ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 58563— 2019 (ISO/TR 22588:2005)

Оптика и фотоника

ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Методы измерения поглощения оптическими компонентами

(ISO/TR 22588:2005, Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Measurement and evaluation of absorption-induced effects in laser optical components, MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт физической оптики, оптики лазеров и информационных оптических систем Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ФГУП «НИИФООЛИОС ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 296 «Оптика и фотоника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27сентября 2019 г. № 811-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному документу ISO/TR 22588:2005 «Оптика и фотоника. Лазеры и связанное с ними оборудование. Измерения и оценка воздействия абсорбции на оптические компоненты» (ISO/TR 22588:2005 «Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Measurement and evaluation of absorption-induced effects in laser optical components», MOD) путем внесения технических отклонений, которые выделены по тексту курсивом, а также изменения его структуры для приведения в соответствие с правилами, установленными в ГОСТ 1.5—2001 (подразделы 4.2 и 4.3).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного документа приведено в дополнительном приложении ДА.

Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДБ

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

6 Некоторые элементы настоящего стандарта могут быть объектами патентных прав. Международная организация по стандартизации (ИСО) не несет ответственности за установление подлинности каких-либо или всех таких патентных прав

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2005 — Все права сохраняются
© Стандартинформ, оформление, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Поглощение 2
4 Искажение 8
5 Показатель преломления и двулучепреломления 12
6 Распространение пучка 14
7 Значение порога лазерного разрушения (*ПЛР*) 15
8 Пояснение 16
Приложение ДА (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного документа 17
Приложение ДБ (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 18
Библиография 19

Введение

В настоящем стандарте представлены стандартные методы измерения поглощения, позволяющие избежать конфликтных ситуаций между пользователями и поставщиками оптических компонентов.

При падении лазерного пучка на оптический компонент происходит поглощение определенного количества энергии. В зависимости от интенсивности лазерного пучка и поглощающей способности материала компонента температура компонента будет повышаться неравномерно. Даже если лазерный пучок с равномерным распределением интенсивности заполняет всю площадь компонента, на поверхности будут созданы температурные градиенты. За исключением случаев, когда материал имеет незначительный коэффициент расширения, температурные градиенты приводят к формированию относительного расширения, в результате чего возникают искажение, деформация и изменение свойств двулучепреломления компонентов. Показатель преломления большинства оптических материалов также зависит от температуры. При изменении формы оптической поверхности компонента в большинстве случаев будет изменена форма и/или расходимость прошедшего и/или отраженного пучка. Если траектория пучка включает поляризатор, разветвитель пучка или дефлектор пучка, выходная мощность/энергия и/или распространение пучка в лазерной системе могут изменяться. Эти эффекты могут увеличиваться, если компонент жестко сжат. При значительной деформации на компоненте могут образоваться трещины.

Коэффициенты поглощения большинства материалов, как правило, с повышением температуры становятся только слабо нелинейными. Однако пропускающие компоненты, выполненные из полупроводящих материалов, имеют нелинейные коэффициенты поглощения с четкими пороговыми значениями, которые значительно ниже температуры плавления материала. Это явление называют «термическим разгоном», и оно эффективно ограничивает нагрузку по оптической мощности, при которой данные материалы используют. Пороговое значение термического разгона сопровождается резким увеличением поглощения, искажения и появлением тепловой линзы. Показатели преломления и коэффициенты линейного расширения чувствительны к изменениям температуры, но не обязательно имеют одинаковые знаки.

Искажение возникает при неравномерном облучении компонента, и особенно если он сильно сжат и его расширение затруднено. Материал будет расширяться вследствие тепловой нагрузки, и, если она неравномерная, компонент будет изгибаться или на нем образуется линза, что приведет к изменению формы оптической поверхности. Кроме того, в случае пропускающих компонентов существует вероятность того, что температурная зависимость показателя преломления материала приведет к эффекту тепловой линзы. В целом неравномерное расширение приводит к изменению фокусирующих свойств компонента. В случае нелинейных абсорбирующих окон и зеркал (например, Ge, ZnS и ZnSe, используемые с инфракрасными пучками) обнаружено, что рассмотренные эффекты оказывают значительное влияние на расходимость прошедшего пучка. В случае плоских отражающих интерферометрических компонентов наблюдалось образование выпуклой поверхности. На практике даже незначительное искажение лазерных компонентов приводит к изменениям расходимости и коэффициента распространения лазерного пучка, а также к потере выходной мощности излучения лазера.

Напряжение в кристаллических компонентах приводит к индуцированному двулучепреломлению и, таким образом, к изменениям свойств пропускания/отражения, в результате чего образуются флюктуации в выходных характеристиках системы. Даже однородные материалы могут демонстрировать двулучепреломление в случае неравномерной тепловой нагрузки и крепления компонента, затрудняющего расширение материала. Выходная мощность лазера с оптически тонкими лазерными стержнями с накачкой импульсной лампой в непосредственной близости со стержнем или в эллиптическом квантроне обусловлена индуцированным двулучепреломлением с круговой симметрией. Изменения в двулучепреломлении обычно приводят к изменениям пропускания лазерного луча через систему, особенно если в последовательности пучков имеются элементы, чувствительные к поляризации.

Деформация, вызванная нагревом в результате неравномерного облучения, может возникнуть даже в случае свободно установленных компонентов. Однако большую часть оптических компонентов монтируют на держателе, который используют для контроля углового положения компонента. Если данный крепеж препятствует относительному расширению, это приведет к возрастающей деформации компонента при его облучении. Когда деформация достигнет предела упругости, на компоненте образуются трещины. Возможно, это одна из главных причин чрезвычайно низких пороговых значений разрушения, вызванного лазерным излучением. В основном эффект обнаруживают в лазерных системах с высокой частотой повторения импульсов, длинными импульсами и непрерывным излучением. Де-

формация, вызванная нагревом в результате жесткого крепления компонента при монтаже и/или отсутствии зазора для теплового расширения, компонента или комбинации креплений, возможно, является наиболее значимой причиной отказа лазерных компонентов в составе оптической системы. Вызванная деформация приводит либо к образованию трещин в компоненте, либо к снижению тепловой нагрузки, при которой возникает плавление.

Эффекты, вызванные нагревом, сводятся к минимуму, если компонент удерживается свободно, и доводятся до максимума при сильном сжатии. Наведенное внутреннее напряжение материала может быть положительным или отрицательным в зависимости от относительной разности коэффициентов теплового расширения между держателем и компонентом. Поскольку этот фактор является определяющим, необходимо выполнить измерение с компонентом, установленным в держателе, при условиях, максимально приближенных к рабочим условиям системы и окружающей среды. На практике данный факт может сделать затруднительным или невозможным выполнение некоторых предлагаемых измерений. Таким образом, несмотря на то что измерение искажения является самым основным и актуальным, может потребоваться контроль изменений двулучепреломления или изменений коэффициента распространения прошедшего пучка. При этом определение изменения пороговых значений разрушения, вызванного лазерным излучением, между свободными и сжатыми компонентами, не будет обычным, т. к. данное разрушение является катастрофическим.

Все указанные эффекты приводят к сокращению срока службы компонента и/или изменению выходных характеристик лазерного излучения [1]. Они также формируют основной источник разногласий между поставщиками компонентов и изготовителями/пользователями лазерной системы. Как правило, эффекты обнаруживаются в случае лазерных систем с высокой частотой повторения импульсов, длинными импульсами и непрерывным излучением (например, технологические лазеры для сварки). Однако также наблюдалось их влияние на выходную мощность/энергию импульсных Nd:YAG-лазеров однократного действия с модулированной добротностью, работающих на 1,064 мкм, и на пропускание и отклоняющую способность плоских окон Ge под облучением короткими импульсами CO_2-лазера с излучением на длине волны 10,6 мкм.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Оптика и фотоника

ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Методы измерения поглощения оптическими компонентами

Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment.
Methods for measurement of absorption-induced effects in laser optical components

Дата введения — 2020—09—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает стандартные методы измерения и оценки воздействия поглощения, вызванного лазерами, на оптические компоненты.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 8.745/ISO/TR 14999-2:2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 2. Измерения и методика оценки результатов

ГОСТ Р 58370 (ИСО 21254-2:2011) Оптика и фотоника. Лазеры и лазерное оборудование. Методы определения порога лазерного разрушения. Часть 2. Определение порогового значения

ГОСТ Р ИСО 11551 Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методика измерений коэффициента поглощения лазерного излучения оптическими элементами

ГОСТ Р ИСО 12005 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Поляризация

ГОСТ Р ИСО 11146-1 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки

ГОСТ Р ИСО 11146-2 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 2. Астигматические пучки

ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, специфика их распространения и методики измерений

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения

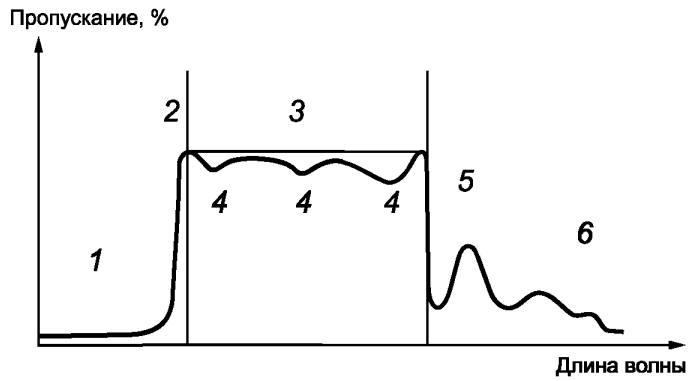
Издание официальное

(принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Поглощение

3.1 Общая информация

Поглощение является фундаментальным свойством материала и непосредственно связано с его электронной структурой и длиной волны зондирующего излучения, а поглощение пропускающих излучение материалов — с шириной запрещенной зоны. Спектральное пропускание материала схематически представлено на рисунке 1. Точное расположение и интервал разных границ поглощения зависят от структуры материала, включая примеси. Если для оптических окон используют материалы, пропускающие излучение в видимой области спектра, коэффициент поглощения незначительный и слабо изменяется при повышении температуры. У материалов, пропускающих ультрафиолетовое или инфракрасное излучение, коэффициент поглощения значительный и его влияние учитывают. Кроме того, во многих, но не во всех случаях материалы, пропускающие инфракрасное излучение, являются полупроводниками и имеют нелинейное оптическое поглощение. Так, при низких или комнатных температурах такие материалы обладают слабой поглощающей способностью, но при повышенных температурах имеют порог термического разгона. При превышении пороговой температуры коэффициент поглощения резко возрастает, а пропускная способность окна снижается. Кроме того, любая нелинейность в зоне падающего пучка проявляется в эффекте линзы, которая может существенно изменять качество пучка.



1 — электронное поглощение; *2* — край фундаментального поглощения; *3* — прозрачная область; *4* — примесное поглощение; *5* — поглощение свободными носителями; *6* — поглощение на колебаниях кристаллической решетки

Рисунок 1 — Спектральное пропускание стандартных оптических материалов

В настоящее время большинство пропускающих оптических материалов окон являются однородными. Однако на поглощение в материалах могут оказывать сильное влияние примеси, локализованные и диффузионно распределенные в объеме материала. Причины возникновения поглощения можно разделить на ряд воздействий.

3.1.1 Объемное поглощение

Интенсивность волны будет изменяться по закону Бугера и вычисляться по формуле

$$I(x) = I_0\, e^{-ax}, \qquad (1)$$

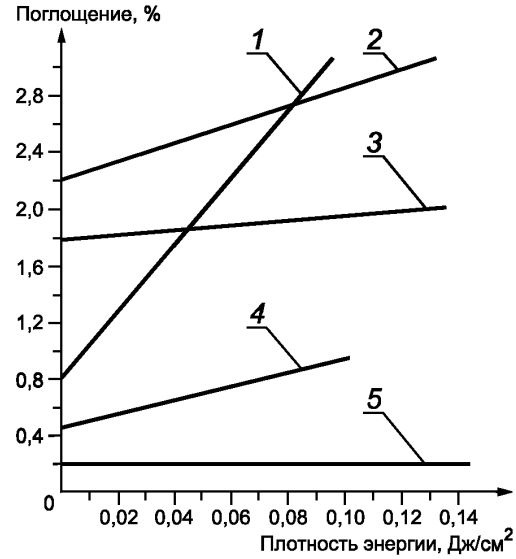
где I_0 — интенсивность волны на входе в среду.

Объемное поглощение может быть постоянным или индуцируемым. Например, поглощение в видимой области может быть вызвано поглощением ультрафиолетового излучения, образующим центры

окраски (захват электронов в вакансиях отрицательно заряженных ионов). Как правило, это происходит в галогенидах (хлорид натрия и калия), а также в лазерном кристалле Nd:YAG. Последний пример является причиной, по которой многие Nd:YAG-лазеры со временем постепенно теряют выходную мощность и в связи с чем целесообразно оснащать ламповый квантрон Nd:YAG-лазера ультрафиолетовым фильтром. В большинстве случаев центры окраски могут быть уничтожены соответствующей термической обработкой.

Поглощение является функцией как электронной структуры материала, так и длины волны излучения. Если энергия фотона достаточно велика для того, чтобы преодолеть запрещенную зону между валентной зоной и зоной проводимости, возникает однофотонное поглощение. Это в большей степени зависит от длины волны зондирующего излучения и не зависит от плотности энергии (закон Бера). Двухфотонное поглощение может возникнуть при одновременном поглощении двух фотонов и в том случае, если сумма энергий превышает ширину запрещенной зоны. Данный процесс является линейно зависимым от плотности энергии при постоянной длине импульса.

Многофотонное поглощение может возникнуть при одновременном поглощении фотонов и в том случае, если сумма энергии фотонов превышает ширину запрещенной зоны. Данный процесс становится более вероятным по мере уменьшения длины импульса, но при неизменности плотности суммарной энергии. Также существует промежуточная длина поглощения, где электроны, поднятые до уровней энергии внутри запрещенной зоны, могут поглощать затем второй фотон и, таким образом, населять зону проводимости [2]. На рисунке 2 показано сравнение поглощающих свойств образцов CaF_2 при излучении с длиной волны 248, 193 и 157 нм. Нижняя кривая (для излучения с длиной волны 248 нм) указывает на постоянное поглощение, свидетельствующее об отсутствии двух- или трехфотонного поглощения. Для излучения с длиной волны 193 нм имеет место сильное энергозависимое поглощение, указывающее на двухфотонное поглощение; для излучения с длиной волны 157 нм — только слабое двухфотонное поглощение, т. к. суммарная энергия двух фотонов превышает уровень вакуума. Однако линейное поглощение при излучении с длиной волны 157 нм приблизительно в три раза выше, чем при излучении с длиной волны 193 нм. Как видно на рисунке 2, на котором приведены данные, полученные для двух разных образцов, поглощение существенно зависит от образцов. Это подтверждается измерениями, результат которых представлен на рисунке 3 графиком зависимости нелинейного поглощения $\beta_{эфф}$ разных образцов относительно их линейного поглощения A_0.



1 — образец А при излучении 193 нм; *2* — образец А при излучении 157 нм;
3 — образец В при излучении 157 нм; *4* — образец В при излучении 193 нм; *5* — образец при излучении 248 нм

Рисунок 2 — Сравнение коэффициента поглощения в зависимости от энергии импульса и длины волны для двух разных образцов CaF_2



Рисунок 3 — Зависимости коэффициентов линейного и нелинейного поглощения для разных образцов CaF_2

Следует отметить наличие линейного соотношения, что указывает на доминирующий процесс двухступенчатого поглощения в отличие от собственного двухфотонного поглощения. Подтверждением данного анализа служит сравнение $\beta_{эфф}$ в зависимости от длительности импульса τ, которое также показывает линейное соотношение (см. рисунок 4).

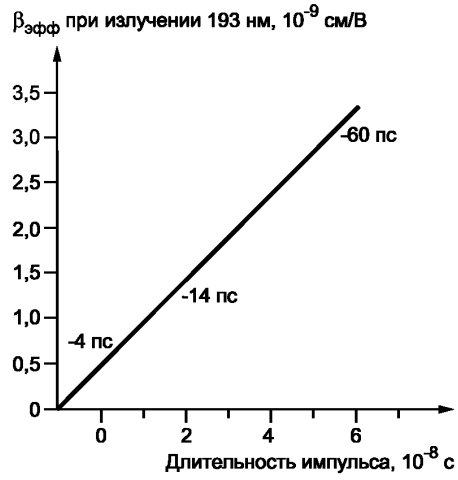
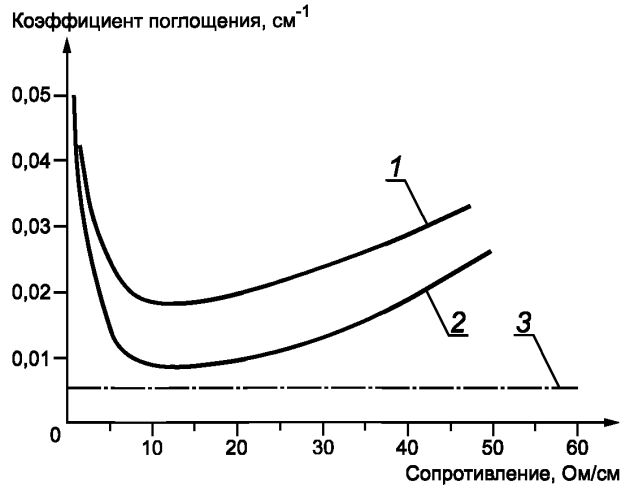


Рисунок 4 — Сравнение коэффициентов двухфотонного поглощения для образцов CaF_2 при излучении 193 нм

3.1.2 Поверхностное поглощение

Возникновению повышенного поглощения способствует наличие царапин выколок и абсорбированных загрязнений. Не всегда можно очистить поверхность от подобного вида загрязнений, приводящих к поверхностному поглощению без ее разрушения. На рисунке 5 показано поглощение, измеренное как функция удельного сопротивления для монокристаллического германия *n*-типа [3].



1 — поглощение в воздухе; *2* — поглощение в вакууме;
3 — теоретический предел фононного поглощения

Рисунок 5 — Коэффициент поглощения германия *n*-типа как функция сопротивления в окружающей среде и в условиях вакуума

Верхняя кривая отображает поглощение, измеренное в воздухе, а нижняя — поглощение, измеренное в вакууме. Анализ показал, что германиевая поверхность в воздухе имеет слой воды толщиной 100 мкм, абсорбированной этой поверхностью. Дальнейшие эксперименты указывали на то, что данный слой воды можно временно удалить путем осушки или очистки, но он достаточно быстро возвращается в прежнее состояние, если оставить компонент во влажной атмосфере.

3.1.3 Подповерхностное поглощение

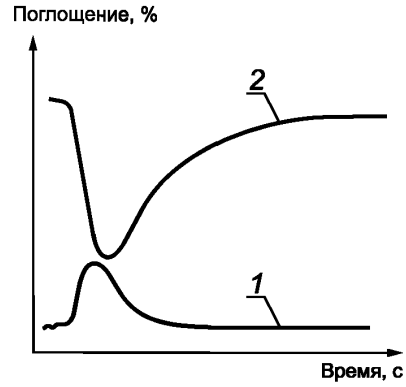
Обработка поверхности материала приводит к ее деформации и, как было доказано, к образованию разрушенного слоя. Такими способами, как полировка, травление и отжиг, можно удалить разрушенный слой, однако, как правило, остаются следы от воздействия. При неправильном выборе некоторых полировочных материалов прямо под поверхностью может остаться слой материла с повышенным поглощением.

3.1.4 Локализованное поглощение

Некоторые материалы содержат вкрапления отдельных частиц, распределенных по всему объему. Если частицы менее микрона, то повышается объемное поглощение этого материала. Если частицы немного больше, они могут поглощать излучение без нагрева основы материала. В этих случаях возникнет разностная деформация, что приводит к катастрофическому разрушению. Поглощающие платиновые включения — обычное явление в ранее производимом лазерном стекле, легированном неодимом. Частицы пыли и разориентированные кристаллиты являются основной проблемой в выращенных из растворов и в природных кристаллах.

3.1.5 Динамическое поглощение

Центры окраски могут приводить к возникновению поглощения, зависящего от интенсивности. Это обнаружено в кварцевом стекле [4], рубине [5], [6], в лазерных кристаллах Nd:YAG [3] и MgF_2 [2]. Поглощение на центрах окраски может иметь низкое значение в обычных режимах работы, но оно может увеличиваться и иметь существенное значение при высокой интенсивности излучения. На рисунке 6 представлено динамическое поглощение в лазерном стержне Nd:YAG, измеренное на длине волны 0,63 мкм (нижняя кривая), и поглощение в лазерном стержне Nd:YAG, который подвергался импульсной накачке (верхняя кривая). Дополнительное поглощение возникает при высокой интенсивности излучения.



1 — поглощение при облучении Nd:YAG ксеноновой лампой накачки;
2 — поглощение без дополнительного облучения

Рисунок 6 — Поглощение в лазерном стержне Nd:YAG на длине волны 0,63 мкм

Индуцированное поглощение в MgF_2 [2], измеренное на длине волны 193 нм, показано на рисунке 7 в виде зависимости от интенсивности зондирующего излучения. Этот рисунок показывает зависимость двухфотонного поглощения от энергии и повышение поглощения в зависимости от уровня излучения.

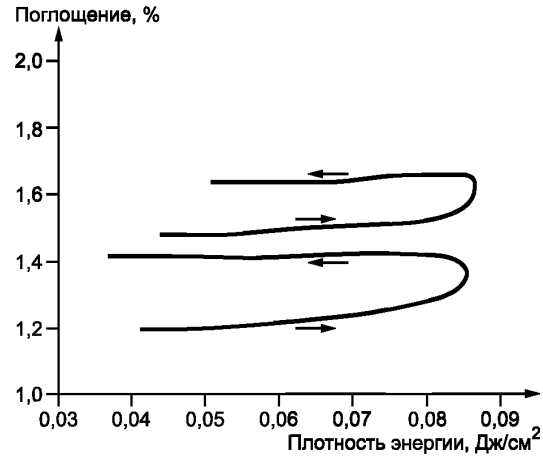


Рисунок 7 — Поведение поглощения MgF_2, измеренного при длине волны излучения 193 нм

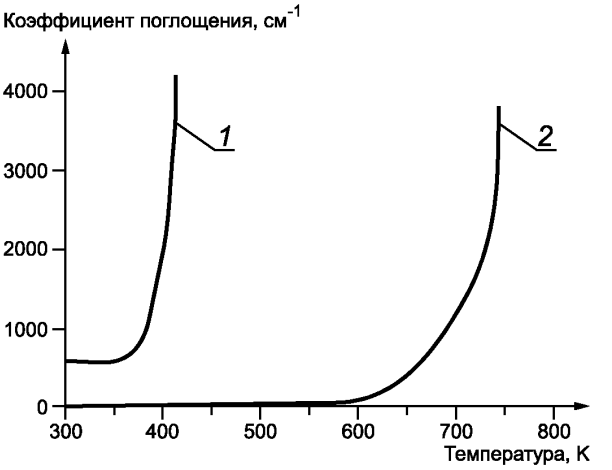
3.1.6 Нелинейное поглощение

Стимулированное бриллюэновское и рамановское рассеяние или многофотонное поглощение могут возникать при высоких уровнях оптической интенсивности. Эти эффекты возникают во многих оптических волокнах и эффективно ограничивают пропускание этих материалов для входящего лазерного излучения.

3.1.7 Поглощение, обусловленное свободными электронами

Данное нелинейное поглощение возникает во всех полупроводниках и приводит к термически нелинейному поглощению и термическому разгону. Температура термического разгона, как правило, находится значительно ниже температуры плавления полупроводящего материала, но сильно ограничи-

вает применение этого материала. На рисунке 8 показаны кривые поглощения, измеренные на длине волны излучения 10,6 мкм, в виде функции температуры окружающей среды для германия и селенида цинка.



1 — германий; *2* — селенид цинка

Рисунок 8 — Коэффициент поглощения в зависимости от температуры окружающей среды

3.1.8 Поглощение, обусловленное электронной проводимостью

Поглощение в электронно-проводящих материалах, таких как металлы, является функцией плазменной частоты и, следовательно, подвержено влиянию температуры материала. Глубина обработки поверхностного слоя и теплопроводность оказывают преобладающее влияние на коэффициент поглощения металлических зеркал, хотя шероховатость поверхности также имеет значительное влияние [3] (см. рисунок 9). Это указывает на то, что по мере нагревания поверхности, поглощение усиливается, что в свою очередь приводит к дополнительному нагреванию, деформации и снижению значения порога лазерного разрушения (ПЛР). Однако данные воздействия можно уменьшить при достаточном охлаждении подложки.

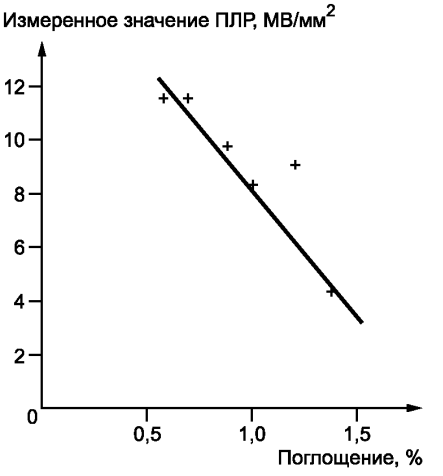


Рисунок 9 — Воздействие поглощения на значения ПЛР при длине волны излучения 10,6 мкм

3.2 Измерение поглощения

При соблюдении правил можно выполнить измерения поглощения оптических компонентов в различных лабораториях. Процедура измерений описана в *ГОСТ Р ИСО 11551*.

Основные проблемы при получении достоверных единых результатов измерений поглощения оптических компонентов:

- попытки измерения со слишком маленьким или большим размером зондирующего пятна. Излучение, рассеянное краями компонента, добавит дополнительное измеренное значение поглощения. Наличие твердых частиц или поверхностных царапин может вызвать увеличение в поглощении, в частности если зондирующее пятно сравнимо с неоднородностью. Если измеряемый оптический компонент не будет равномерно однородным, размер зондирующего пятна и его размещение могут играть существенную роль;
- различия в калибровке. Необходимо, чтобы «стандартный» образец, при его использовании, был детально охарактеризован и испытан;
- проведение измерений допустимо с использованием импульсного или непрерывного зондирующего излучения. Следует учитывать, что проводимость образца может влиять на измеряемую температуру. Необходимо отметить, что если используют более точную процедуру импульсного измерения, целесообразнее проводить измерения в диапазоне различных длительностей зондирующих импульсов и/или уровней энергии импульса для обеспечения того, чтобы различия между температуропроводностью образца и эталона не приводили к неправильным измерениям;
- измерение поглощения следует проводить при одинаковых условиях окружающей среды и на тех же длинах волн. Результаты измерений, проводимых в вакууме и на открытом воздухе, могут быть совершенно разными, т. к. большинство поверхностей адсорбируют воду. Водяной пар сильно поглощает определенные длины волн в инфракрасном диапазоне. На практике рекомендуется проводить измерения в условиях, идентичных условиям системы, в которой должны использоваться компоненты.

4 Искажение

4.1 Общая информация

При облучении оптического компонента лазерным пучком материал на оси лазерного пучка будет расширяться из-за нагрева вследствие поглощения излучения. Вероятнее всего, границы компонента будут оставаться холодными из-за отвода тепла остальной частью системы.

Показательный пример эффекта (обратимого) тепловой линзы в кварцевом стекле при облучении лазерным пучком с длиной волны 193 нм опубликован в работе [2]. Измерения проведены с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана путем пропускания коллимированного зондирующего пучка излучения с длиной волны193 нм через центр образца.

При правильном расположении компонента и обеспечении возможности его расширения искажение может быть сведено к минимуму (весь компонент расширяется равномерно). Если компонент удерживается в сжимающем держателе, искажение может возникнуть как из-за неравномерного расширения, так и из-за ограничения, налагаемого держателем. При требовании измерения воздействия облучения на компонент в данной системе необходимо измерить искажение при тех же геометрии излучения и уровнях мощности, которые будут применены в конечной системе.

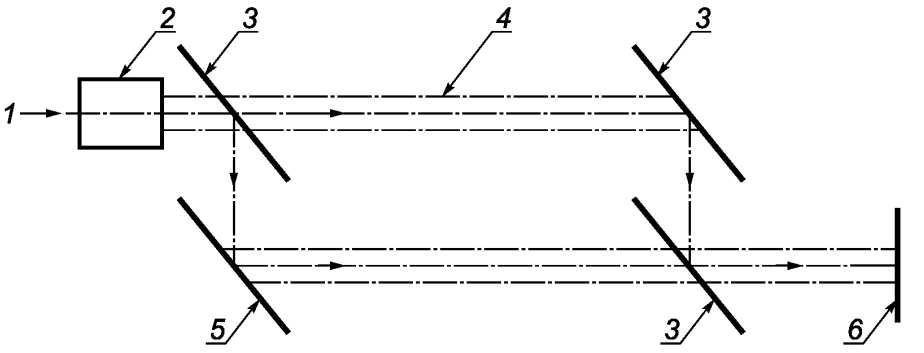
Три возможных варианта измерения:

- измерение искажения в условиях свободного крепления в держателе (данное измерение осуществляют относительно легко, т. к. уровни мощности облучения и геометрии могут быть воспроизведены. Однако на практике это не очень применимо, за исключением абсолютной максимальной мощности лазерного излучения, при которой излучение стабильно, при идеальном держателе);
- измерение искажений в держателе образца правильных размеров при уровнях облучения, аналогичных применяемым на практике;
- измерение искажения компонента внутри полной системы [выполнить данное измерение может быть чрезвычайно сложно. Тем не менее это последний случай, от которого зависит работа (характеристика) компонента].

4.2 Измерение искажения

Измерение искажений проводят интерферометром, выбранным по согласованию между изготовителем оптических компонентов и потребителем (см. *ГОСТ Р 8.745*). Держатель компонента должен

максимально соответствовать (или быть аналогичным) держателю системы. Простая схема интерферометра Майкельсона, в которой вместо одного из стандартных отражающих компонентов используют оптический компонент, представлена на рисунке 10. Определяют деформацию оптической поверхности компонента при его облучении в условиях, идентичных условиям работы конечной системы.



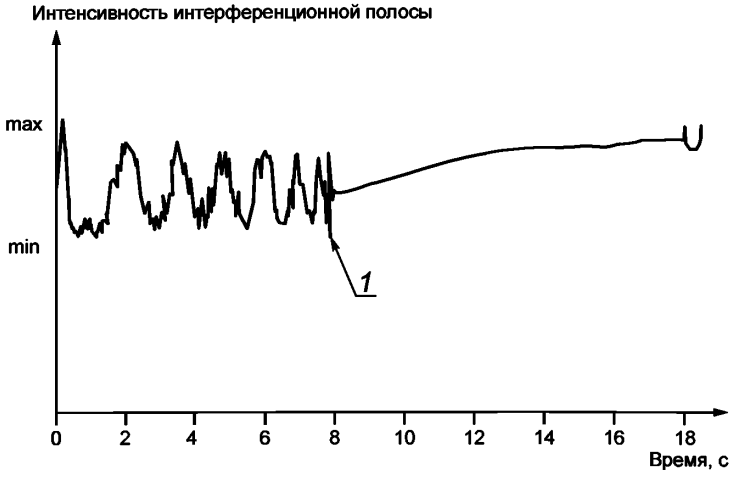
1 — лазерный пучок; *2* — оптическая система для коллимирования пучка; *3* — светоделитель; *4* — пучок излучения; *5* — испытуемое зеркало; *6* — детектор/экран

Рисунок 10 — Стандартная схема интерферометра Майкельсона

4.3 Пояснение

Измерения искажения, вызванного при облучении лазерного компонента, обычно не подтверждены документально. Предполагается, что большинство изготовителей не осознают важность этого эффекта или не хотят признавать тот факт, что их системы чувствительны к изменению температуры. Наиболее убедительны и подтверждены документально результаты исследований изготовителей гелий-неоновых лазеров в 1980-х годах, которые приложили значительные усилия для обеспечения того, чтобы выходная мощность лазеров не снижалась из-за теплового расширения компонентов. Ранее для стабилизации выходной мощности гелий-неонового лазера изготовители настаивали на необходимости времени прогрева, составляющее, например, 30 мин. По этой же причине рекомендовано применение железоникелевого сплава INVAR и керамического стекла ZERODURE в конструкции этих лазеров, а также покрытия зеркал — Spectrosil.

Проведенные измерения искажений, вызванных излучением с длиной волны 10,6 мкм с использованием CO_2-лазера непрерывного действия [3], показали, что свободно закрепленные металлические зеркала расширяются равномерно, тогда как свободно закрепленные германиевые подложки при расширении образуют выпуклую поверхность и в итоге сильно растрескиваются (см. рисунки 11 и 12). Кроме того, обнаружено, что германиевые заготовки разрушаются при более низких нагрузках по мощности, если расширение образца ограничено или если часть заготовки защищена от излучения.



1 — разрушение

Рисунок 11 — Полосы интерферометра Майкельсона, плоский германий

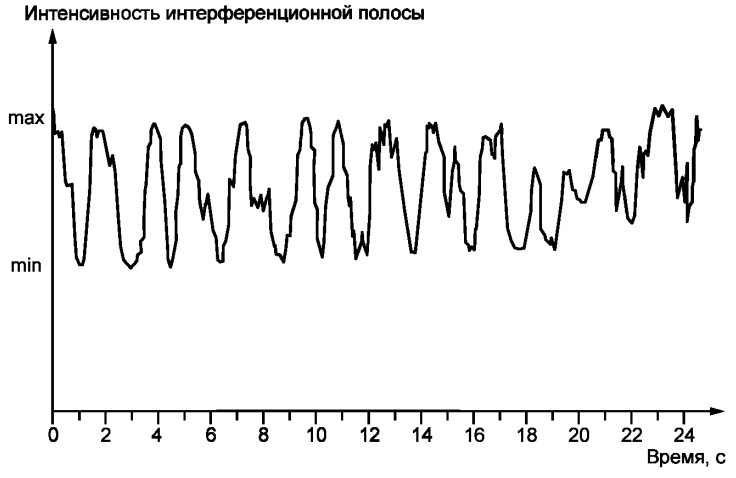


Рисунок 12 — Полосы интерферометра Майкельсона, медное зеркало

Измерение формы рубинового лазерного стержня (и последующей расходимости выходного пучка) при облучении импульсной лампой накачки в эллиптическом ламповом квантроне показало, что лазерный стержень (с плоским торцом) расширялся неравномерно. Результаты измерения показали, что к моменту открытия модулятора добротности стержень был оптически выпуклым и продолжал расширяться.

Поглощение излучения лазерного луча с пространственно-однородной интенсивностью приводит к градиенту температуры на поверхности оптического компонента, что вызывает изменение толщины и показателя преломления компонента [7]. Исследования показали, что фактором, определяющим возможность использования окна в виде плоскопараллельной пластины в длиннофокусной системе, будет являться оптическое искажение, а не разрушение, вызванное лазерным излучением. Анализ результатов экспериментов свидетельствует о том, что большая теплоемкость, малые поглощения, коэффициенты напряженности, показатель преломления и *dn/dT* более важны для границ применимости

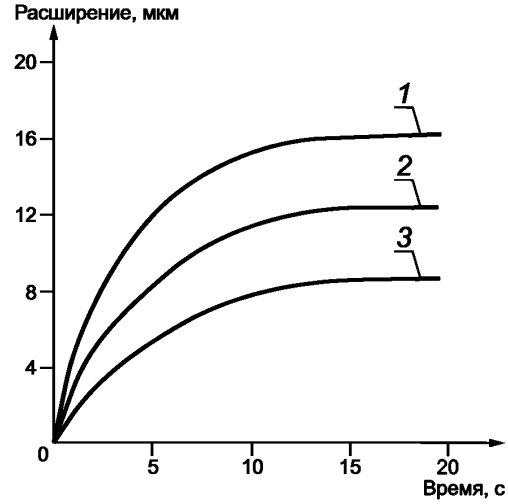
оптических окон, чем температура плавления, предел прочности на растяжение и модуль упругости, а также то, что общее искажение для ионных кристаллов, как правило, меньше, чем для ковалентных кристаллов.

Эксперимент по исследованию образования тепловой линзы в жидкости, помещенной в плоскопараллельную кювету [8], показал наличие неравномерного нагрева в поперечном направлении и его зависимость от времени облучения. Показатель преломления жидкости изменяется при нагревании вследствие уменьшения плотности с повышением температуры.

Эксперименты по исследованию деформации плоских металлических зеркал, стоящих в лазерных пучках [9], показали наличие термоупругих деформаций, приводящих к локальным изменениям в геометрии поверхности. Рассмотрены следующие три случая:

- при небольшом поглощении лазерной энергии и упругой температурной деформации поверхность расширялась неравномерно с образованием выпуклости. После выключения лазера зеркало приобрело прежнюю форму;
- более высоких энергиях лазерного излучения деформация зеркала проявлялась как остаточное расширение в виде волнистой структуры поверхности;
- превышении термически индуцированного напряжения предела прочности материала на поверхности зеркала образовались микротрещины, что в свою очередь привело к более высоким потерям энергии при отражении и к дальнейшему увеличению поглощения.

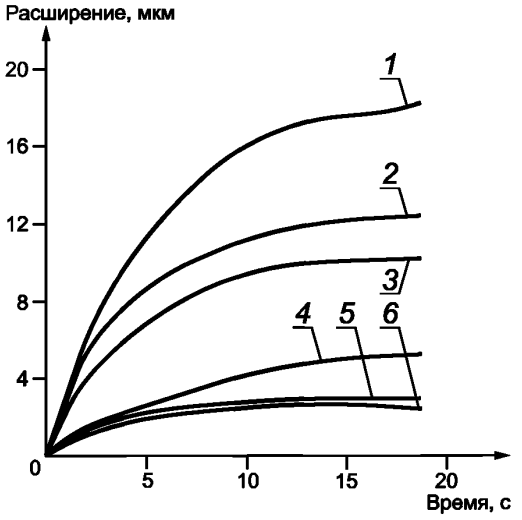
Во всех трех случаях поверхность зеркала теряла свое высококачественное оптическое состояние до того, как интенсивность падающего света была достаточной для расплавления материала отражающей поверхности. Именно поэтому максимальный поток, допустимый для данной отражающей поверхности, ниже, чем поток, вызывающий плавление поверхности. На рисунках 13 и 14 приведен пример результатов расчета зависимости величины термической деформации в центре металлического зеркала от времени при облучении его CO_2-лазером с непрерывным излучением (длина волны 10,6 мкм). На рисунке 13 представлена амплитуда расширения в центре алюминиевого зеркала при облучении пучком лазера мощностью 760 Вт непрерывного действия в зависимости от радиуса пучка.



1 — 0,2 см; *2* — 0,5 см; *3* — 1,0 см

Рисунок 13 — Расширение в центре алюминиевого зеркала как функция радиуса пучка

На рисунке 14 показаны кривые для зеркал, изготовленных из Ag, Al, Cu, Mg, Si/Au и стали/Au, при облучении пучком лазера мощностью 800 Вт и диаметром 0,9 см.



1 — сталь/Au; *2* — Mg; *3* — Al; *4* — Si/Au; *5* — Ag; *6* — Cu

Рисунок 14 — Расширение в центре зеркал, изготовленных из Ag, Al, Cu, Mg, Si/Au, стали/Au

5 Показатель преломления и двулучепреломления

5.1 Общая информация

Показатели преломления оптических материалов зависят от температуры. Это означает, что преломление света в материале изменяется по мере того, как материал нагревается или подвергается облучению. Изменение показателя преломления при изменении температуры для ряда оптических материалов включено в таблицу 1. Во-первых, следует отметить, что изменение показателя преломления при изменении температуры, как правило, влияет сильнее на излучение, чем изменение коэффициента линейного расширения, и, во-вторых, линейное расширение всегда увеличивается с ростом температуры, а изменения показателя преломления могут быть как положительными, так и отрицательными. Значения *dn/dT* ионных кристаллов — отрицательные, тогда как значения *dn/dT* ковалентных кристаллов — положительные.

Для исследования изменений оптического пути, облучаемого лазером компонента, использовалась лазерная доплеровская интерферометрия [10]. Показатель преломления изменяется в зависимости от температуры для высококачественного кристаллического материала, материала, полученного при химическом осаждении из газовой фазы (ХОГФ), и материала из сульфида цинка, полученного горячим прессованием.

Таблица 1 — Сводка оптических и физических параметров широко используемых оптических и лазерных пропускающих материалов

Материал	Показатель преломления n	Температурный коэффициент показателя преломления dn/dT, 10^{-6} K^{-1}	Температурный коэффициент линейного расширения dl/dT, 10^{-6} K^{-1}	Температурный коэффициент оптического пути, 10^{-6} K^{-1}	Окно прозрачности, мкм	Коэффициент поглощения α, $см^{-1}$	Теплопроводность k, Вт/(см·К)	Теплоемкость C, Дж/(г·К)	Температура плавления*, °С	Температуропроводность, $см^2/с$
Кварцевое стекло, SiO_2	1,45	12,0	0,51	12,30	От 0,25 до 2,70 включ.	10^{-4}	0,014	0,810	1610 s	0,0075
Линза BSC	1,51	2,5	7,10	6,17	От 0,3 до 2 включ.	10^{-3}	0,011	0,860	719 s	0,0051
Сапфир, Al_2O_3	1,76	13,0	5,60	17,30	От 0,2 до 4 включ.	$2 \cdot 10^{-4}$	0,460	0,720	2015 m	0,1600
Алмаз, C	2,40	4,0	—	—	—	10^{-4}	22,000	6,100	1000 g	1,0300
Nd^{3+}:YAG	1,83	7,6	6,30	12,80	От 0,35 до 3 включ.	Варьируется	0,140	0,480	1970 m	—
BaF_2	1,47	–16,7	18,10	–8,14	От 0,26 до 10 включ.	10^{-2}	0,110	0,410	1280 m	0,0550
CaF_2	1,43	–11,8	18,70	–3,60	От 0,3 до 9 включ.		0,095	0,860	1360 m	0,0350
NaCl	1,54	–32,2	40,00	–10,50	От 0,2 до 14 включ.	10^{-4}	0,070	0,690	801 d	0,0340
KCl	1,49	–30,0	36,90	–13,30	От 0,25 до 17 включ.				776 d	0,0470
Германий, Ge	4,00	396,0	5,70	413,00	От 2 до 15 включ.	$2 \cdot 10^{-2}$	0,670	0,310	50 tr	0,4100
Кремний, Si	3,42	150,0	2,60	156,00	От 1,5 до 7 включ.	10^{-2}	1,680	0,710	1410 m	1,0200
ZnS	2,20	41,0	6,40	53,00	От 0,7 до 15 включ.	0,24	1,720	0,490	700 tr	0,8600
ZnSe	2,40	62,0	7,70	92,00		0,2	0,170	0,300		0,1100
GaAs	3,30	319,0	5,66	333,00	От 1,4 до 12 включ.	$2 \cdot 10^{-3}$	0,480	0,270	500 tr	0,3300
CdTe	2,67	1,0	4,70	104,00	От 1 до 20 включ.	10^{-3}	0,075	0,184	1090 m	0,0700

*m (температура плавления), s (температура размягчения), d (разъединение), g (графитизация), tr (термический разгон).

Показано, что *dn/dT* выше для кристаллического материала и материала, полученного при ХОГФ (10^{-4} K^{-1}), чем для материала, полученного горячим прессованием ($5 \cdot 10^{-5}$ K^{-1}).

Когда оптический компонент подвергается неравномерному облучению или охлаждению из-за напряжений, возникающих в радиальном направлении, возникает двулучепреломление, что, как правило, влияет на любое проходящее излучение. На практике компонент с механическими напряжениями будет поляризовать проходящее излучение, при этом в одних случаях он будет отклонять проходящий пучок, а в других — изменение поляризации может влиять на пропускание пучка при дальнейшем распространении в оптической системе. Если двулучепреломление происходит внутри резонатора, это может сильно повлиять на выходную мощность лазера.

5.2 Измерение двулучепреломления

Целью измерения является контроль изменения поляризации прошедшего пучка в зависимости от его мощности. Измерения проводят по *ГОСТ Р ИСО 12005*.

5.3 Пояснение

При оптической накачке цилиндрического лазерного стержня внутри моноблочного квантрона распределение света накачки внутри активного элемента считается однородным. При охлаждении цилиндрического активного элемента из-за перепада температур между центром и краем возникают радиальные механические напряжения, которые обуславливают неоднородное двулучепреломление в активном элементе. Если лазер с модуляцией добротности и резонатор содержит поляризатор, то интенсивность выходного излучения лазера имеет неравномерное распределение по апертуре лазерного стержня. При пороговых значениях излучение лазера выходит из центра по оси, но по мере увеличения мощности накачки выходное излучение постепенно заполняет апертуру элемента ближе к периферийной зоне в виде кольца. К моменту насыщения выходной мощности большая часть излучения выходит из периферийной зоны апертуры стержня. Это объясняет, почему максимальная выходная мощность цилиндрического лазерного стержня ниже, чем можно было ожидать по объемным критериям.

Как только оптическая система станет анизоторопной, любое изменение в направлении или величине напряжения в компоненте будет отвечать за снижение выходной мощности системы. Показано, что многие комбинированные лазерные источники/приемники могут быть подвержены данному эффекту. Как правило, можно свести к минимуму изменение поляризации при тщательном проектировании оптических систем.

6 Распространение пучка

6.1 Общая информация

При прохождении лазерного пучка через оптический компонент форма этого компонента влияет на характеристики пучка. Если форма оптического компонента изменяется из-за поглощения излучения (расширения и т. п.), то параметры проходящего пучка изменятся. Поэтому цель данного измерения (испытания) состоит в том, чтобы контролировать изменение параметров проходящего или отраженного пучка в зависимости от его мощности. Как и в предыдущих случаях, данные испытания необходимо проводить, по возможности, в рабочих условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, существующим на практике.

Пространственные параметры пучка, которые наиболее важны для измерения, анализа и прогнозирования формы лазерного пучка, могут быть объединены для образования инварианта распространения. Другими словами, это обобщенный параметр, который не будет изменяться при прохождении пучка через безаберрационную оптическую систему. Одним из таких параметров является параметр распространения пучка M^2. *Это отношение произведения параметров фактического (с реальными модами) пучка лазера к произведению параметров основного гауссова пучка (TEM_{00}) аналогичной длины волны (см. ГОСТ Р ИСО 11146-1).* Наличие температурных искажений в компонентах оптической системы неизбежно приведет к увеличению значения M^2 пучка.

В неискаженной системе произведение диаметра пучка и его расходимости после прохождения через оптический компонент остается неизменным. В случае искажения расходимость и/или диаметр перетяжки итогового пучка увеличиваются.

6.2 Измерение характеристик распространения излучения

Измерения ширины пучка, угла расходимости и параметра распространения пучка проводят по *ГОСТ Р ИСО 11146-1, ГОСТ Р ИСО 11146-2* и *ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3*.

6.3 Пояснение

Согласно разделу 5, когда на лазерный стержень воздействуют импульсы накачки в эллиптическом ламповом квантроне, физическая форма стержня меняется, несмотря на равномерное распределение излучения накачки. Изменение физической формы стержня влияет на расходимость и выходную энергию излучения при изменении энергии накачки.

Тот факт, что параметр распространения пучка M^2 — это функция энергии накачки и/или энергии, генерируемой в лазере, является известным. Это уже давно известно специалистам, которые занимаются лазерными системами, где обычная практика — поддержание выходной мощности лазера на постоянном уровне и затем ослабление излучения вне резонатора вместо управления выходной мощностью путем изменения накачки. Полезным является пример изменения параметра распространения пучка в зависимости от выходной мощности (см. рисунок 15). На рисунке показано, что параметр распространения пучка для Nd:YAG-лазера непрерывного действия меняется в зависимости от значения 2 при низкой выходной мощности ниже 400 В до значения 3 при 1 кВт и свыше значения 20 при 6 кВт. Эти значения также соответствуют первоначальным исследованиям о выходных характеристиках рубиновых лазеров с импульсной накачкой и модуляцией добротности.

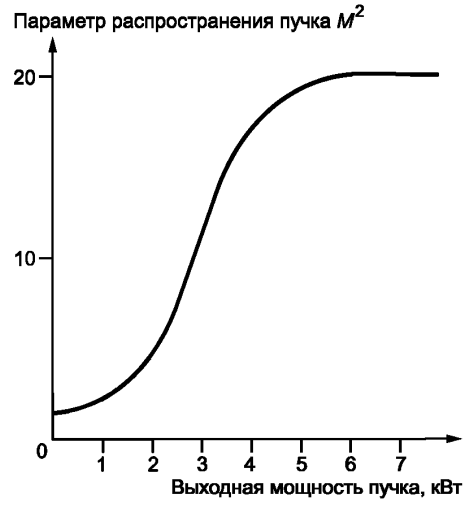


Рисунок 15 — Параметр распространения пучка M^2 в зависимости от выходной мощности

Увеличение параметра распространения пучка с уровнем выходной мощности/энергии может напрямую коррелировать как с формированием тепловой линзы, так и с напряжением, которое приводит к изменению двулучепреломления оптических элементов в тракте пучка.

7 Значение порога лазерного разрушения (*ПЛР*)

7.1 Общая информация

Когда оптический компонент облучается излучением с очень высоким уровнем мощности, поглощение, вероятно, повлечет за собой как деформацию, так и плавление. Точный уровень облучения, при котором это происходит, зависит от таких параметров, как длительность и форма импульса, размеры компонента и условия охлаждения. Если компонент закреплен специальным образом, порог для образования трещин, возможно, снизится и вполне может опуститься ниже порога плавления. Цель этого

измерения — определить уровень облучения, при котором компонент подвергается катастрофическому разрушению. Так как окончательное измерение направлено на определение катастрофического разрушения, его, предположительно, будут использовать редко. Однако можно проводить ограниченную процедуру для определения, действительно ли разрушение возникает на уровне ниже известного. Измерения выполняют в условиях проведения испытаний «1 на 1» (однократное действие), «С на 1» (многократное действие при низкой частоте повторения импульсов) или «R на 1» (многократное действие при заданной частоте повторения импульсов).

7.2 Измерения

Измерения для испытаний «1 на 1» и «С на 1» проводят по *ГОСТ Р 58370*.

7.3 Пояснение

В процессе реализации проекта CRAFT [11] обнаружено, что не только оптические компоненты поглощают энергию накачки и трескаются при чрезмерно высокой нагрузке по мощности, но также то, что, если компонент сжат в держателе, значение *ПЛР* было значительно ниже, чем в случае его закрепления более свободным способом. Прикладывание умеренного крутящего момента к зажиму держателя, который фиксирует линзу из селенида цинка в траектории пучка CO_2-лазера с непрерывным излучением, снижает плотность мощности непрерывного излучения при *ПЛР* с 3000 до 133 Вт/см^2.

В результате техническая характеристика и конструкция держателя компонента являются ключевыми факторами в определении того, какую мощность нагрузки может выдержать компонент без растрескивания. Доказано, что при плотной посадке компонента в держатель растрескивание происходит при более низких нагрузках по мощности, чем при свободном закреплении компонента.

8 Пояснение

Оптическая форма оптического и лазерного компонентов как внутри лазерного резонатора, так и внутри лазерной/оптической системы, как правило, изменяется во время генерирования лазерного излучения. Чаще всего это приводит либо к потере выходной мощности, либо к снижению эффективности лазера, либо к снижению пропускания системы по сравнению с возможным значением оптических характеристик компонентов, составляющих оптическую систему. Кроме того, расходимость пучка и/или состояние поляризации пучка могут зависеть от входной мощности. Компоненты могут быть разрушены при более низкой плотности мощности/энергии, чем ожидается исходя из отдельных испытаний ПЛР, выполненных с использованием свободно закрепленных компонентов. Измерения должны быть проведены для обоих способов закрепления. Кроме того, рекомендуется учитывать данные факторы при составлении производственных оптических технических требований для компонентов.

Приложение ДА
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного документа

Таблица ДА.1

Структура настоящего стандарта			Структура международного документа ISO/TR 22588:2005		
Разделы	Подразделы	Пункты	Разделы	Подразделы	Пункты
2	—	—	—	—	—
3	—	—	2	—	—
4	—	—	3	—	—
5	—	—	4	—	—
6	—	—	5	—	—
7	—	—	6	—	—
8	—	—	7	—	—

Примечание — Сопоставление структур стандартов приведено только для разделов 2—8, так как другие структурные элементы (за исключением предисловия) идентичны.

Приложение ДБ
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДБ.1

Обозначение ссылочного национального стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р 8.745—2011/ ISO/TR 14999-2:2005	IDT	ISO/TR 14999-2:2005 «Оптика и фотоника. Интерференционное измерение оптических элементов и систем. Часть 2. Измерения и методика оценки результатов»
ГОСТ Р 58370—2019 (ИСО 21254-2:2011)	MOD	ISO 21254-2:2011 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытаний пороговых значений повреждений, вызванных лазерным излучением. Часть 2. Определение порогового значения»
ГОСТ Р ИСО 11551—2015	IDT	ISO 11551:2003 «Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерное оборудование. Метод испытания для определения коэффициента поглощения оптических лазерных компонентов»
ГОСТ Р ИСО 12005—2013	IDT	ISO 12005:2003 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытаний для определения параметров лазерного луча. Поляризация»
ГОСТ Р ИСО 11146-1—2008	IDT	ISO 11146-1:2005 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытаний ширины, углов дивергенции и коэффициентов передачи лазерных лучей. Часть 1. Стигматические и простые астигматические пучки»
ГОСТ Р ИСО 11146-2—2008	IDT	ISO 11146-2:2005 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытаний ширины, углов дивергенции и коэффициентов передачи лазерных лучей. Часть 2. Общие астигматические пучки»
ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3—2008	IDT	ISO/TR 11146-3:2004 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытаний ширины, углов дивергенции и коэффициентов передачи лазерных лучей. Часть 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, специфика их распространения и методики измерений»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

Библиография

[1] Вуд Р.М. Аргументация в пользу стандартных измерений оптических компонентов, вмонтированных в лазерные системы, труды SPIE, том 5252, стр. 454—466, 2004 г.

[2] Манн К., Екерт Г., Горлинг К., Леинхос У., Шефер Б. Характеристика оптических компонентов дальнего и вакуумного УФ-излучения компонентов, труды SPIE, том 4691, стр. 1742—1752, 2002 г.

[3] Вуд Р.М., Лазерное повреждение в оптических материалах. 1986 г. изд. Адама Хильгера. Издание 2-е, 2003, изд. IOP

[4] Такке Р., Еврофотоника 10, 1999 г.

[5] Блисс Э.С., Специальное издание NBS 341, 1970 г., с. 105

[6] Гласс А.Дж., Гюнтер А.Г., Applied Optics 11, 1972 г., с. 832

[7] Спаркс М., Journal of Applied Physics, 42, 12; 1971, с. 5029

[8] Шэлдон С.Дж., Найт Л.В., Торн Дж.М., Applied Optics, 21, 9; 1982, с. 1663

[9] Апполонов В.В., Барчуков А.И., Прохоров А.М., Журнал IEEE по квантовой электронике, QE-10. 6; 1974, с. 505

[10] Скольник Л.Г., Кларк С.М., Applied Optics 13, 9; 1974, с. 1999

[11] Грининг Д., Opto&Laser Europe, июнь 1997, с. 41

УДК 681.7:621.389:006.354 ОКС 31.260

Ключевые слова: оптика и фотоника, лазеры, лазеры и лазерное оборудование, методы измерения поглощения, оптические компоненты

БЗ 10—2019/51

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 03.10.2019. Подписано в печать 14.10.2019. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,70.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru