, описанным в главе 3, с последующим оптическим разрушением поверхности. При воздействии первых импульсов на поверхность материала наблюдается увеличение количества поглощенной от импульса к импульсу энергии, что ведет к росту области разрушения вглубь материала и формированию кратера. Наличие кратера с трещиноватым дном приводит к еще более заметному росту поглощенной

энергии и достижению максимального значения долей поглощенной энергии, расходуемой на абляцию материала. Проведенные экспериментальные исследования и полученные зависимости результатов воздействия излучения ЛПМ на ряд прозрачных хрупких материалов от параметров обработки показали, что процесс обработки происходит в автоколебательном режиме испарения. Количество удаляемого за один импульс материала с достаточной точностью определяется на основе уравнения баланса энергии лазерного импульса и суммы энергетических потерь в факеле, образующемся внутри канала и на поверхности материала, и энергии, затраченной на разрушение (абляцию).

При обработке серией импульсов, в которой первый (первые) импульс не производит лазерного разрушения, а только изменяет свойства материала (температуру, напряженное состояние), имеет место воздействие следующих импульсов на материал с измененными теплофизическими свойствами и напряженным состоянием, а значит, имеется возможность управления происходящими процессами разрушения материала.

Сущность предлагаемого в работе нового способа объемной и поверхностной маркировки состоит в раздельном использовании волновых составляющих (0,51 мкм и 0,58 мкм) импульса излучения лазера на парах меди. Указанные импульсы излучаются лазером попарно. Первым в паре на выходе из лазера следует импульс с длиной волны 0,51 мкм, вторым, с задержкой ~5 нс, – импульс с длиной волны 0,58 мкм. При обработке один из импульсов при фокусировании излучения должен создать в области фокусировки температурное поле и поле термоупругих напряжений, не превышающих предел прочности материала.

Интенсивность первого импульса должна быть меньше интенсивности, необходимой для достижения критического градиента температуры $dT/dt = 0,9T_{cr}/\tau$:

$$I_1 \leq I_{cr} \approx c\rho T_{cr}/(k\tau)$$

Когда I_1 меньше I_{cr} , трещина не возникает, даже если $T > T_{cr}$, т. к. диффузия тепла из области нагрева приводит к уменьшению напряжения в ее окрестности.

Другой импульс, следующий через определенный интервал времени за первым, при фокусировании создает лазерное разрушение. Его интенсивность должна превышать пороговую интенсивность для абляции материала, определяемую измененными воздействием 1-го импульса свойствами материала.

Для того, чтобы разрушение не сопровождалось появлением трещины, плотность энергии, выделяющейся в материале при фокусировке излучения второго импульса, должна быть достаточной для испарения малого объема материала (выполнение условия, аналогичного (7)) без возникновения критического температурного градиента и, соответственно, напряжений,

превышающих предел прочности материала (невыполнение второго условия (4)). В этом случае абляция материала не сопровождается появлением трещины.

Указанный способ позволяет реализовать операции лазерной обработки поверхностей и объемов рассматриваемых материалов с более высокой по сравнению с традиционной одноимпульсной обработкой точностью за счет того, что появляется возможность управления размером разрушения (процессом образования трещин) путем управления количеством введенной в материал мощности (энергии 1-го и 2-го импульса в течение задаваемого интервала времени между ними).

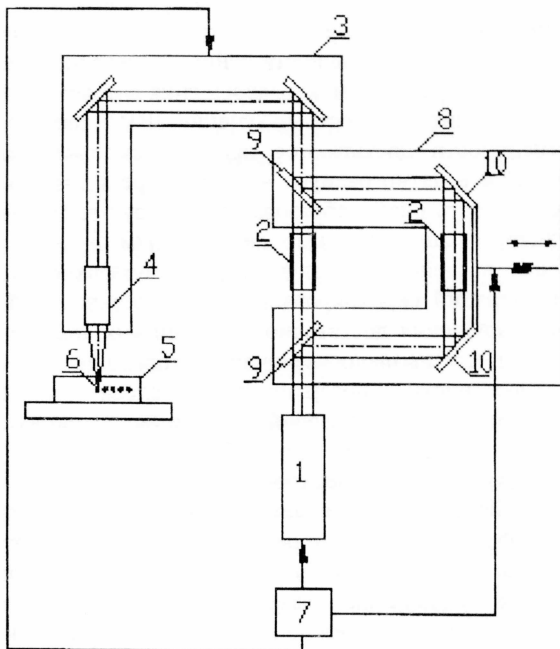


Рис. 1 Схема лазерного комплекса для комбинированной обработки прозрачных материалов импульсами двух длин волн излучения ЛПМ. 1- лазер, 2- телескопические системы, 3- система взаимного перемещения области фокусировки и образца, 4- оптическая фокусирующая система, 5- образец, 6- область фокусировки, 7- компьютер, 8- оптическая линия задержки, 9- дихроичные зеркала, 10- отражающие поворотные зеркала.

Так как время образования температурных полей и полей термоупругих напряжений (определяемое путем решения системы уравнений (1)-(2))

связано с физическими свойствами материала образца (для рассматриваемых материалов ~ десятков нс), у разных материалов указанное время отличается. Поэтому устройство, обеспечивающее задержку между парой импульсов, приводящих к одному разрушению, должно иметь возможность регулировки её величины. Для этого на оси излучения организуют пространственное разделение двух волн импульса излучения ЛПМ (см. рис. 1).

Простейшим решением могут быть два дихроичных зеркала, установленные под углами 45° и 135° к оси излучения, пропускающие без отклонения излучение с одной из вышеуказанных длин волн и отражающие перпендикулярно оси излучение с другой из вышеуказанных длин волн.

В пятой главе рассмотрены примеры применения излучения ЛПМ для обработки прозрачных хрупких диэлектриков. Технологические процессы классифицированы по интенсивности действующего на материал излучения.

В случае формирования микроразрушения в объеме Борского листового стекла пороговая интенсивность излучения ЛПМ составляет $\sim 25 \text{ ГВт/см}^2$. Такие интенсивности достигаются при фокусировке импульсов ЛПМ с энергией $\sim 1 \text{ мДж}$ в пятно радиуса $\sim 10 \text{ мкм}$. Трещины в объеме материала, окружающем область плазмообразования, образуются по механизму отрыва и имеют размеры свыше нескольких десятков мкм.

В случае воздействия излучения на поверхность материала при проведении операций скрайбирования или поверхностной маркировки для образования разрушения достаточно более низких значений интенсивности ($\sim 1 \div 10 \text{ ГВт/см}^2$), что вызвано увеличенным поглощением вследствие более высокой дефектности поверхностных слоев и возможным их взаимодействием с атмосферой. Отличие процесса образования поверхностного разрушения от объемного состоит в том, что трещинообразованию в поверхностном слое кроме термонапряжений способствует действие силы реакции отдачи паров с поверхности материала. Указанный эффект имеет вредное влияние на результат обработки при скрайбировании, когда требуется получение ровной неглубокой канавки, образуемой при воздействии лазерных импульсов. Поэтому обработку следует вести с интенсивностью излучения, близкой к пороговой для абляции, стремясь уменьшить массу испаренного за один импульс материала.

При использовании абляции материала с помощью излучения ЛПМ возможно проведение операций пробивки отверстий и контурной резки прозрачных материалов. Уровень интенсивности излучения, очевидно, должен быть достаточен для удаления материала, которое происходит путем мгновенной абляции материала со дна углубляемого поверхностного микроразрушения, с последующим образованием микроплазмы при каждом воздействии импульса. При этом расширение плазмы вызывает сверхзвуковую волну давления, связанную с выбросом пара. Типичные значения интенсивности составляют $5 \div 50 \text{ ГВт/см}^2$. Периодический характер

процесса накладывает ограничение на частоту следования импульсов, которая обычно не должна превышать несколько кГц. При взаимном перемещении луча и образца описанный процесс используется для резки материала. В этом случае возможная толщина разделяемого материала (≤ 1 мм для плавленого кварца) ограничена вследствие отсутствия распространения излучения по отверстию как по волноводу по сравнению с процессом сверления (глубина отверстия до 3 мм). Типичные значения диаметра получаемых отверстий и ширины реза близки к диаметру перетяжки сфокусированного луча ($10\div 30$ мкм), типичные скорости реза составляют несколько мм/мин.

После разработки методики определения параметров процесса разделения материалов для проведения указанных выше операций был создан экспериментальный технологический стенд, в состав которого вошли ЛПМ с активным элементом «Кулон LT-15Сш», генератор импульсов управления излучением, двухкоординатный стол, оптико-механический блок с автоматизированным перемещением рабочего объектива, система программного управления.

Стенд применялся для отработки технологии формирования изображений в стекле и прецизионной резки, позволяющей получать с микронной точностью разнообразные изделия от элементов микросхем до микроустройств для биомедицины.

ОБЩИЕ ВЫВОODY

1. Так как при взаимодействии излучения ЛПМ высокой интенсивности ($>10^8$ Вт/см²) с образцами обычной чистоты широкого ряда хрупких материалов: стекло, кристаллический кварц, сапфир и др. преобладает механизм локального поглощения на неоднородностях с повышенным коэффициентом поглощения, то эффективность поглощения, а, значит, и процесса обработки, определяется количеством и характеристиками дефектов, определяющими оптическое качество материала.
2. Разрушение с образованием трещины при локальном поглощении излучения лазера на парах меди прозрачным хрупким диэлектриком возникает при превышении растягивающими термонапряжениями предела прочности материала. Это происходит при превышении температурой и скоростью изменения температуры материала критической величины. Данные условия выполняются при превышении интенсивностью излучения критической величины, определяемой свойствами материала.
3. Теоретически и экспериментально установлено, что при воздействии излучения ЛПМ на прозрачные хрупкие материалы типа стекол при появлении трещиноватого разрушения его размер пропорционален энергии импульса и зависит от параметров фокусировки. Установлено влияние

- параметров излучения ЛПМ на результат обработки в случае формирования как объемных, так и поверхностных дефектов в материале.
4. Приведена классификация по необходимой интенсивности излучения процессов обработки излучением ЛПМ ряда прозрачных хрупких диэлектрических материалов: $1\div10$ ГВт/см²—скрайбирование, $5\div50$ ГВт/см²—резка и пробивка отверстий, ≥ 25 ГВт/см²—формирование изображения в объеме материала.
5. Расчетным путем установлено, что с помощью воздействия на материал двух импульсов излучения с периодом ~ десятков нс появляется возможность расширения технологических возможностей обработки рассматриваемых материалов излучением ЛПМ. Предлагаемый способ заключается в управлении характером (гладкое или трещиноватое) разрушения, производимого вторым импульсом, путем выбора требуемой величины задержки между импульсами и интенсивности 1-го и 2-го импульса. Предложено устройство для реализации способа.
6. Разработана технология получения с помощью излучения ЛПМ плоских изображений в стекле, состоящих из отдельных объемных микроразрушений. Технология обеспечивает получение трещиноватых микроразрушений размером от 50 до 300 мкм с расстоянием между ними от 15 мкм в зависимости от требуемых разрешения и яркости изображения.
7. При скрайбировании, пробивке отверстий и резке прозрачных хрупких диэлектриков излучением ЛПМ удаление материала происходит путем абляции. Так как глубина распространения тепла за время действия импульса излучения ЛПМ для рассматриваемых материалов составляет ~1 мкм, то значение диаметра отверстия или ширины реза практически определяется диаметром луча с интенсивностью выше пороговой для абляции. Типичные значения указанных размеров составляют $10\div30$ мкм.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Григорьянц А.Г., Иванов И.А. Применение лазеров на парах меди для технологической обработки //Лазерные системы и их применение: Сб. научных трудов /Под ред. В.А. Петрова. - М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2004. - С. 131-137
2. Иванов И.А. Особенности обработки стекла излучением лазера на парах меди //Образование через науку: Тез. докл. Межд. конф. - Москва, 2005. - С. 247-248
3. Григорьянц А.Г., Иванов И.А., Лябин Н.А. Способ обработки прозрачных диэлектрических материалов излучением лазера на парах меди //Технология машиностроения. - 2005. - №10. - С. 60-64