

Особенности взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками.

77-30569/325485

03, март 2012

Григорьянц А. Г., Богданова М. А.

УДК.621.373.826

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Mawylka@list.ru

Mt12@bmstu.ru

Введение.

Влияние лазерного излучения на материалы исследуется со времён создания лазеров. В связи с постоянным развитием технологий именно лазеры чаще всего применяют для обработки практически любых материалов.

Маркировка является перспективным направлением развития в области лазерных технологий благодаря её востребованности практически везде. В настоящее время наиболее распространёнными материалами являются диэлектрики. К ним относятся стеклянные материалы, полимеры, драгоценные камни и т.д.

Принципы нанесения маркировки и механизмов, объясняющие сущность процесса изучаются до сих пор. Разнообразие механизмов и моделей, объясняющих сущность взаимодействия лазерного излучения с веществом весьма велико [1, 2, 3, 4, 5], однако пока не найдена общая систематика подбора параметров и объяснения происходящего внутри материала в зависимости от тех или иных условий. При работе с различными материалами требуется какая-либо база и рекомендации для упрощения процесса, однако подобных рекомендаций ранее не приводилось.

Теоретические предпосылки

С начала исследований проблемы лазерного разрушения до настоящего времени в литературе обсуждалось большое число возможных механизмов и моделей разрушения прозрачных материалов различного класса под действием импульсов лазерного излучения. Было проведено общий анализ всех имеющихся данных для таких материалов, как стекло, драгоценные камни и полимеры.

Согласно сложившимся к настоящему моменту представлениям, локальная лазерная модификация прозрачных твёрдых тел может быть вызвана различными механизмами поглощения энергии лазерного излучения. Среди них отмечают [5] так называемые собственные механизмы, связанные со свойствами самой матрицы (ударная и многофотонная ионизация), которые возможны только при воздействии сверхкоротких импульсов; и механизмы, обусловленные поглощающими дефектами (термоупругий, фотоионизационный и т.д.), реализуемые в области длинных импульсов. Реализация того или иного механизма разрушения (термического/нетермического) зависит от большого числа факторов: чистоты исследуемых образцов, длины волны излучения, длительности лазерного импульса, частоты следования импульсов, параметров фокусировки и др. Однако, часто реализуются оба. Различны и степени их воздействия на результат процесса. В связи с этим, для выяснения доминирующего механизма разрушения для каждого конкретного случая обработки материала предпочтительно иметь возможность быстрого изменения величин указанных параметров излучения и фокусировки от миллидо фемтосекунд. В настоящее время гораздо более распространено использование лазеров с короткой длительностью импульса излучения (от наносекундного диапазона и ниже) для нанесения меток внутри материала, поэтому в дальнейшем будем учитывать именно эти длительности импульса.

Исходя из литературных данных [6], можно выделить три термических модели, описывающие взаимодействие лазерного излучения с материалом.

Случай 1. Длинные импульсы, сравнимые со временем релаксации (менее 1 мс). Для него свойственны фототермическая абляция (тепло распространяется за счёт теплопроводности) и испарение материала с кипением после первичного расплавления. Однако такое термическое воздействие может вызвать удаление материала. К нетермическому воздействию относятся механические напряжения и фотохимическая абляция, т.е. в некоторых случаях энергия фотона бывает достаточной для прямого разрушения химических связей без ввода тепла.

Случай 2. Более короткие импульсы с тепловым равновесием все ещё сохраняются но потеря тепла направлена на испарение (менее 1 нс). При таком воздействии происходит нагрев, описываемый квадратичной функцией и охлаждение, описываемое логарифмической функцией. Некоторые шаги, внутри описания этой функции, вызваны скрытыми тепловыми эффектами. Сам процесс обработки наносекундными импульсами основан на образовании в его процессе плазмы, в результате чего происходит постепенное формирование ударного кратера.

Случай 3. Сверхкороткие импульсы, которые малы по сравнению со временами релаксации структуры. Такое воздействие приводит к нетепловому равновесию с электронами и решёткой, имеющих различные температуры, с прямым испарением и кулоновским эффектом (менее 1 пс). Суть процесса состоит в удалении материала без значительного нагрева близлежащих областей. В данном случае здесь не применимы термические концепции. Таким образом, каждый случай имеет свои закономерности, которые необходимо учитывать при обработке материалов.

Если говорить о непосредственном взаимодействии с поглощающей средой, то световой поток частично отражается от поверхности, а частично проникает внутрь материала, поглощаясь в нём. Изменение плотности светового потока q , т.е. количества световой энергии, приходящейся на единицу поверхности материала в единицу времени, в поглощающей среде описывается законом Бугера-Ламберта

$$q(x) = q_0 A e^{-\int_0^x \alpha(x) dx} \quad (1),$$

где q_0 - плотность падающего светового потока на поверхности материала,

A - поглощательная способность материала, $A=1-R$ (R - коэффициент отражения);

$\alpha(x)$ - коэффициент поглощения света в среде. Координата x отсчитывается от поверхности вглубь материала.

Конкретные значения входящих в формулу (1) величин A и α , а также механизмы поглощения света и перехода его в тепло, различны для всех материалов. Так, например, значения коэффициентов отражения и поглощения зависят от длины волны излучения. Используя формулу (1) всегда можно теоретически проверить уровень вводимой энергии на заданных глубинах материала, что является неотъемлемой частью при планировании экспериментов и непосредственном их проведении. Однако следует иметь в виду, что при использовании закона Бугера-Ламберта учитывается только линейное поглощение в однородном материале из-за чего пренебрегаются механизмы, обуславливающие нелинейное поведение. Этого можно избежать, производя некоторые допущения, указанные в [7].

Применение лазеров для нанесения изображений

Целью лазерной маркировки является изменение визуальной контрастности. Это может быть достигнуто двумя путями: либо изменением цвета, либо изменением

отражения. Для маркировки используются практически все типы лазеров. В таблице 1 [7] представлены характеристики для твердотельных лазеров, включая лазеры с модуляторами добротности, импульсные и непрерывные, которые формируют важные группы лазерных систем, используемых для маркировки и гравировки. Так же показаны данные для газовых и эксимерных лазеров от маломощных (менее 10 Вт) до более мощных (до 1 кВт). Импульсные ТЕА CO_2 лазеры (10 Вт, 70 нс), например, широко используются для нанесения логотипов на пивные бутылки. Эксимерные лазеры используются для нанесения микрометок на стёклах. Такие метки часто создаются для защиты от контрафактной продукции. Другая область применения эксимерных лазеров для маркировки – это маркировка кабелей, например для нужд авиастроения и др.

Если говорить о диаметре пятна, то для некоторых лазерных комплексов он ниже 80 мкм, что является порогом видимости для невооружённого глаза. Такие мелкие точки часто используются для считывающих машин. Применение такого малого диаметра пятна для читаемых глазом кодов возможно, если для увеличения ширины используется несколько линий. Дополнительные линии увеличивают результирующее время маркировки. Для уменьшения времени обработки используются специальные длиннофокусные объективы или телескопы, что приводит к увеличению размера пятна.

Таблица 1 Типы лазеров и их характеристики

Длина волны	Тип лазера	Типичная длительность импульса/непрерывность. (τ_p ширина импульса)	Типичный диаметр точки или разрешения маски
Твердотельные лазеры			
1064 нм	Nd:YAG	Модулятор добротности /имп /непр., τ_p 150 нс	80 мкм
	Nd:YVO ₄ или Ванадатовый	Модулятор добротности, τ_p 10 нс	50 мкм
	Волоконный лазер	непр. 100 Вт	50 мкм
		импульсная 20 Вт, τ_p 50 нс	50 мкм
532 нм	2я гарм. Nd:YAG	Модулятор добротности /непр, τ_p 150 нс	50 мкм
	2я Nd:YVO ₄	Модулятор добротности, τ_p 10 нс	30 мкм
355 нм	3я Nd:YAG	Модулятор добротности, τ_p 100 нс	20 мкм

	3я Nd:YVO ₄	Модулятор добротности /mode-locked, τ_p 10 нс	20 мкм
266 нм	4я Nd:YAG	Модулятор добротности, τ_p 10 нс	15 мкм
Газовые лазеры			
10.6 мкм	CO ₂ отпаянная трубка CO ₂ TEA CO ₂ быстро осевой	непр. 20 Вт импульсная 10 – 20 Вт, τ_p 70 нс непр. 1 – 10 кВт	150 мкм 200 мкм, Маркировка разрешение 300 мкм
457,9 нм	Ar- ионовый	непр. 60 мВт	2 мкм
488 нм	Ar- ионовый	непр. 300 мВт	2 мкм
514,5 нм	Ar- ионовый	непр. 300 мВт	2 мкм
632,8 нм	He-Ne	непр. 30 мВт	50 мкм
510,5 / 578,2 нм	Cu (на парах меди)	импульсный 25 Вт, τ_p 30 нс	20 мкм
Экимерные лазеры			Разрешение маски:
351 нм	XeF	Импульсный	<1 мкм
308 нм	XeCl	Импульсный	<1 мкм
248 нм	KrF	Импульсный	<1 мкм
248 нм	KrF	Фемтосекундный	<1 мкм
222 нм	KrCl	Импульсный	<1 мкм
193 нм	ArF	Импульсный	<1 мкм
157 нм	F ₂	Импульсный	<1 мкм

Тип наносимого изображения, его вид и качество, тип детали, требования по эксплуатации и виду материала определяют как тип лазера, так и применяемые в нём системы транспортировки и фокусировки излучения. Как правило, используется одна из следующих систем: полигонные системы (полигонные зеркала), проектируемые маски (фиксированные маски и управляемые программой) и системы переотражения луча (механический или оптический сканатор). Подводя некую черту по результатам, необходимо отметить, что исследование каждого из лазеров и применяемых для них систем проводилось в течение ряда лет, но до сих пор остаются некоторые неисследованные области. Рассмотрим подробнее особенности маркировки некоторых материалов.

Стекланные материалы.

Среди разновидностей стёкол имеется большое количество марок, обладающих различными свойствами и, как результат, различным типом разрушения. Выделим несколько близких по типу видов стёкол: К8, органическое стекло, посудное стекло, оконное стекло.

Для стекланных и керамических материалов как правило используется CO_2 лазер, без какой-либо дополнительной специальной обработки. При воздействии лазера на материал происходит поглощение пучка поверхностными слоями вещества. При взаимодействии излучения лазера (рисунок 1) с образцами обычной чистоты широкого ряда хрупких материалов: стекло, кристаллический кварц, сапфир и др. преобладает несобственный механизм поглощения, заключающийся в том, что эффективность поглощения процесса обработки определяется количеством и характеристиками дефектов, определяющими оптическое качество материала.

Разрушение при локальном поглощении лазерного излучения в прозрачном твёрдом теле происходит при превышении растягивающими напряжениями предела прочности материала. Трещина формируется по механизму отрыва. Критериями лазерного разрушения по механизму образования трещины является превышение температурой и скоростью изменения температуры материала критической величины, определяемой термостойкостью детали. С использованием параметров лазерного излучения, критериями появления разрушения является превышение интенсивностью критической величины, определяемой свойствами материала.

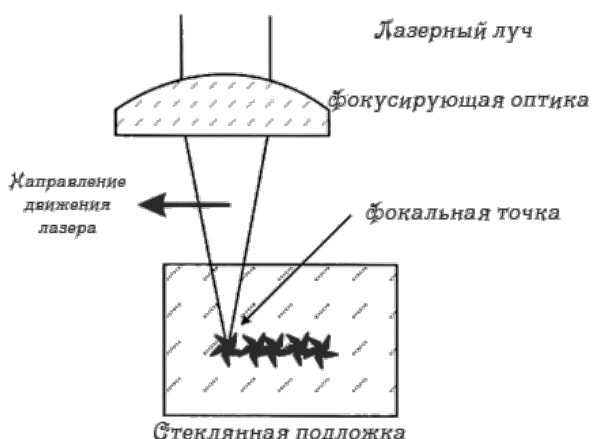


Рисунок 1. Принцип локального разрушения стекланных материалов лазерным излучением [8]

Одним из критических параметров, определяющих появление и размер разрушения в объёме и на поверхности прозрачного материала, является поглощённая энергия излучения. Она связана с размером разрушения и энергией, затраченной на разрушение.

Помимо критериев разрушения следует рассматривать временные параметры и характеристики лазерного излучения, оказывающие влияние на результат взаимодействия излучения с материалом. К ним относятся [9] длительность импульса τ и временная форма импульса $I(\tau)$. Длительность импульса излучения в случае обработки излучением прозрачных хрупких материалов может влиять лишь на морфологию разрушения.

Следует принимать во внимание, что обработка материала происходит посредством многоимпульсной обработки. Её следует рассматривать применительно к двум случаям:

- 1) при облучении материала с плотностью мощности, недостаточной для модификации материала (допороговой),
- 2) с плотностью мощности, превышающей пороговую для разрушения материала.

Прочность многих прозрачных хрупких материалов в режиме многоимпульсного лазерного облучения обычно значительно ниже их прочности при одноимпульсном лазерном облучении. Такое снижение стойкости к настоящему времени обнаружено в материалах различных типов: в силикатных стёклах, кристаллах и даже полимерах. Физические причины снижения прочности в режиме многократного облучения могут быть связаны как с вероятностной природой разрушения, так и с накоплением необратимых изменений в материале под действием излучения.

При интенсивностях излучения ниже пороговой, катастрофического роста поглощения и разрушения материала за один импульс не происходит. В то же время, в нем могут происходить необратимые изменения, обусловленные динамическими и остаточными термоупругими напряжениями.

Таким образом, под воздействием интенсивного лазерного излучения при многоимпульсном режиме происходит разрушение в материале из-за растягивающего, остаточного термоупругого и динамического напряжений.

Драгоценные камни

Развитие маркировки драгоценных камней было спровоцировано давлением со стороны производителей во избежание возможных подделок и создания показателя качества (метки) или естественности происхождения изделия.

Основным параметром в области обработки драгоценных камней является вводимая энергия. Она же и определяет видимость наносимого изображения и его яркость. Что же касается длительности импульса, то «читаемость»/чёткость картинки определяется их количеством и перекрытием по слоям.

В последнее время больше распространено применение твердотельных лазеров Nd:YAG с длиной волны излучения 355 нм. Но, всё же, применимость каждой из установок определяется конечными требованиями и условиями обработки [10].

Для нанесения маркировки обычно используется процесс абляции с применением эксимерного лазера [7] позволяющего вносить невидимые метки на окольцовку бриллианта. Характерным размером получаемого разрушения считались маркировки с получаемыми размерами дефектов в промежутке от 30 мкм до 150 мкм на глубине около 1-10 мкм. Однако требуется уменьшение термического напряжения, чтобы избежать возможного появления трещин, а так же увеличения поглощения ультрафиолета. Данное условие выполнялось путём уменьшения ЗТВ и общего ввода тепла.

Эксперименты и обсуждения

Как уже говорилось, поглощательная способность материала определяет возможность применения того или иного лазера для различных целей (рисунок 2). Разнообразие материалов даёт достаточно хорошее представление о числе возможных длин волн для нанесения маркировки. Одним из наиболее перспективных способов нанесения маркировки (по итогам анализа спроса на использование маркированных деталей)– это нанесение изображения (рисунка, надписи) внутри детали.

Поскольку среди прозрачных диэлектриков весьма распространено стекло, то в данном случае будем использовать его как базовый элемент для исследования. Из широкого спектра типов стёкол выберем наиболее удобный и известный с точки зрения исследования и применения для маркировки – оптическое стекло марки К8 (рисунок 2).

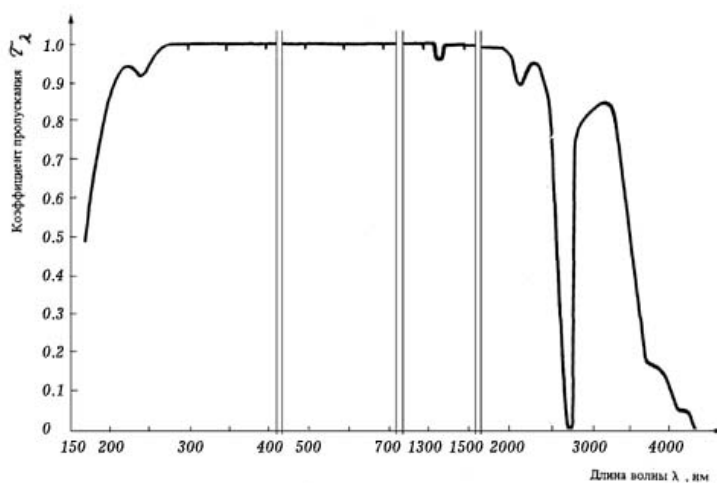


Рисунок 2. Спектральная кривая коэффициента пропускания оптического кварцевого стекла марки К8

Итак, одной из наиболее важных характеристик лазерного излучения является длина волны. При пороговых значениях разрушения (плотности энергии) для различных длин волн был проведён ряд экспериментов по определению их влияния на размер дефекта. Поскольку поглощательная способность данного материала разнообразна для каждой из этих длин волн, то было принято решение о выборе наиболее выгодного места положения дефекта на глубине не более 1 мм от поверхности материала.

Как и предполагалось, при увеличении длины волны излучения в диапазоне длин волн от ультрафиолета до дальнего инфракрасного излучения, изменяется размер дефекта в сторону увеличения (образующая дефекта) (рисунок 3), так же как и диаметр сфокусированного луча. Поглощательная способность материала в области ультрафиолетового излучения крайне велика, а возможный диаметр луча достаточно мал, так что нанесение изображения возможно только на небольшой глубине, но с малым размером получаемого дефекта. В области видимого – ИК излучения пропускная способность данного материала достигает 90 %, но благодаря возможности фокусировки и концентрации достаточного уровня плотности энергии можно наносить маркировку практически на любой глубине (определяется возможностями лазера) данного материала. Однако необходимо учитывать степенное изменение размера дефекта с увеличением длины волны.

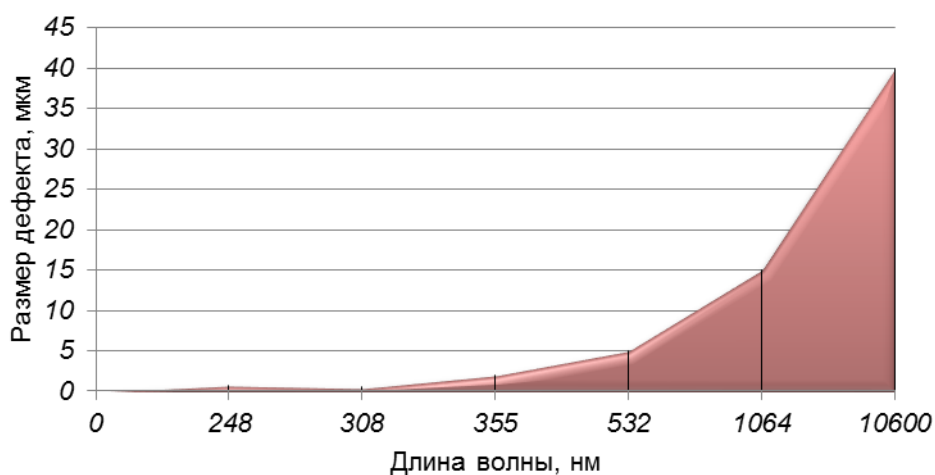


Рисунок 3. Зависимость среднего размера дефекта от длины волны излучения при пороговых значениях плотности энергии для каждой длины волны для стекла марки К8

Таким образом, рисунок 3 можно использовать как рекомендации по подбору лазера в зависимости от требуемого среднего размера образующей дефекта. Хотелось бы отметить, что при выборе длины волны излучения необходимо руководствоваться

параметрами читаемости наносимого изображения и учитывать, что нанесение изображений ультрафиолетовым излучением возможно лишь на незначительной глубине материала.

Если говорить о применимости данных положений к другим материалам, например к драгоценным камням, то фактически, при проверке полученной зависимости, были выявлены схожие результаты.

Полимеры

Развитие лазерных технологий быстро растёт и в области маркировки (кодирования) пластиков. Разнообразие пластиков идеально подходит для их обработки лазерным излучением с точки зрения подбора длины волны, которая может как поглощаться, так и полностью проходить насквозь. Благодаря возможности фокусировки излучения в пятно малого размера и большой концентрации энергии стало возможным уменьшить обрабатываемую зону при маркировке, и соответственно улучшилось и качество получаемого маркированного слоя, однако его зависимость от толщины изделия остаётся достаточно важным фактором. [11]

Маркировка полимеров энергией излучения была впервые упомянута в 1956 – за 4 года до изобретения лазера. Рентгеновское излучение, излучение альфа-частиц, гамма-лучей и высокоэнергетических электронов ранее использовались для облучения материала, вызывая горение и химические изменения в материалах. Широкий диапазон промышленного использования показывает важность применения для этого лазерных установок. Полимеры могут маркироваться несколькими разными способами с применением лазеров (абляция, карбонизация, плавление, обесцвечивание и т.д.).

Данные процессы основываются на изменении структуры полимера посредством какого-либо изменения положения углерода в строении молекулы. Под воздействием лазерного излучения определённой длины волны и энергии в материале происходят локальные изменения структуры и свойств, необходимые для последующей регистрации произошедших изменений облучённого материала

Область воздействия выбирается как можно более малой, но вместе с тем достаточной для её обнаружения техническими средствами, применяемыми для этого. В данных областях у материала под воздействием длин волн, как правило, УФ диапазона, не относящихся к видимому свету, а так же к общедоступным источникам излучения, изменяются оптические свойства (коэффициент пропускания). Но обнаружение эффекта изменения свойств напрямую невозможно, так как для его выявления необходимы некоторые дополнительные сведения, путём сравнения с которыми и обнаруживается

эффект. С помощью нанесения множества точек в определённом порядке возможно получение целого скрытого изображения или рисунка. Но необходимо заметить, что регистрация этого изображения потребует дополнительного оборудования. Важной является некоторая точка отсчёта для последующего поиска изображения, так как никакими другими способами она не обнаруживается [6]. Ей может быть какая-либо видимая отметка.

При прохождении электромагнитной волны через вещество, энергия возбуждённых колебаний частично может переходить во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения, имеющего другой спектральный состав или другое направление распространения, что приводит к поглощению световой волны. Данный эффект так же описывается законом Бугера – Ламберта (1) и он справедлив для не очень мощных источников излучения.

Всем светопрозрачным материалам при их идеальной высококогерентной микроструктуре и абсолютном отсутствии примесей присуще собственное фундаментальное светопоглощение. При поглощении света в УФ и видимой части спектра электромагнитных волн происходит возбуждение электронных оболочек молекул. Поглощение сопровождается переходом молекулы из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией. Энергия возбуждения электронной оболочки молекулы на порядки превосходит энергию возбуждения её колебаний.

В молекулах каждому электронному уровню соответствует набор колебательно-вращательных уровней. Электронный переход всегда сопровождается изменением колебательно-вращательного состояния молекулы, что приводит к появлению широких полос в спектре поглощения. Положение каждой полосы определяется разностью энергий электронных уровней молекулы.

При взаимодействии полимерных молекул со световыми потоками происходит поглощение фотонов, что провоцирует развитие фотохимических превращений. Фото- и фотохимическая деструкция полимеров протекает по механизму, близкому к хорошо изученному радикальному механизму окисления углеводов.

Эксперименты и обсуждения

Ранее были приведены данные по нанесению изображений в полимерных материалах для подтверждения качества продукции. Для выявления возможности маркировки полимеров были проведены исследования [7] по определению длины волны, мощности и времени воздействия излучения.

В качестве основных используемых способов маркировки можно выделить абляцию, маркировку с добавлением присадок, окисление, плавление, карбонизация, вспенивание, обесцвечивание, цветование, дегидратация и т.д. Для каждого из них был подобран свой тип лазера и параметры [7]. Так, например, длина волны излучения 532 нм и длительность импульса около 10 нс используются для маркировки вспениванием, мы же, в свою очередь, провели исследование по нанесению изображения путём карбонизации и проверили возможность использования такого способа для нанесения меток на полимерную продукцию.

Исследование по определению возможности нанесения маркировки и выявлению длительности воздействия проводилось на твердотельном лазере Nd:YVO₄, работающем на длине волны излучения 532 нм (2-я гармоника), со средней мощностью излучения 1 Вт и длительностью импульса 7 нс. Длительность воздействия на одну точку определялась опытным методом с началом появления видимых изменений (почернения).

По результатам экспериментов было выявлено, что способ нанесения меток методом карбонизации действительно возможен, но недостаточно целесообразен с точки зрения временных затрат. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что маркировка полимеров с использованием лазера на заданных параметрах 532 нм, 8 нс возможна методом карбонизации, но наиболее эффективна с применением маркировки вспениванием полимеров.

Выводы

Были выявлены ключевые параметры и механизмы воздействия лазерного излучения на прозрачные диэлектрики. Проведён ряд исследований для стеклянных материалов, позволяющих дать рекомендации по выбору различных длин волн излучения для нанесения изображения на требуемых условиях. Для полимерных материалов было сделано экспериментальное заключение о возможности использования второй гармоники твердотельного лазера в маркировке.

Список используемой литературы

1. Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Нечитайло В.С. Исследование объёмного лазерного разрушения и рассеяния света в кристаллах и стёклах //Труды ФИАН. - 1978. - Т. 101. - С. 31-74.

2. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Взаимосвязь характеристик лазерного разрушения в статистической теории //Квантовая электроника. - 2000. - Т. 30, № 7. - С. 592-596.
3. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Эффективность различных механизмов лазерного разрушения прозрачных твёрдых тел //Квантовая электроника. - 2002. - Т. 32, № 7. - С. 623-628.
4. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности //Квантовая электроника. - 2002. - Т. 32, № 4. - С. 335-340.
5. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. «Квантовая электроника», 25, № 3 (1998) Термоупругий и абляционный механизмы лазерного повреждения поверхности прозрачных твёрдых тел.
6. William M. Steen. Laser Material Processing, 4th Edition, Jyotirmoy Mazumder, Springer, 2010, 566 p.
7. Bosman J., Processes and strategies for solid state Q-switch laser marking of polymers, Velden, The Netherlands, 2007, 243 p.
8. Bismarck A. Microstructuring of Glasses Dagmar Hulsenberg, Alf Harnisch, , Springer, Springer Series in materials science, 2008, 336p.
9. Иванов И.В. Разработка и исследование способа разделения прозрачных хрупких диэлектрических материалов излучением лазера на парах меди: Диссертация канд.техн.наук, Москва, 2006.
10. Wehner M. Marking. Eximer Laser Technology, 2005, Part II, 321-330.
11. Ronald M. Harris, Coloring technology for Plastics, Plastics Design Library, 1999, 333 p.

Features of interaction of laser radiation with transparent dielectrics.

77-30569/325485

03, March 2012

Grigor'yanc A.G., Bogdanova M.A.

Bauman Moscow State Technical University

Mawylka@list.ru

Mt12@bmstu.ru

This work is dedicated to key specifications of laser emission and ways of their application for labeling transparent dielectrics. On the basis the analysis of literature data and studies of all possibilities of applying laser emission for labeling different materials, the authors propose to investigate the influence of emission wavelength on the size of the obtained defect inside the material, and also to conduct some studies regarding the possibility of applying the existing methods for concrete equipment.

Publications with keywords: [jewels](#), [marking](#), [insulator](#), [laser](#), [glass](#), [transparent](#), [interaction](#), [laser radiation](#), [flaw](#), [polymers](#)

Publications with words: [jewels](#), [marking](#), [insulator](#), [laser](#), [glass](#), [transparent](#), [interaction](#), [laser radiation](#), [flaw](#), [polymers](#)

References

1. Danileiko Iu.K., Manenkov A.A., Nechitailo V.S. Issledovanie ob"emnogo lazernogo razrusheniia i rasseianiia sveta v kristallakh i steklakh [Investigation of bulk laser damage and light scattering in crystals and glasses]. *Trudy FIAN* [Proc. Lebedev Phys. Inst., RAS], 1978, vol. 101, pp. 34-74.
2. Koldunov M.F., Manenkov A.A., Pokotilo I.L. Vzaimosviaz' kharakteristik lazernogo razrusheniia v statisticheskoi teorii [Interrelation of the laser-induced damage characteristics in statistical theory]. *Kvantovaia elektronika*, 2000, vol. 30, no. 7, pp. 592-596.
3. Koldunov M.F., Manenkov A.A., Pokotilo I.L. Effektivnost' razlichnykh mekhanizmov lazernogo razrusheniia prozrachnykh tverdykh tel [Efficiency of various mechanisms of the laser damage in transparent solids]. *Kvantovaia elektronika*, 2002, vol. 32, no. 7, pp. 623-628.
4. Koldunov M.F., Manenkov A.A., Pokotilo I.L. Mekhanicheskoe razrushenie prozrachnykh tverdykh tel lazernymi impul'sami raznoi dlitel'nosti [Mechanical damage in transparent solids caused by laser pulses of different durations]. *Kvantovaia elektronika*, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 335-340.

5. Koldunov M.F., Manenkov A.A., Pokotilo I.L. Termouprugii i abliatsionnyi mekhanizmy lazernogo povrezhdeniia poverkhnosti prozrachnykh tverdykh tel [Thermoelastic and ablation mechanisms of laser damage to the surfaces of transparent solids]. *Kvantovaya elektronika*, 1998, vol. 25, no. 3, pp. 269-273.
6. Steen W.M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. 4th Ed. London, Springer, 2010. 576 p.
7. Bosman J. *Processes and strategies for solid state Q-switch laser marking of polymers*. Velden, The Netherlands, 2007. 243 p.
8. Hulsenberg D., Harnisch A., Bismarck A. *Microstructuring of Glasses*. Berlin, Springer-Verlag, 2008. 336 p. (Springer Series in Materials Science).
9. Ivanov I.V. *Razrabotka i issledovanie sposoba razdeleniia prozrachnykh khrupkikh dielektricheskikh materialov izlucheniem lazera na parakh medi*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and development of ways to separate fragile transparent dielectric materials by laser radiation of copper vapor. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2006. 157 p.
10. Wehner M. Marking. *Eximer laser technology*. Berlin, Springer-Verlag, 2004, pt. 2, pp. 321-330.
11. Harris R.M. *Coloring technology for plastics*. Norwich, Plastics Design Library, 1999. 336 p.