

Владимирский государственный университет

**К. С. ХОРЬКОВ А. Н. ЗОЛОТОВ
А. В. ХАРЬКОВА**

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

Владимир 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

К. С. ХОРЬКОВ А. Н. ЗОЛОТОВ
А. В. ХАРЬКОВА

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

Электронное издание



Владимир 2025

ISBN 978-5-9984-2273-7

© Хорьков К. С., Золотов А. Н.,
Харькова А. В., 2025

УДК 621.378

ББК 32.86

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук, доцент
зав. кафедрой лазерных и оптико-электронных систем
Ковровской государственной технологической академии
имени В. А. Дегтярева
С. А. Солохин

Кандидат технических наук, доцент
зав. кафедрой общей и прикладной физики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. В. Дорожков

Хорьков, К. С. Лазерные технологии [Электронный ресурс] : практикум / К. С. Хорьков, А. Н. Золотов, А. В. Харькова ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2025. – 82 с. – ISBN 978-5-9984-2273-7. – Электрон. дан. (2,07 Мб). – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод DVD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит теоретический материал, 11 практических работ и задачи по обучению студентов практическому применению лазерных технологий и систем. Материал систематизирован.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 12.03.05, 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также может быть полезен для подготовки специалистов других технических направлений.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 8. Ил. 31. Библиогр.: 18 назв.

ISBN 978-5-9984-2273-7

© Хорьков К. С., Золотов А. Н.,
Харькова А. В., 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ..... | 6 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ..... | 22 |
| Практическая работа № 1..... | 22 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ | 22 |
| Практическая работа № 2..... | 26 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА | 26 |
| Практическая работа № 3..... | 31 |
| ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЕГО ФОКУСИРОВКЕ В ОПТОВОЛОКНО | 31 |
| Практическая работа № 4..... | 39 |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ | 39 |
| Практическая работа № 5..... | 42 |
| ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ПОМОЩИ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ..... | 42 |
| Практическая работа № 6..... | 46 |
| ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ | 46 |
| Практическая работа № 7..... | 51 |
| ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ | 51 |
| Практическая работа № 8..... | 55 |
| ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ПЕРФОРАЦИЮ ОТВЕРСТИЙ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ | 55 |

| | |
|---|-----------|
| Практическая работа № 9..... | 59 |
| РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ | 59 |
| Практическая работа № 10..... | 62 |
| СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ..... | 62 |
| Практическая работа № 11..... | 68 |
| ЗАПИСЬ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ | 68 |
| ЗАДАЧИ..... | 77 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 79 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ | 80 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область лазерных технологий занимает одну из лидирующих позиций в контексте современных производств. Современные лазерные установки могут решать различные задачи в зависимости от области их применения – коррективки зрения до космической техники.

Особенно востребованы лазерные технологии в производственной отрасли. С помощью лазера производится максимально точная резка металлов и других материалов высокой плотности. Такие технологии применяются, в частности, в области обработки различных типов поверхностей, в том числе для гравировки, сварки, маркировки изделий, в микроэлектронике для сверления сверхтонких отверстий в платах. Для того чтобы эффективно применять лазерные технологии, необходимо не только владеть знаниями основных физических процессов, принципов работы лазерных устройств, но и уметь применять теорию на практике в зависимости от поставленных задач.

Обучающиеся имеют возможность выполнять практические работы на имеющемся специальном лазерном оборудовании во Владимирском государственном университете.

Практикум содержит теоретический материал и рекомендации для выполнения работ, это позволяет обучающимся получить экспериментальные навыки работы с лазерным оборудованием, применять полученные знания для решения прикладных задач лазерных технологий.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Взаимодействие лазерного излучения с веществом является одной из значимых областей научных исследований современной оптики и лазерной физики. Благодаря этому направлению стало возможно существенным образом расширить границы представления о базовых фотофизических процессах, которые происходят в конденсированных средах при воздействии интенсивных световых потоков различных длительностей или разных длинах волн. Кроме того, вследствие изучения лазерного излучения стало возможно разработать множество направлений, смежных с лазерами и их применениями в технологии, а также разработать их физические основы, без знания которых невозможно полноценные исследования с использованием лазерной техники – необходимо знать основные закономерности лазерного воздействия на вещество.

Лазерное излучение представляет собой вид электромагнитного излучения, генерируемого в оптическом диапазоне длин волн 0,1...1000 мкм. Отличие его от других видов излучения заключается в монохромности, когерентности и высокой степени направленности. Основным механизмом любого лазерного воздействия в первую очередь является локальный нагрев, то есть передачей энергии электромагнитной волны в вещество. На рис. 1 показаны возможные направления, в которых может происходить взаимодействие лазерного излучения и вещества.

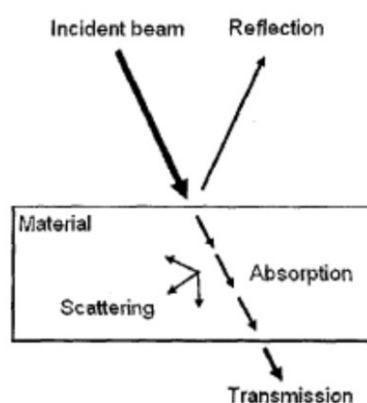


Рис. 1. Варианты воздействия лазерного излучения на вещество, где присутствуют следующие обозначения: Transmission – обозначает пропускание, Scattering – рассеяние, Absorption – значит поглощение, Reflection представляет отражение

При взаимодействии с проводниками электромагнитная волна затухает в скин-слое (он же – тонкий поверхностный слой) металла, при этом задействованы исключительно электроны проводимости. Несмотря на то, что при лазерной обработке тепло проникает вглубь материала на несколько порядков больше величины скин-слоя, все равно остается практически на поверхности металла, следовательно, тепловой источник в вычислениях считается поверхностным. То, как будет взаимодействовать свет с металлами, зависит от наличия достаточного количества «свободных» электронов, то есть таких, которые слабо связаны с кристаллической решеткой. Множество электронов проводимости получило название электронного газа. В металлах концентрация свободных электронов достаточно высокая – примерно $10^{22} \dots 10^{23} \text{ см}^{-3}$. При этом свободные электроны имеют способность отражения волн – при пропадании электромагнитной волны на проводник они колеблются, излучая вторичные волны, а те при сложении дают отраженную волну [1].

Любой процесс воздействия лазерного излучения на проводники (полупроводники, диэлектрики – то есть на любое твердое непрозрачное тело) можно описать тремя основными стадиями: нагреванием без фазового перехода, ионизацией испаряемого вещества и образованием плазмы. Например, при нагревании без изменения фазового состояния основными явлениями являются отражение и поглощение излучения поверхностью, а также продвижение тепла внутрь нагреваемого объекта за счет теплопроводности. На рис. 2 представлены различные физические эффекты, сопровождающие воздействие лазерного излучения на вещество.

При этом стоит помнить, что не существует твердого тела с идеально ровной поверхностью – она всегда будет «испорчена» физическими, химическими или индуцированными неоднородностями. К химическим неоднородностям относят дефекты, появившиеся вследствие наличия примесей в любом, даже самом чистом веществе. Индуцированные неоднородности появляются из-за атомов, ионов или молекул воздуха, которые осаждаются на поверхность. Физические неоднородности представляют собой нарушение целостности кристаллической решетки и образовании вакансий, влияющих на адсорбционную способность поверхности.

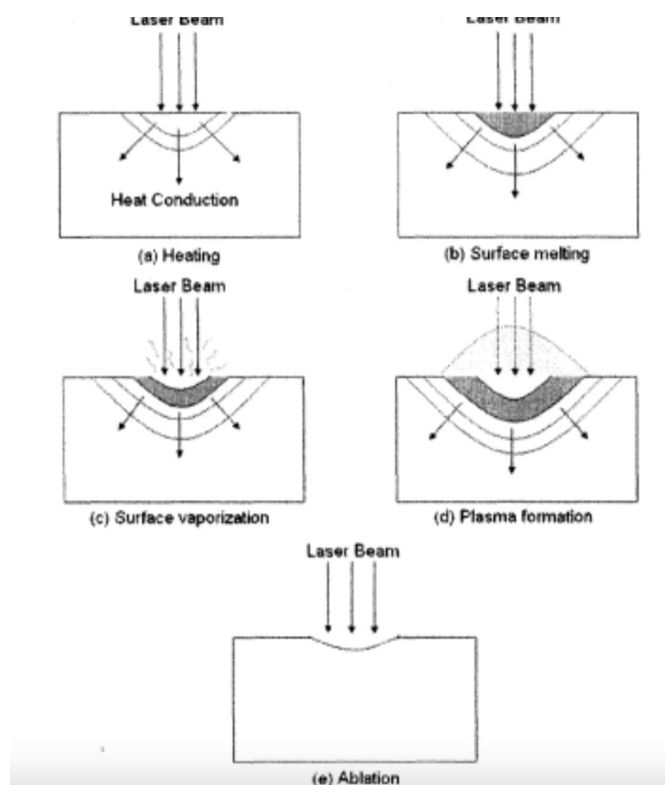


Рис. 2. Физические явления, являющиеся результатами взаимодействия вещества и лазерного излучения: (а) – нагревание, (б) – плавление приповерхностного слоя вещества, (с) – испарение вещества с поверхности, (д) – образование плазмы, (е) – образование кратера

Кроме того, нагрев поверхности, в любом случае сопровождающий лазерное воздействие на вещество, может стать причиной появления облака пара, которое качественно изменит процесс взаимодействия лазера и металла – пары могут поглотить излучение, экранируя нагреваемую поверхность от источника излучения, либо они могут быть ионизированы под действием лазера, вследствие чего излучение будет поглощаться плазмой, либо может возникнуть оптический пробой.

Особенности воздействия ультракоротких лазерных импульсов на вещество

При наносекундной лазерной (импульсы высокой интенсивности) абляции материал (поверхность) обрабатываемой мишени достигает сначала точки плавления, а затем испарения, причем материал испаряется после формирования расплавленного слоя путем нагрева и распространения высоких температур вглубь мишени.

При пикосекундной абляции (импульсы низкой импульсивности) практически вся энергия излучения поглощается свободными электронами за счет обратного тормозного излучения. Кроме того, в отличие от наносекундных импульсов, расплавленный слой образуется внутри мишени.

Фемтосекундное воздействие на мишень кардинально отличается от воздействия наносекундными или пикосекундными импульсами. В последних основным «инструментом» являются вскипание и испарение, тогда как при ультракоротких импульсах главным механизмом является десорбция частиц с поверхности мишени, лавинная ионизация, неравновесное электронное и колебательное возбуждение вещества мишени. Кроме того, при воздействии фемтосекундными импульсами электроны охлаждаются быстрее, чем при импульсах высокой и низкой интенсивности за счет передачи энергии решетки в связи с тем, что длительность импульса на порядок меньше времени релаксации электронов. На рис. 3 показаны основные фундаментальные явления, которые возникают при воздействии длинных и ультракоротких лазерных импульсов на непрозрачное твердое тело [2].

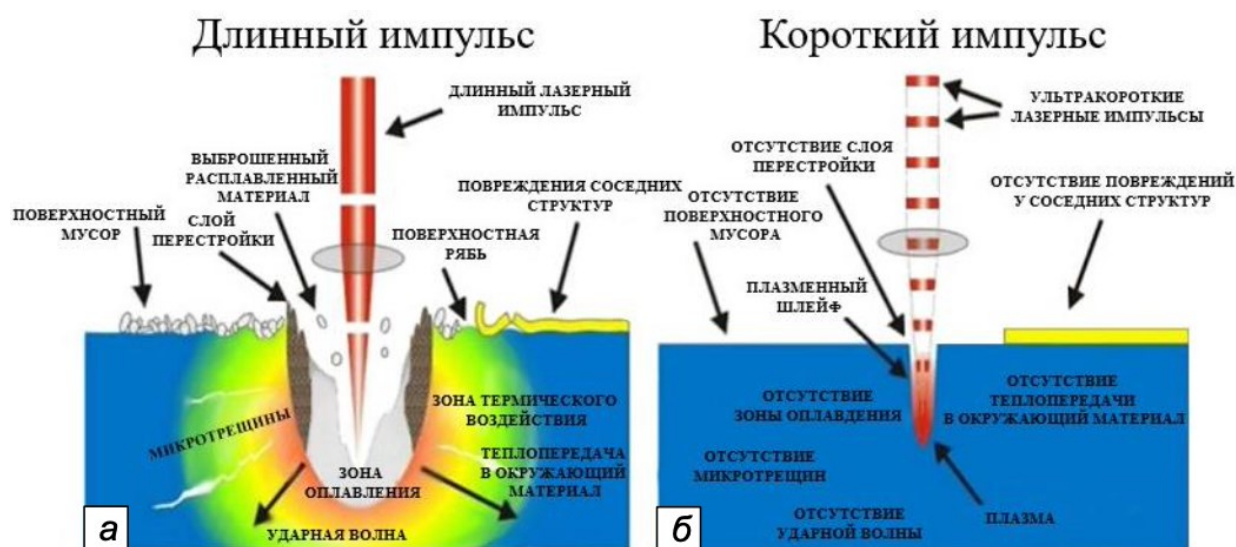


Рис. 3. Схема физических процессов при: а) длинном импульсе, б) ультракоротком импульсе

Распространение фемтосекундных лазеров за последние двадцать лет послужило причиной увеличения количества задач, которые решаются с их помощью. Изначально они использовались исключительно

для физических исследований, а сегодня получили широкое распространение в спектре прикладных задач в сферах науки, техники или биомедицинских технологий.

Главной особенностью фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) является то, что световая энергия концентрируется в малом временном интервале, то есть импульс имеет длительность около 10 фемтосекунд или даже меньше ($1\text{ фс} = 10^{-15}$ секунд). При этом пиковая мощность импульса в несколько десятков раз превышает мощность любого источника на Земле (или даже их совокупность). Другой особенностью является способность ультракороткого лазерного излучения исследовать быстропротекающие релаксационные процессы – обмен тепла между кристаллической решеткой проводника и электронами проводимости [3].

Кроме того, ФЛИ используется для высокоточной обработки различных материалов благодаря сочетанию высокой мощности и низкой расходимости лазерного излучения, что делает возможным концентрации световой энергии в малом объеме. На рис. 4 показано пространственное распределение интенсивности в фокусе в виде гауссовой формы.

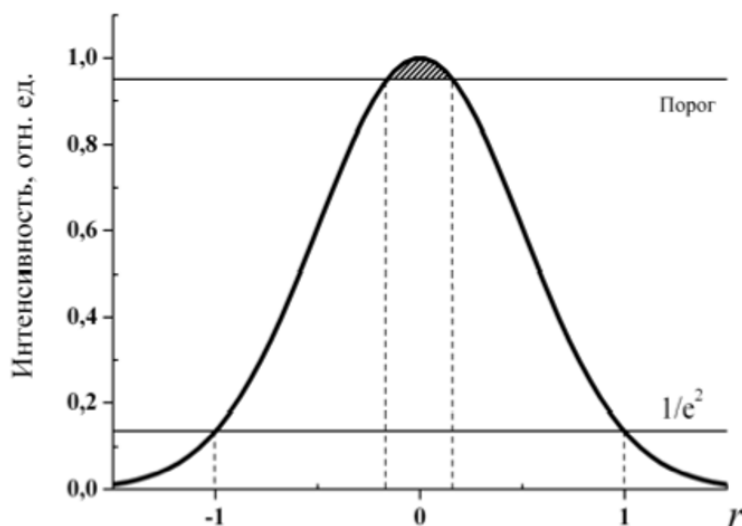


Рис. 4. Характерный вид распределения интенсивности излучения в фокальном пятне

Отличительной особенностью ФЛИ является возможность получения резких границ (на субмикронном уровне) на поверхности обра-

батываемой мишени в силу того, что тепло от лазерного импульса просто не успевает распространиться на большие расстояния от места воздействия, а частицы вещества удаляются с поверхности в форме плазмы или пара, а не в расплавленном виде.

Эта специфика фемтосекундного лазерного воздействия сделала его незаменимым помощником в сфере работы с живыми клетками, которые особо чувствительны к любому воздействию извне. В биологии ультракороткие импульсы используются для создания микронных отверстий в мембранах клеток для введения, к примеру, молекул ДНК. Что важно, при таких манипуляциях клетка остается живой, более того, продолжает функционировать. Симбиоз биотехнологий и нанотехнологий стал причиной появления инновационной области – клеточной инженерии и клеточной хирургии.

Получение микро- и наноструктур, обладающих особыми и необходимыми для поставленных целей свойствами, стало возможно благодаря использованию лазерного излучения ультракороткой длительности. Совокупность такой длительности импульсов и высокой пиковой мощности позволило создать определенную среду в поле воздействия лазера, в которой стало возможно изменять свойства материала и сам материал, что послужило открытию новых возможностей для обработки разнообразных материалов, в том числе проводников, полупроводников и диэлектриков [4-5].

Фемтосекундные лазерные импульсы широко распространены для получения коллоидных растворов, модификации различных материалов, наноструктурирования или осаждения тонких пленок [6-18]. Следует также иметь в виду, что лазерно-индуцированное облако и его формирование зависит от вида абляции и индивидуальным для нано-, пико- и фемтосекундного излучения.

В исследованиях [2-3] изучены и представлены временные диаграммы последовательности физических процессов лазерной абляции разных импульсов – схема представлена на рис. 5.

Ультракороткие лазерные импульсы имеют очевидное преимущество перед более длинными. Во-первых, площадь локализации фемтосекундного импульса мала в связи с тем, что на временах порядка длительности лазерного импульса теплопроводность и газодинамический отклик материала пренебрежительно малы (ко всему прочему, размерами площади локализации импульса можно управлять).

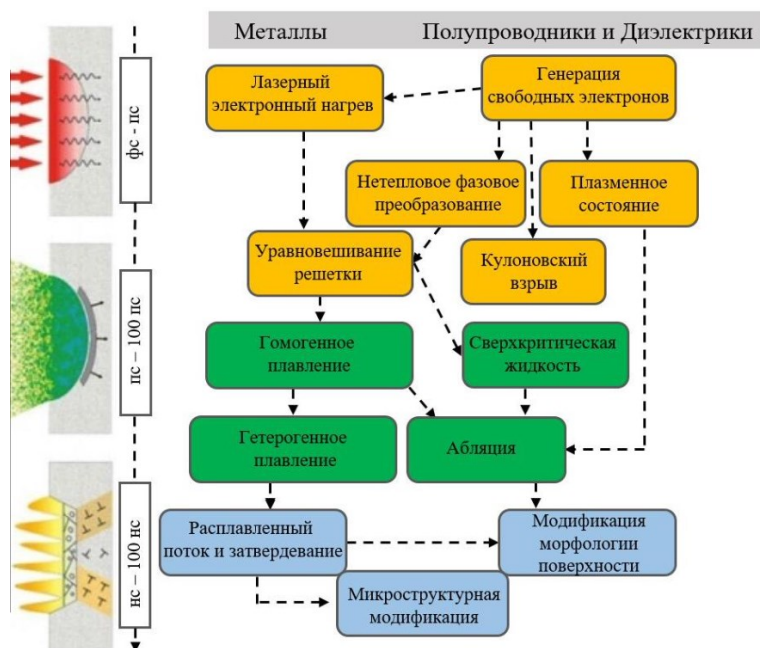


Рис. 5. Временные интервалы процессов при фемтосекундной лазерной абляции

Во-вторых, исчезает эффект экранирования излучения так называемым «факелом» из-за того, что вещества с поверхности аблируемого материала уносятся после завершения воздействия лазерного импульса, и, как следствие, происходит уменьшение потерь энергии. Из вышесказанного следует, что процесс абляции при нано- и пикосекундных импульсах начинается при высокой интенсивности вследствие ухода энергии лазера вглубь материала либо поглощения ее плазмой лазерного факела. При воздействии ультракоротких импульсов мишень не плавится, а значит, фемтосекундное воздействие можно считать переходом от твердого тела в пар [3].

Лазерная абляция фемтосекундными импульсами

Метод лазерной абляции – достаточно популярный способ получения наночастиц, обладающий неоспоримыми преимуществами. Так, наночастицы, полученные таким методом, полностью свободны от ПАВ (поверхностно-активных веществ) или лишних заряженных частиц, что является важными критериями для некоторых областей науки, например, медицины или микроэлектроники. Кроме того, лазерная абляция является достаточно универсальным методом синтеза частиц из любых металлических групп, полупроводников или даже ди-

электриков – у получаемых частиц возможно контролировать характеристики путем изменения тех или иных параметров лазерного излучения. Чаще всего путем лазерной абляции получают оксиды металлов или же сами металлы.

Выделяют три основных этапа лазерной абляции. Первый этап – фотоны лазерного излучения, падающие в составе пучка на поверхность мишени, поглощаются последней, возбуждаясь, а затем преобразуются в механическую, химическую или же тепловую энергию. В области поверхности мишени, на которую было совершено воздействие лазером, повышается температура до нескольких тысяч градусов по Кельвину.

Второй этап – во время него с поверхности облученной мишени происходит испарение частиц материала. Частицы, нагретые до очень высоких температур, начинают выбиваться с поверхности, создавая непрерывный поток, именуемый факелом. Этот поток также сорбирует продолжающее падать лазерное излучение, что приводит ко вторичному нагреву испарившегося с поверхности материала.

Третий этап – факел, образовавшийся в предыдущем этапе, увеличивается, что становится причиной выброса огромного количества ионов, электронов, молекул, атомов с поверхности, на которую идет воздействие.

За годы активного изучения лазерной абляции фемтосекундной длительности было выявлено, что практически всегда ее сопровождает один из следующих абляционных режимов – или испарение, или фазовый взрыв, или откол части слоя расплава. Помимо трех основных, за последние десять лет были высказаны предположения и открыт ряд других физических явлений, например, пенообразование или подповерхностное кипение [4-6].

Перспективность использования фемтосекундного лазерного излучения как основного способа обработки поверхности объясняется рядом преимуществ.

Во-первых, меньшие тепловые повреждения материала. Во-вторых, поверхность аблируемого образца гораздо меньше загрязняется продуктами абляции. В-третьих, открываются возможности получения инновационных видов доработки или преобразования поверхности (например, новые периодические поверхностные структуры на поверхности материала).

В-четвертых, энергетическая «экономия» – например, для металлов, энергетическая эффективность удаления материалов посредством абляции в случае фемтосекундных импульсов оказывается примерно в десять раз больше, чем в случае пико- или наносекундных импульсах, в первую очередь, из-за отсутствия экранирующего действия плазмы и потерь энергии на нагрев материала.

Однако, вопреки огромному числу научных трудов в области изучения лазерного излучения ультракоротких импульсов, по сегодняшний день отсутствует точное понимание процессов, которые происходят при взаимодействии ультракоротких импульсов с веществом. Скорее всего, причиной этому служат сверхкороткие промежутки времени, в которых происходит абляция, а также то, что ей сопутствуют сложные физические процессы, а именно: неравновесное распределение энергии электронов в фемтосекундных временных масштабах в срезе лазерного импульса, перенос энергии электронов в кристаллическую решетку, теплопроводность, акустическую разгрузку и удаление материала, транспорт энергии [17].

Например, транспорт энергии в кристаллическом кремнии обеспечивается амбиполярной диффузией с коэффициентом, нелинейно зависящим от плотности электрон-дырчатой плазмы (ЭДП) в отличие от металлических мишеней, где концентрация носителей относительно всегда постоянная. Так, с повышением плотности (достигаемых при воздействии ФЛИ в «режиме» абляции), значение этого коэффициента для твердого кремния остается неизвестным.

При воздействии фемтосекундным лазером на поверхность мишени осуществляются некоторые сверхбыстрые процессы, которые характеризуют процесс абляции и которые окажутся совершенно разными в зависимости от вида мишени – металла, полупроводника или диэлектрика. Процесс поглощения ФЛИ разделяется на этапы, или процессы, у каждого из которых есть свой временной промежуток. Схема представлена на рис. 6.



Рис. 6. Схема поглощения энергии и фазовые превращения после воздействия УЛИ на материалы с разной проводимостью

Отличительной чертой абляции методом коротких импульсов является так называемый эффект самовоздействия – эффект, в результате которого большая часть падающей на образец лазерной энергии рассеивается в абляционной плазме, которая образуется почти сразу после начала влияния лазерного луча. Это объясняется тем, что время воздействия лазерного импульса превышает время, необходимое для образования облака эрозивной плазмы, которая является причиной получения заряженных паров аблируемой мишени и, как следствие, развития пробоя окружающего воздуха. Значение температуры плазмы составляет около 10^5 градусов по Кельвину.

При взаимодействии излучения лазера и материала мишени импульсы фемтосекундной длительности, которые не смогли преодолеть порог оптического пробоя, образуют вокруг условия предионизационного состояния, в результате чего происходит удаление вещества с поверхности (абляция).

В процессе происходит тепловое расширение, вслед за ним – перераспределение плазменного факела, частицы, уже подвергшиеся лазерной абляции, могут вторично попасть в этот факел, что становится причиной появления наночастиц. Образовавшиеся частицы аблируемого материала обычно оседают на подложке, расположенной вблизи или вдалеке от мишени (в зависимости от задачи), либо же на стенках камеры (кюветы) [15-18].

Лазерная фемтосекундная абляция в жидкости

Кроме самой распространенной абляции – в воздухе – существует лазерная абляция в жидкости, которая вызывает огромный научный интерес. В случае воздействия лазерного пучка на мишень, находящуюся в жидкости, проявляются некие неравновесные процессы, а именно: местный нагрев мишени на границе сред жидкость-твердое тело, появление участка оплавленного вещества, образование парогазового облака, состоявшего из продуктов, получившихся в результате абляции.

В связи с возросшим практическим интересом к лазерной абляции в жидкости вследствие возможности применения ее для высокотемпературного химического синтеза или лазерной обработки материалов для формирования наноструктур или для нужд медицины, в последние годы научное сообщество достигло определенных успехов в этой области благодаря огромному количеству технических и технологических средств, которые создавались для исследования химических, физических и других, возможно, еще не открытых, процессов при воздействии лазерными импульсами на твердые непрозрачные тела в жидких средах [5]. На рис. 7 представлена общая схема процесса абляции в жидкости.

Получение наночастиц без инородных химических продуктов требует особых условий – необходимо исключить взаимодействие (на химическом уровне) материала мишени с жидкостью, а затем взаимодействие получаемых наноструктур с этой же жидкостью. Отчасти этому способствует высокая удельная поверхность наночастиц и их высокая температура в процессе воздействия на них лазера, которая активирует множество химических реакций, в том числе, являющиеся причиной или просто связанные со специфическим катализом. Впрочем, если молекулы материала мишени все-таки вступили в связь с молекулами жидкости, огорчаться не стоит – формирование соединений аблируемого материала с окружающей его средой также является частью научного интереса и активно изучается.

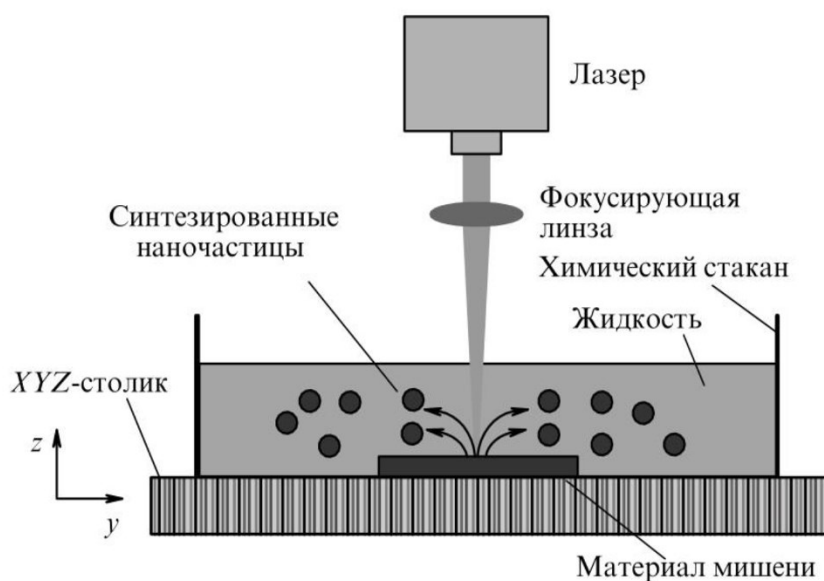


Рис. 7. Абляция твердой мишени в жидкости

Твердые мишени, подвергающиеся абляции ультракоротким излучением в жидкости, обладают особенностями, крайне сложными, особенно в сравнении с абляцией твердых мишеней в вакууме или газе. Плазма, появляющаяся из-за воздействия лазера, расширяется со сверхзвуковой скоростью, в результате чего образуется ударная волна в ограниченном жидкостью пространстве, при этом поглощая остальную часть лазерного импульса и получая вечный «запас» испарившегося вещества мишени. Кроме того, ударная волна становится причиной появления излишнего давления в лазерно-индуцированной плазме, это давление ведет к повышению температуры этой самой плазмы. Строго говоря, ударная волна становится причиной повышения температуры лазер-индуцированной плазмы, повышения давления и повышения плотности, чем исходно полученная плазма. Таким образом, давление и температура плазмы при фемтосекундной лазерной абляции в жидкости на порядок выше значений тех же переменных при наносекундной абляции.

Метод импульсной лазерной абляции в жидкостях дает возможность получения сложных частиц, получаемых из материала аблируемой мишени и окружающей среды путем образования атомов в процессе воздействия лазера и синтеза химических реакций, взаимодействующих либо с иными атомами, либо с жидкой средой. Благодаря такому способу удастся получить новейшие материалы, создание которых было бы невозможно в равновесных условиях – метастабильные

материалы. В результате таких экспериментов были получены кубический нитрид бора, оксидные полупроводниковые нанокристаллы и алмазные частицы.

При появлении лазерного факела начинаются химические реакции, как только значения температуры и давления становятся высокими. Чтобы упростить и оптимизировать условия генерации наночастиц в условиях жидкой среды следует не забывать следить за параметрами температуры и концентрации наночастиц, а также учитывать параметры лазерного факела.

Наличие жидкой среды позволяет осуществить сбор продуктов абляции, держать под контролем размеры частиц, получить оболочные частицы. Фемтосекундная лазерная абляция в жидкости стала объектом интереса научного сообщества благодаря демонстрации огромного потенциала в синтезе квантовых точек, нанопроволок, нанопластинок и других наноструктур. Во время получения коллоидного раствора методом ФЛА появляются эффекты фрагментации наночастиц, коагуляции продуктов абляции, а также изменения фазового (иногда и химического) состава получаемых наночастиц.

Фемтосекундная лазерная фрагментация

Под лазерной фрагментацией принято понимать метод, при котором разрушаются частицы материала мишени вследствие воздействия на мишень лазерного импульса. Данная технология применяется в огромном спектре науки и техники, например, в медицине, для получения тонких пленок, при синтезе нанотрубок, в аналитической химии для последовательного анализа образцов слой за слоем, а также для обработки поверхностей пресс-форм. На рис. 8 показан один из возможных методов лазерной фрагментации.

Сам процесс лазерной фрагментации может быть результатом фототермической, фотохимической или же фотоаблятивной реакции. Фототермическая реакция представляет собой нагрев частиц наноразмера лазерным импульсом с дальнейшим поглощением ими излучения, что становится причиной их фрагментации. При фотохимической реакции лазерное излучение используется в качестве активатора химических реакций внутри наночастиц, которые становятся причиной их разрушения. И, наконец, в фотоаблятивной реакции поверхностные слои наноразмерных частиц откалываются или отбиваются в результате лазерного воздействия, что также приводит к фрагментации вещества.

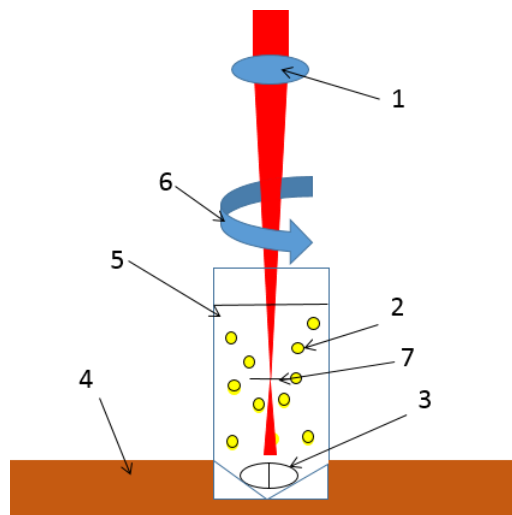


Рис. 8. Фрагментация с применением магнитной мешалки: 1 – фокусирующий объектив, 2 – наночастицы, 3 – магнитный якорь, 4 – подставка магнитной мешалки, 5 – жидкость, 6 – направление вращения, 7 – положение фокуса

Установлено, что при любом методе фрагментации путем воздействия интенсивных сверхбыстрых лазерных импульсов на мишень генерируются новые, «дочерние» частицы, диаметр которых не превышает нескольких нанометров. Также известно, что концепция действия любого метода фрагментации включает в себя кулоновское деление («кулоновский взрыв»): фемтосекундные лазерные импульсы заряжают, а затем плавят наночастицу, от чего она выбрасывает ионизированную вторичную капельку-потомка.

Лазерная фрагментация металлических наночастиц в воде представляет особый интерес научного сообщества из-за того, что с ее помощью можно генерировать частицы с диаметром от двух до четырех нанометров, что является самым легким путем к фрагментации частиц таких размеров. Известно, что частицы фрагментируются в течение ста пикосекунд после лазерного воздействия, после несильно увеличиваясь в размерах после генерации. Однако, сам процесс происходит без непосредственного наблюдения, вследствие чего невозможно однозначно описать, «как устроен» этот способ. Было высказано предположение, что, так как фрагментация начинается сразу же по достижении наноразмерными частицами нижнего порога их температуры плавления, то это из-за воздействия фемтосекундных импульсов происходит ионизация наночастиц, что приводит к ее кулоновскому взрыву и, как итог, генерации большего количества ионизированных частиц. Кулоновский взрыв считается мягким, достаточно «атравматичным» методом фрагментации наночастиц, потому что условия его осуществления

— импульсы, интенсивность которого не превышает порог плавления материала, на который идет воздействие, таким образом можно удалить верхний слой, толщина которого будет составлять несколько нанометров. На рис. 9 представлена покадрово анимация кулоновского взрыва скопления атомов. Для удобства понимания последовательность обозначена буквами. Большие круги — это атомы, цвет указывает на заряд (красный — нейтральный, зеленый — положительный), маленькие круги — электроны.

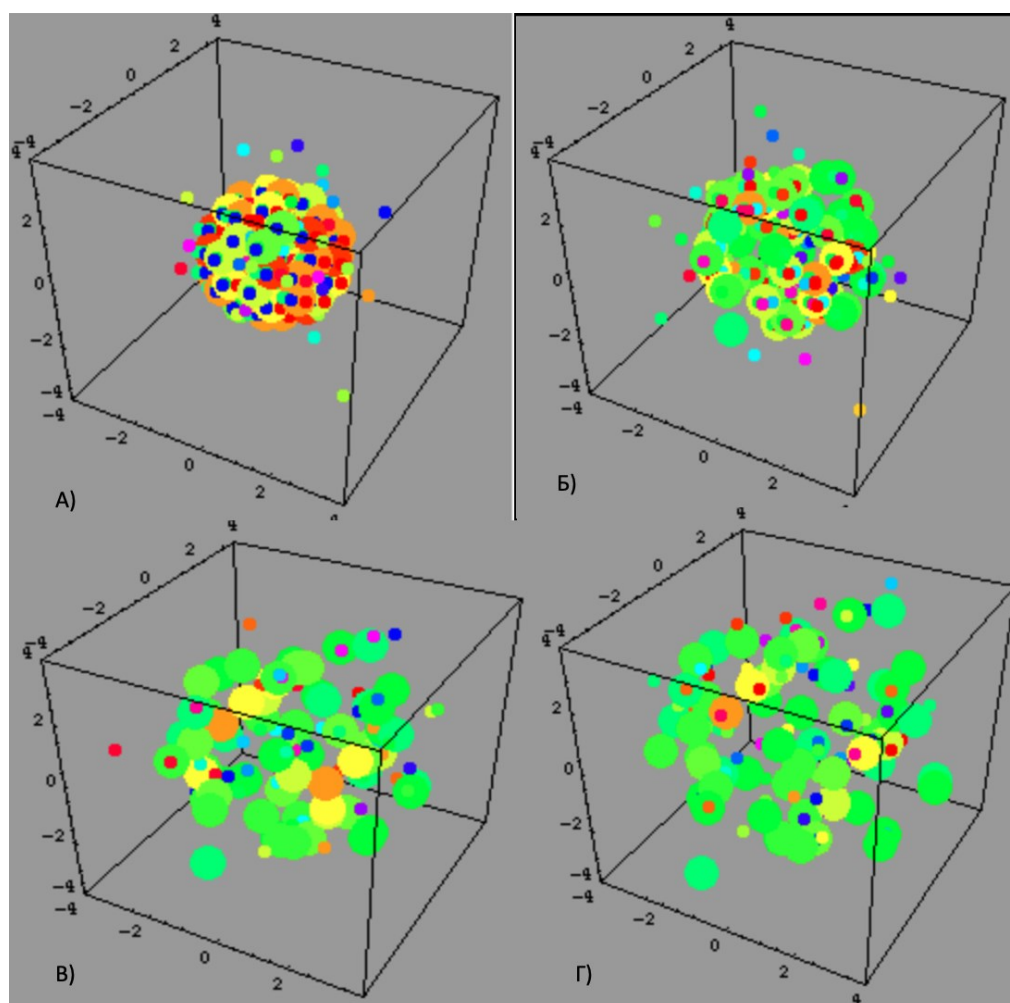


Рис. 9. Анимация кулоновского взрыва

Если же интенсивность импульса превышает порог плавления материала, на который идет воздействие лазером, речь будет идти о распаде на мелкодисперсную фазу, или же фазовом взрыве. Поверхность материала нагревается до критической температуры (например, для золота это значение достигает 13000 градусов по Кельвину), после

чего начинается расширение нагретого слоя: а) материал увеличивается в виде газовой фазы по адиабату выше критической точки; б) материал увеличивается, следуя адиабате ниже термодинамической критической точки, что приводит к фазовому взрыву. Фазовый взрыв, происходящий вследствие воздействия на материал УКИ (ультракоротких лазерных импульсов), представляет собой огромный интерес. Тепловое равновесие электронов и кристаллической решетки материала сильно зависит от вида последнего, а время, необходимое для того, чтобы он произошел, может составлять как несколько пикосекунд, так и несколько сотен пикосекунд. В случае, когда поверхность материала нагревается до температуры, ниже критической термодинамической, но выше температуры плавления, то поверхностный слой (в большинстве случаев, однако, необязательно расплавленный слой будет именно на поверхности) в итоге оказывается в метастабильном состоянии. Такое может случиться в трех случаях. Первый – вследствие теплового испарения с поверхности материала, если давление над поверхностью не достигнет насыщения. Второй – пока образец не остынет или не затвердеет под действием теплопроводности. Третий – пока не случится взрывного закипания (т.е. фазового взрыва) для возврата в состояние равновесия.

Лазерную фрагментацию можно описать как взаимодействие сфокусированного лазерного внутри коллоидного раствора. Частицы наноразмеров, перемешиваясь в растворе, попадают в каустическую область, где модифицируются. Лазерная фрагментация получившихся частиц делает возможным распределить их по размеру. Размерами наночастиц металлов можно управлять, если облучать коллоидный раствор металлических наночастиц лазером определенной длины волны, соответствующей резонансному возбуждению поверхностных плазмонов и межзонному переходу. Такой метод лазерной фрагментации возможно использовать исключительно для немногих форм наночастиц и их размеров, в противном случае абляция будет низкоэффективной. Наносекундный, пикосекундный импульс, или же просто непрерывная фрагментация является причиной появления кавитации, из-за чего концентрация наночастиц разбрасывается, что усложняет их рост, а также огромной энергией в фокальном пятне. Из-за вышеупомянутых факторов коллоидные растворы обладают слабой стабильностью.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Практическая работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: Изучить принцип работы дифракционной решетки. Определить длину волны лазерного излучения при помощи дифракционной решетки.

Теоретическая часть

Лазерное излучение представляет собой электромагнитные волны, которые обладают такими важными и отличительными характеристиками, как монохроматичность и когерентность. Под монохроматичностью понимается наличие одной частоты электромагнитной волны, когерентность представляет собой скоррелированность нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени, и при сложении колебаний получается колебание той же частоты. Данные особенности являются одними из ключевых характеристик, которые и отличают лазерное излучение от, например, излучения лампы накаливания. Как известно, электромагнитные волны могут изменять свою траекторию при их попадании на препятствие. Данное явление носит название дифракции. Дифракцией волны называют явление отклонения волны от прямолинейного распространения и огибания волной препятствия.

Вследствие изучения процесса дифракции появился прибор, который носит название – дифракционная решетка. Дифракционная решетка представляет собой оптический прибор, на поверхность которого нанесено большое число параллельных микроскопических штрихов с равным шагом, происходит чередование щелей или выступов. Таким образом, решетка работает на основе явления отклонения света от прямолинейного распространения при встрече с препятствием. Когда электромагнитные волны проходят через дифракционную решетку, они огибают ее препятствия (штрихи, щели или выступы), имея при этом разный угол отклонения. Угол дифракции зависит от длины

волны, это приводит к тому, что белый свет раскладывается в спектр, который визуальнo представляет собой радугу (рис. 10).

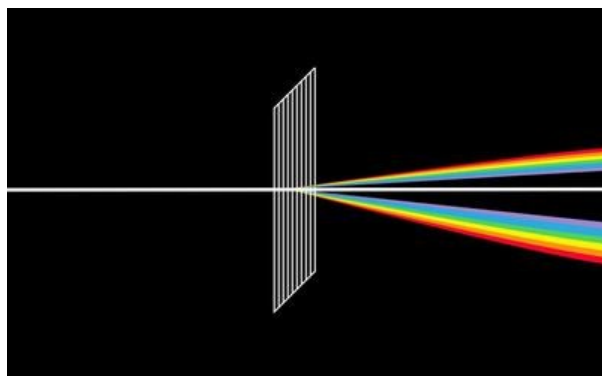


Рис. 10. Дифракция белого света после прохождения дифракционной решетки

При помощи дифракционной решетки возможно определить длину световой волны. Главной характеристикой дифракционной решетки является ее период. На рис. 11 представлено схематичное изображение дифракции света на дифракционной решетке.

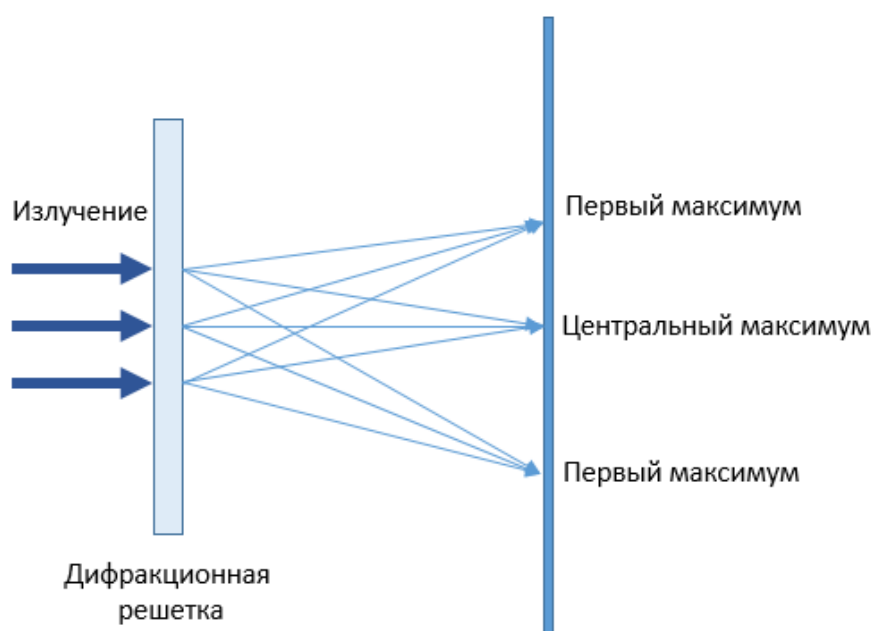


Рис. 11. Дифракции света на дифракционной решетке

На рис. 12 показан период дифракционной решетки.

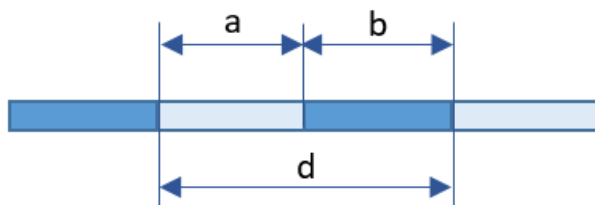


Рис. 12. Период дифракционной решетки

На рис. 12 под буквой a обозначена ширина щели, под буквой b – ширина ее непрозрачной части, таким образом период решетки равен (1):

$$d = a + b \quad (1)$$

Таким образом, период дифракционной решетки равен сумме ширины щели и ширине непрозрачной области между соседними щелями.

Если число щелей в решетке обозначить через N , то можно утверждать, что в создании интерференционной картины за решеткой участвует N когерентных световых пучков. Положение главных максимумов определяется условием (2):

$$d \sin \varphi = m \lambda, \quad (2)$$

где φ — угол отклонения для данного максимума, λ — длина волны света, $m = 0, 1, 2, \dots$ — номер максимума.

Между главными максимумами на дифракционной картине имеется $N-1$ минимумов, максимумы же имеют интенсивность во столько же раз больше (по сравнению с дифракцией на одиночной щели). Наиболее интенсивным является центральный максимум ($k=0$). Поскольку угол отклонения зависит от длины волны, дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр. Можно записать формулу дифракционной решетки (3):

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (3)$$

Так как угол дифракции мал, то можно считать $\sin \varphi \approx \tan \varphi$, тогда формула дифракционной решетки (4) примет следующий вид (4):

$$d \operatorname{tg} \varphi = k \lambda \quad (4)$$

Из формулы дифракционной решетки (4) можно вычислить $\operatorname{tg} \varphi$ следующим образом (5):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta X_m}{L}, \quad (5)$$

где ΔX_m – расстояние между нулевым максимум и максимум порядка m (где $m = 1, 2, 3 \dots$), L – расстояние от источника до экрана. Для вычисления длины волны необходимо воспользоваться следующей формулой (6):

$$\lambda = \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{m}, \quad (6)$$

где m – порядок максимума. Период решетки можно вычислить, зная количество штрихов на 1 мм (7):

$$d = \frac{1}{N} \quad (7)$$

Порядок выполнения работы

Перед лазерной установкой на расстоянии L от экрана установить в штативе дифракционную решетку. На экране появится множество не перекрывающихся дифракционных спектров в виде полос. Измерения заключаются в определении на экране расстояния ΔX_m , между нулевым максимумом и максимумом порядка m ($m=3$ или 4). Для этого необходимо отметить на экране (приложив чистый лист бумаги) нулевой максимум и максимум порядка m и измерить линейкой расстояние L и ΔX_m , выразив их в метрах. Результаты записать в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

| Решётка № | Эксперимент № | d (м) | m | L (м) | ΔX_m (м) | tg φ | λ (м) |
|--------------|------------------|----------|---|-------|------------------|--------------|---------------|
| 1 | 1 | | 2 | | | | |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | | | | | | |
| 2 | 1 | | 3 | | | | |

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Результаты измерений в таблице, расчеты всех необходимых значений для заполнения таблицы.
5. Результат численной оценки длины волны, достигнутый в ходе проведения лабораторной работы.
6. Описание и анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление дифракции?
2. Какие волны называют когерентными? Укажите источники когерентных волн, которые дают дифракционную картину в лабораторной работе. Какие источники когерентных волн Вы знаете?
3. Условия максимумов и минимумов для дифракционной решетки.
4. Каков порядок следования цветов в дифракционных спектрах и почему?
5. Какова окраска нулевого максимума?

Практическая работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА

Цель работы: собрать и изучить принцип работы лабораторного интерферометра Майкельсона для наблюдения явления интерференции света.

Теоретическая часть

В 1802 году английский учёный Томас Юнг открыл явление интерференции света, ввёл в физику термин «интерференция» и дал объяснение этому явлению и первый измерил длину световой волны. Интерференция света представляет собой явление сложения двух и более когерентных волн, приводящее к образованию в пространстве устой-

чивых картин чередующихся максимумов и минимумов интенсивности света. Для образования устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники волн имели одинаковую частоту и постоянную разность фаз их колебаний. Таким образом, для того, чтобы волны могли интерферировать между собой они должны быть монохроматическими и когерентными. Лазерное излучение полностью соответствует данным условиям.

Таким образом, обозначим два главных условия возникновения интерференции:

- волны должны иметь одинаковые (или близкие) частоты, чтобы картина, получающаяся в результате наложения волн, не менялась во времени (или менялась не очень быстро, чтобы её можно было успеть зарегистрировать);

- волны должны быть однонаправленными (или иметь близкое направление), две перпендикулярные волны никогда не дадут интерференции. Иными словами, складываемые волны должны иметь одинаковые волновые векторы.

Волны, для которых выполняются эти два условия, называются когерентными. Первое условие иногда называют временной когерентностью, второе – пространственной когерентностью. Условие максимумов: разность хода волн равна целому числу длин волн (иначе чётному числу длин полуволн) (8):

$$\Delta d = k\lambda, \quad (8)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \pm n$. Условие минимумов: разность хода волн равна нечётному числу длин полуволн (9):

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \pm n$.

Для измерений длин волн, в том числе в области станко- и машиностроении, для оценки качества оптических поверхностей и проверки оптических систем используются интерферометры. Интерферометр представляет собой измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции. Другими словами, интерферометры -

это исследовательские инструменты, используемые во многих областях науки и техники. Интерференционные картины, генерируемые интерферометрами, содержат информацию об изучаемом объекте или явлении. Их часто используют для выполнения очень маленьких измерений, которые невозможно получить другим способом.

Из-за широкого применения интерферометры бывают самых разных форм и размеров. С их помощью возможно провести измерения от мельчайших изменений на поверхности микроскопического организма до структуры огромных пространств газа и пыли в далекой Вселенной (с помощью радиоинтерферометрии), также приборы задействуют для обнаружения гравитационных волн. Несмотря на разные конструкции и способы использования, все интерферометры имеют одну общую черту, о которой упоминалось выше: они накладывают друг на друга лучи света, создавая интерференционную картину.

Процесс интерференции можно наблюдать в природе. Например, когда камни ударяются о воду, они создают концентрические волны, которые удаляются от источника. Там, где две или более из этих концентрических волн пересекаются, они интерферируют друг с другом. Эта интерференция может привести к появлению волны большего размера, волны меньшего размера или к отсутствию волны вообще. Видимая картина, возникающая в месте пересечения волн, представляет собой интерференционную картину.

В природе две или более волны редко бывают идентичными, а пики и впадины одной волны редко идеально совпадают с пиками или впадинами другой волны. Но какими бы похожими или разными они ни были, при пересечении волн результирующая волна всегда равна сумме высот и глубин (амплитуд) волн в точках их пересечения.

Методы получения когерентных пучков в интерферометрах очень разнообразны, поэтому существует большое число их различных конструкций. По числу интерферирующих пучков света оптические интерферометры можно разделить на многолучевые и двухлучевые. В данной работе мы будем рассматривать двухлучевой интерферометр, изобретённый Альбертом Майкельсоном. Данный прибор позволил впервые измерить длину волны света. На рис. 13 показано схематичное изображение принципа работы интерферометра Майкельсона.

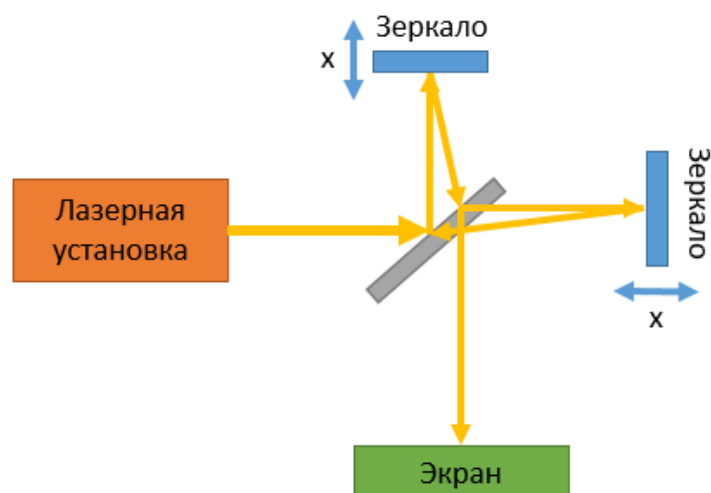


Рис. 13. Принцип работы интерферометра Майкельсона

От расположения зеркал зависит конечный вид интерференционной картины. На рисунке 14 а, б показаны интерференционные картины со строго перпендикулярными зеркалами и с зеркалами под углом около 90° .

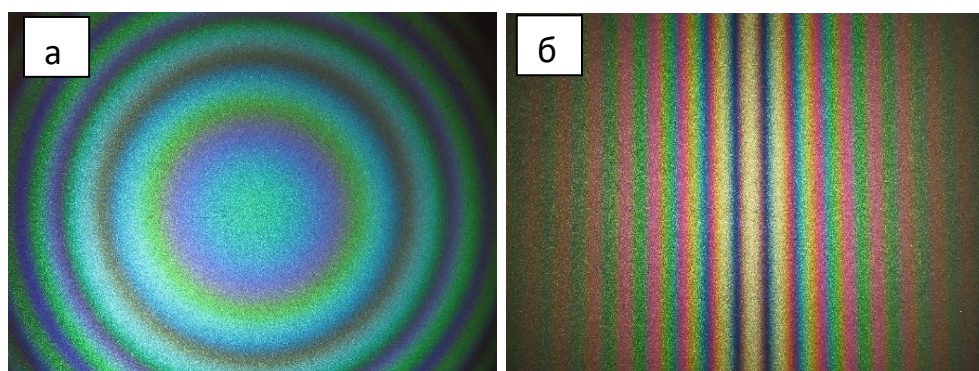


Рис. 14. Интерференционная картина со строго перпендикулярными зеркалами (а), интерференционная картина с зеркалами под углом около 90° (б)

Порядок выполнения работы

Для сбора интерферометра необходимо воспользоваться источником лазерного излучения, который необходимо установить и закрепить на столике, где будет собираться схема. Перед лазерным источником необходимо установить светоделительную полупрозрачную пластину, которая будет разделять поступающий луч на два. Далее, как показано на рис. 15, устанавливаются зеркала.

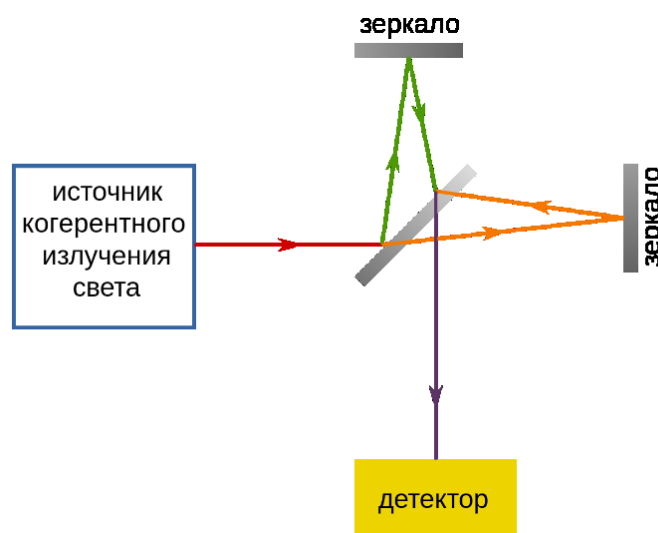


Рис. 15. Схема интерферометра Майкельсона

Необходимо отметить, что зеркала для сборки интерферометра обязательно должны иметь покрытие, полностью отражающее поступающее излучение. За светоделительной пластиной, на том же расстоянии, на котором установлен источник лазерного излучения и светоделительная пластина, устанавливается экран для наблюдения конечного результата. Для удобства юстировки схемы зеркала необходимо установить на передвижную платформу, которая позволит осуществлять передвижение зеркал «вперед-назад». Для того, чтобы получить качественную интерференционную картину, необходимо выставить все компоненты схемы строго одинаково по высоте, также между зеркалами до светоделительной пластины расстояние должно быть строго одинаковым.

Для измерения длины волны два разделенных луча должны быть когерентными. Если расстояния двух зеркал от делителя луча равны, то оба луча имеют разность фаз, равную нулю. Если теперь переместить одно из двух зеркал на расстояние d , то между двумя лучами возникнет разность путей (10):

$$\Delta w = 2d \quad (10)$$

При этом также наблюдается изменение интенсивности свечения. Длину волны можно рассчитать подсчетом числа z интерференционных максимумов при сдвиге на Δd (11):

$$\Delta d = \left(\frac{\lambda}{2}\right) * z \quad (11)$$

После получения интерференционной картины произвести расчёт длины волны излучения, пользуясь формулой (11). Полученный результат сравнить с результатом, полученным в практической работе №1.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Фотография полученной интерференционной картины.
4. Расчет длины волны лазерного источника.
5. Сравнение полученных результатов с практической работой № 1.
6. Описание и анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните явление интерференции света.
2. Какие условия необходимы интерференции световых волн?
3. Какие волны можно считать когерентными?
4. Условия максимумов и минимумов интенсивности при интерференции световых волн.
5. Что такое геометрическая и оптическая разности хода волн?

Практическая работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЕГО ФОКУСИРОВКЕ В ОПТОВОЛОКНО

Цель работы: Ознакомиться с принципом действия и конструкцией оптоволоконна и осуществить с помощью него передачу лазерного излучения. Измерить потери мощности лазерного излучения при его прохождении через оптическое волокно.

Теоретическая часть

Волоконная оптика, или оптическое волокно, относится к технологии, которая передает информацию в виде световых импульсов по стеклянному или пластиковому волокну. Волоконно-оптический кабель может содержать различное количество таких стеклянных волокон - от нескольких до пары сотен. Другой слой стекла, называемый оболочкой, окружает сердцевину из стекловолокна. Оптоволоконные кабели широко используются из-за их преимуществ перед медными кабелями. Некоторые из этих преимуществ включают более высокую пропускную способность и скорость передачи. Оптоволокно используется для передачи данных на большие расстояния и в высокопроизводительных сетях. Также широкое применение оптоволокна имеет в телекоммуникационных услугах, таких как Интернет, телевидение и телефоны. На рис. 16 представлено схематичное изображение оптоволокна в разрезе.

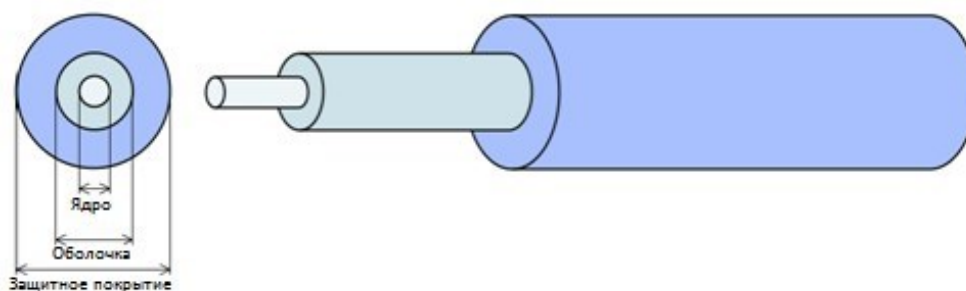


Рис. 16. Схематичное изображение оптоволокна в разрезе

Свет распространяется по оптоволокну благодаря явлению полного внутреннего отражения. Показатель преломления сердцевины, обычно имеющий величину от 1,4 до 1,5, всегда немного больше, чем показатель преломления оптической оболочки (разница порядка 1%). Поэтому световые волны, распространяющиеся в сердцевине под углом, не превышающим некоторое критическое значение, претерпевают полное внутреннее отражение от оптической оболочки (рис. 17). Это следует из закона преломления Снеллиуса. Путем многократных преломлений от оболочки эти волны распространяются по оптическому волокну.

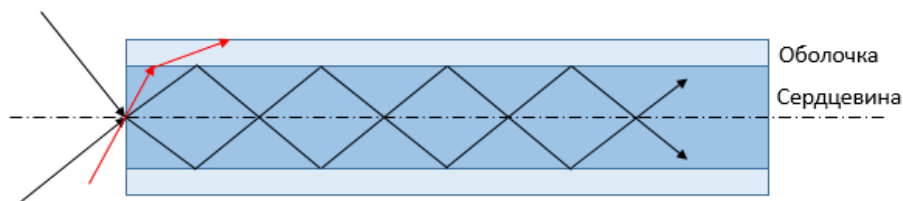


Рис. 17. Полное внутреннее отражение в оптоволокне

Структурные параметры оптического волокна - это параметры, которые относятся к геометрии и характерной структуре каждого волокна. Эти параметры определяют и характеризуют типы оптических волокон, представленных на рынке, поэтому от них напрямую зависит классификация волокон. Можно выделить следующие важные характеристики оптоволокна:

- профиль показателя преломления, позволяющий использовать волокна с различной дисперсией;
- размер сердцевины и оболочки оптического волокна, определяющий тип распространения: одномодовое или многомодовое оптическое волокно;
- диаметр поля моды оптоволоконного кабеля, который указывает, как происходит геометрическое распределение света в диффузионном режиме;
- числовая апертура оптического волокна, которая указывает количество лучей, которые могут проникнуть в сердцевину передачи по оптическому волокну;
- длина волны отсечки оптического волокна, которая определяет, что оптическое волокно передается только по одной моде распространения.

Затухание сигнала оптического волокна является одним из наиболее важных свойств, поскольку оно во многом определяет максимальное расстояние между передатчиком и приемником. Поскольку установка и обслуживание обходятся дорого, степень затухания в оптоволокне оказывает большое влияние на стоимость системы.

Когда сигналы передаются по оптическому волокну, сигнал уширяется, что имеет название механизма искажения. Если приложенные импульсы распространяются достаточно далеко, они в конечном итоге перекроются с соседними импульсами, вызывая ошибки на выходе

приемника. Таким образом, можно сказать, что механизмы искажения сигнала ограничивают пропускную способность волокна.

Свет, проходящий через оптическое волокно, теряет мощность по мере движения по нему, большую роль играет расстояние, на которое распространяется свет. Таким образом, потери на расстояние ограничивают расстояние передачи и зависят от длины волны света и материала, через который он распространяется.

Использовать волокна с длиной волны менее 800 нм неудобно из-за высокого затухания вследствие рэлеевского рассеяния. Выше 1600 нм возникают проблемы с затуханием из-за воздействия инфракрасного излучения. Наименьшие потери наблюдаются на длинах волн 1550 нм - значении, которое активно используется для передачи на большие расстояния. Поэтому оптоволоконная связь обычно работает в том же диапазоне длин волн, что и одно из следующих «телекоммуникационных окон». Изначально использовалось окно 800–900 нм. Следовательно, первое телекоммуникационное окно подходит только для передач на короткие расстояния. Во втором телекоммуникационном окне используются длины волн около 1,3 мкм, где потери в кварцевом волокне очень низкие, а хроматическая дисперсия волокна очень слабая, поэтому расширение дисперсии сведено к минимуму. Обычно это окно использовалось для передачи на большие расстояния. Третье телекоммуникационное окно, которое сейчас очень широко используется, использует длину волны около 1,5 мкм. На рис. 18 представлены окна прозрачности оптоволоконна.

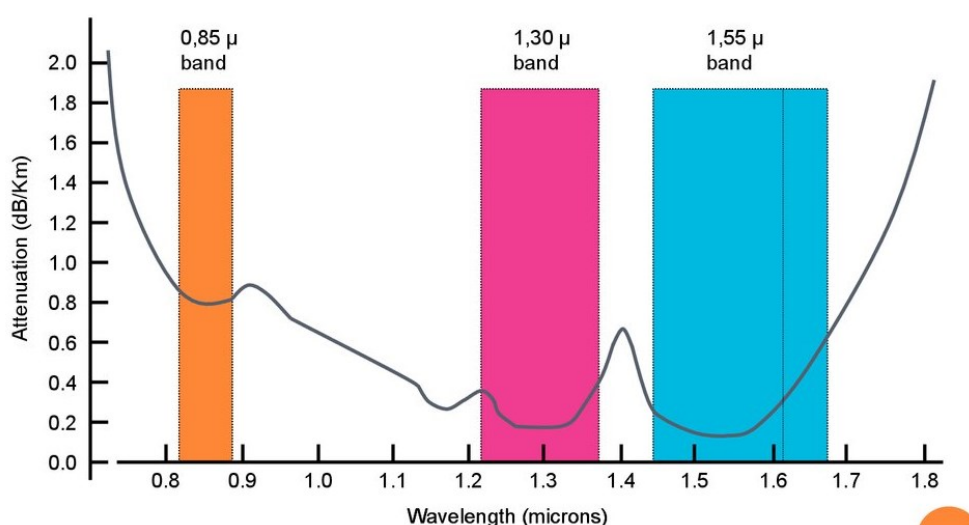


Рис. 18. Окна прозрачности оптоволоконна

Затухание сигнала в оптоволокне не зависит от полосы пропускания и модуляции, поскольку несущая частота на несколько порядков превышает частоту модуляции, чего не бывает в других обычных волноводах. Затухание света в оптическом волокне происходит в результате различных эффектов, и потери можно разделить на внешние и внутренние.

Коэффициент затухания оптического волокна можно рассчитать по следующей формуле (12):

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left\{ \frac{P(l_1)}{P(l_2)} \right\}, \quad (12)$$

где $P(l_1)$ и $P(l_2)$ – оптическая мощность, измеренная в оптическом волокне в точках l_1 и l_2 отдаленных друг от друга на L . Коэффициент затухания имеет единицы измерения дБ/км.

Поглощение примесями является основной причиной потери сигнала в оптических волокнах. На рис. 19-20 представлены потери в оптоволокне на примесях и неоднородностях.

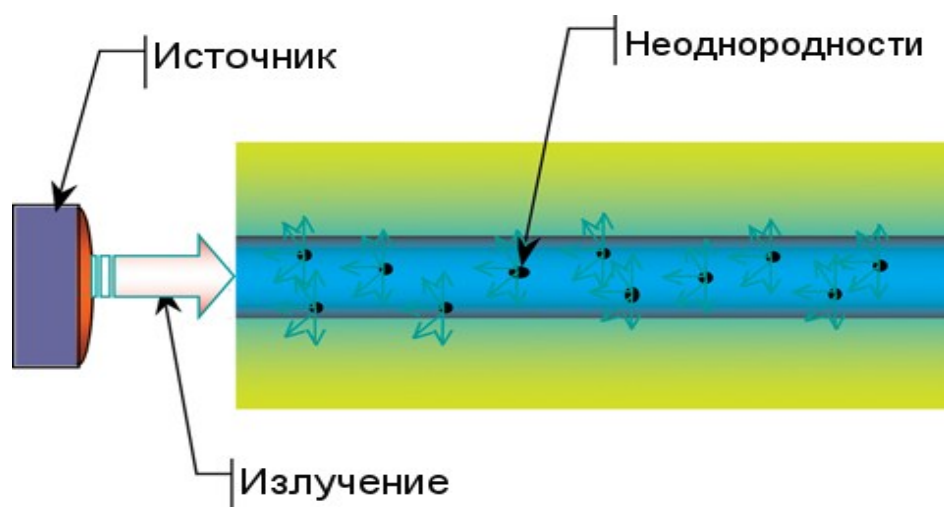


Рис. 19. Релеевское рассеяние

Дисперсию волокон можно объяснить распространением оптического импульса во времени из-за разницы в скорости различных оптических спектральных компонент, связанных с этим оптическим импульсом. Необходимо иметь в виду, что каждый оптический импульс имеет разные спектральные компоненты или несколько частот. Каждый оптический спектральный компонент имеет свою собственную

скорость и может двигаться по разным траекториям. Благодаря этому каждый компонент достигает внешнего конца канала связи (волокна) через разные промежутки времени. Эта разница во времени, испытываемая разными спектральными компонентами, приводит к продольному распространению импульса цилиндрической формы.

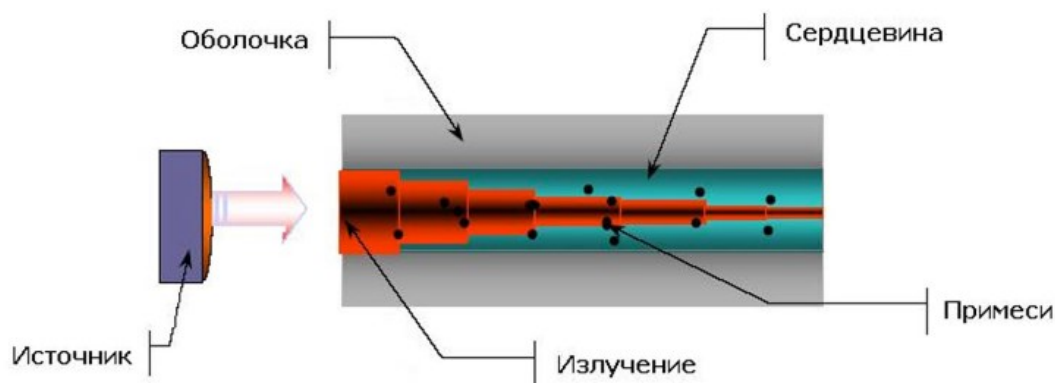


Рис. 20. Поглощение оптического сигнала в волокне

Потеря полосы пропускания сигнала приводит к дисперсии, а также к потерям на пройденное расстояние (с точки зрения затухания). Пропускная способность оптического волокна – это мера пропускной способности, ограниченная общей дисперсией волокна или расширением передаваемого импульса. Это ограничивает возможность передачи информации, поскольку импульсы искажаются и расширяются при передаче, накладываясь друг на друга. Аналогичным образом, дисперсия ограничивает расстояние передачи, и, как и ширина полосы пропускания, она является функцией длины оптического волокна, поскольку эффект тем сильнее, чем больше длина волокна. Этот тип распределения полосы пропускания можно разделить на три категории:

- модальная дисперсия - вызвана разными модами или путями, по которым луч света попадает в волокно, в результате чего разные лучи проходят разные световые расстояния и достигают другого конца волокна в разное время;

- дисперсия мод поляризации - возникающая из-за того, что волокно не является цилиндрическим волноводом, приводит к явлению, которое вызывает диффузионный импульс, что ослабляет баланс между компонентами поляризации;

- хроматическая дисперсия, возникающая в результате дисперсии материала и волновода (собственного содержания и геометрии волокна) и обусловленная изменением показателя преломления оптической среды в зависимости от длины волны.

Допущение, что оптическая система связи ведет себя линейно, является подходящим приближением, когда средний уровень мощности (величина порядка мВт) и скорость передачи не превышают 2,5 Гбит/с. Однако на высоких скоростях (около 10 Гбит/с) или более высоких мощностях эффекты являются достаточно значительными.

Нелинейные эффекты приводят к зависимости показателя преломления от приложенной напряженности поля к так называемому эффекту Керра, который, в свою очередь, пропорционален квадрату амплитуды: автофазовая модуляция, перекрестная фазовая модуляция и четырехволновое смешение. Из-за взаимодействия световых волн с фотонами в кремнии сердцевины, возникающими за счет дифракционного эффекта в волокне могут происходить вынужденное комбинационное рассеяние и вынужденное рассеяние Бриллюэна.

Порядок выполнения работы

В начале проведения данной работы отрежьте с помощью специальных приборов необходимую длину волоконного кабеля (не более 10-15 см). Для этого воспользуйтесь скалывателем для оптических волокон, это позволит создать ровных угол скола, что обеспечит беспрепятственный вход излучения в волокно. Порядок выполнения работы следующий:

1) Измерьте мощность лазерного излучения при помощи измерителя мощности, значения занесите в таблицу 2.

2) Соберите экспериментальную схему следующим образом. Воспользуйтесь фокусирующей линзой с фокусным расстоянием 50 мм, закрепите линзу напротив источника излучения. Проверьте качество полученного пучка для определения необходимости повторной юстировки.

3) Установите после линзы на некотором расстоянии столик с держателем для оптоволокон. Положите оптоволокно в специальный разъем и закрепите. Убедитесь, что оптическое волокно уложено ровно.

4) Отъюстируйте схему таким образом, чтобы перетяжка пучка попадала на вход оптического волокна. Для этого можно перемещать столик по оси X-Y. Когда излучение будет заведено в оптическое волокно, на другом его конце будет наблюдаться свечение.

5) Измерьте выходную мощность оптического волокна. Результаты занесите в таблицу 2.

6) Вычислите коэффициент затухания.

7) Повторите пункты 3-6 для оптических волокон разной длины.

Таблица 2. Экспериментальные данные

| Номер эксперимента | Длина оптического волокна L , м | Мощность лазерного излучения $P(l_1)$, Вт | Мощность излучения на выходе из оптоволокна $P(l_2)$, Вт | Коэффициент затухания α , дБ/км |
|--------------------|--------------------------------------|---|--|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Результаты измерений в таблице, расчеты всех необходимых значений для заполнения таблицы.
4. Описание и анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Из чего состоит оптическое волокно?
2. Как называется физическое явление, по которому свет распространяется по оптоволокну? В чем оно заключается?
3. Чем отличается одномодовое и многомодовое оптическое волокно?
4. В каких технических задачах применяется оптоволокно?
5. Поясните достоинства и недостатки одномодового оптоволокна.

Практическая работа № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: провести экспериментальное измерение параметра расходимости лазерного излучения.

Теоретическая часть

При изучении лазерных устройств особое внимание отводится таким характеристикам, как длина волны излучения (которая была измерена двумя способами в Практической работе №1 и №2), длительность лазерного импульса и частота следования импульсов. При этом, стоит отметить такую важную характеристику лазерного пучка, как расходимость. Из теории дифракции Фраунгофера на круглом отверстии диаметра D следует, что угловая расходимость Θ , соответствующая первому темному кольцу, равна (13):

$$\Theta = 1,22\lambda/D \quad (13)$$

Обычно ширину пучка измеряют между точками, в которых интенсивность света в два раза меньше, чем на оси. С учетом этого дифракционная расходимость пучка равна (14):

$$\Theta \approx \lambda/D \quad (14)$$

Для расчета угловой расходимости в горизонтальной плоскости используется следующая формула (15):

$$\varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_2 - a_1}{L} \quad (15)$$

Угол расходимости лазерного луча в вертикальной плоскости равен (16):

$$\varphi_2 \approx \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{b_2 - b_1}{L} \quad (16)$$

Причина расходимости лазерного луча может быть вызвана погрешностями основных компонент в устройстве лазера. Например, на расходимость может повлиять наличие неоднородностей в активной среде, что обусловлено наличием примесей, либо дефектами кристаллической решетки, также к этому может приводить «неидеальная» поверхность оптических компонент.

При изучении вопросов расходимости излучения часто можно встретить разделение структуры поля на ближнюю и дальнюю зоны. Необходимо отметить, что несмотря на частое описание в качестве преимуществ лазерного излучения такой характеристики, как когерентность, некоторая «некогерентная» составляющая всегда имеет место в выходном пучке. Помимо этого, активная среда лазера может иметь в себе неоднородности, на которых происходит рассеяние излучения, к этому может привести и несовершенство оптической системы. Все указанные факторы приведут к образованию в ближней зоне одновременно как сферических, так и плоских волн. Данная область имеет название – френелева. На рис. 21 схематично изображены ближняя и дальняя зоны.

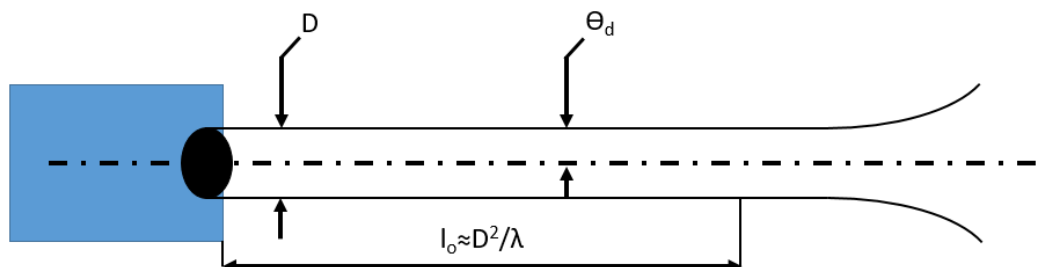


Рис. 21. Ближняя и дальняя зоны

Порядок выполнения работы

В данной работе в качестве источника излучения будет использоваться полупроводниковая лазерная система. Оценка расходимости излучения будет производиться при помощи измерения размеров лазерного пучка в двух сечениях, находящихся друг от друга на некоторых расстояниях.

Установка состоит из полупроводникового лазера, закрепленного в штативе и подключенного к блоку питания. Размеры светового пятна

измеряются на экране, который может перемещаться по ходу луча. Ход работы следующий:

1) Необходимо установить источник излучения в держатель и закрепить его на столике. Далее включите источник излучения.

2) Установить напротив источника излучения экран, с возможностью его перемещения по оси Х. К экрану приложить миллиметровую бумагу и зафиксировать размеры пятна в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной.

3) Переместить экран на расстояние L на достаточное расстояние (1-2 м). Зафиксировать данное значение. Приложить к экрану миллиметровую бумагу и снова зафиксировать размеры пятна в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной.

4) Выключить источник лазерного излучения.

5) Произвести расчёт угловой расходимости излучения лазера в горизонтальном и вертикальном направлении. Полученные значения угла в радианах перевести также в градусы.

6) Использовать второй метод – метод фокусировки - для определения расходимости. Данная методика подразумевает измерения радиального распределения интенсивности пучка. При этом, пучок фокусируется в фокальной плоскости линзы. При помощи объектива возможно получить из плоского фронта волны, сферический фронт. В том случае, если изначально волна не имеет плоский фронт, а имеет расхождение, то в фокальной плоскости можно наблюдать изображение с конечными размерами (круг некоторого диаметра d) (17).

$$d = \theta \cdot F, \quad (17)$$

где F – фокусное расстояние объектива.

Таким образом, необходимо взять объектив (без аберраций) и измерить его фокусное расстояние. Далее нужно измерить диаметр пучка на уровне $I_{\max}/2$. Полученное значение подставить в формулу выше. Записать полученное значение расходимости. При этом, объектив с большим фокусным расстоянием даст более точный результат.

Можно воспользоваться и методом калиброванных диафрагм. В этом случае, размещая поочередно диафрагмы с известным диаметром отверстия d1 в фокальной плоскости, измеряют мощность (интенсивность) прошедшего излучения (используя стандартный измеритель мощности лазерного излучения, либо ФЭУ, с последующим усилением

сигнала, если его величина мала). Соответственно, при $d_1 > d$ все излучение пройдет через диафрагму, при $d_1 < d$ – лишь часть. При прохождении половины интенсивности $d_1 = d$. И далее определяем θ . Возможен еще один простой вариант определения θ , объединяющий оба предыдущих способа, и более точный. В фокальной плоскости длиннофокусной линзы размещают диафрагму с диаметром d_1 заведомо много меньшим d . Затем, прецизионно перемещая диафрагму поперек оси пучка, получают радиальное распределение интенсивности пучка, определяют I_{\max} , и d на уровне $I_{\max}/2$. В качестве приемника излучения здесь также используется либо измеритель мощности, либо другой стандартный прибор. Более точное определение расходимости лазерного пучка возможно с привлечением более сложных методов.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Результаты измерений, расчет расхождения лазерного пучка.
4. Описание и анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Как определяют расходимость светового пятна?
- 2) Можно ли повлиять на расходимость лазерного пучка?
- 3) Какие причины приводят к расходимости излучения?
- 4) Чему равна угловая расходимость Θ , соответствующая первому темному кольцу?

Практическая работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ПОМОЩИ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: изучение принципов работы гальванометрической сканирующей системы. Маркировка мишеней лазерным излучением.

Теоретическая часть

Лазерная маркировка и гравировка представляет собой бесконтактный метод нанесения на предметы различных изображений с помощью лазерного излучения. Для того, чтобы лазерный луч следовал заранее заданной траектории перемещения по поверхности объекта, используют специализированные устройства – лазерные сканирующие головки. На рис. 22 схематично изображен принцип работы сканирующей системы.

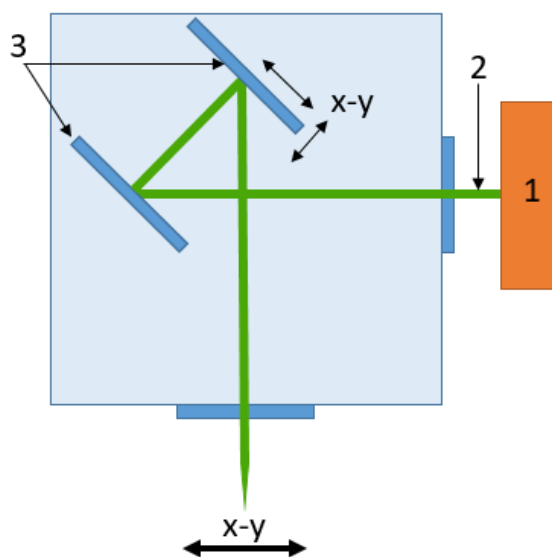


Рис. 22. Схема работы гальванометрической сканирующей системы

На рис. 13 представлены следующие обозначения: 1 – источник лазерного излучения, 2 – лазерное излучение, 3 – зеркала, одно из которых моторизировано передвигается по осям $x-y$, за счет чего и осуществляется перемещение лазерного луча.

Лазерная маркировка включает в себя два различных типа в зависимости от дальнейшей области применения. Первый тип представляет собой удаление материала с поверхности образца с заданной глубиной, второй тип необходим для изменения цвета, контраста, либо отражательной способности поверхности материала. Другими словами, лазерная маркировка позволяет создавать считываемые человеком и/или машиной идентификационные данные или информацию на материале. В связи с этим, данную технологию часто используют для создания штрихкода, серийных номеров, либо иной уникальной информации на объекте. Помимо этого, возможно применение и в сфере дизайна, когда

лазерную маркировку используют для нанесения изображения логотипов, диаграмм, иллюстраций и фотографий. Примечательно, что лазер – как инструмент, достаточно универсален и может применяться фактически на любых материалах – металле, коже, дереве, пластике, картоне, оргстекле, резине, и других. В данном случае необходимо лишь корректно подобрать режим обработки, зная характеристики конкретного материала.

Таким образом, лазерная маркировка находит множество применений: маркировка готовых изделий массового производства, маркировка серийных изделий с оперативно изменяющейся информацией, маркировка изделий с повышенными требованиями к стойкости наносимой информации и другие.

Порядок выполнения работы

Перед началом практической работы убедитесь, что глаза защищены специальными очками и на руках отсутствуют предметы, от которых возможно отражение лазерного излучения. Ход работы следующий:

1) Запустите лазерную установку и измерьте мощность лазерного излучения.

2) Подключите гальванометрическую сканирующую систему. Убедитесь, что оптический путь отъюстирован и излучение падает строго перпендикулярно поверхности зеркал.

3) Запустите программу «Редактор». Используйте следующее задание: выполните маркировку поверхности образца тремя геометрическими фигурами, которые представлены на изображении ниже (рис. 23):

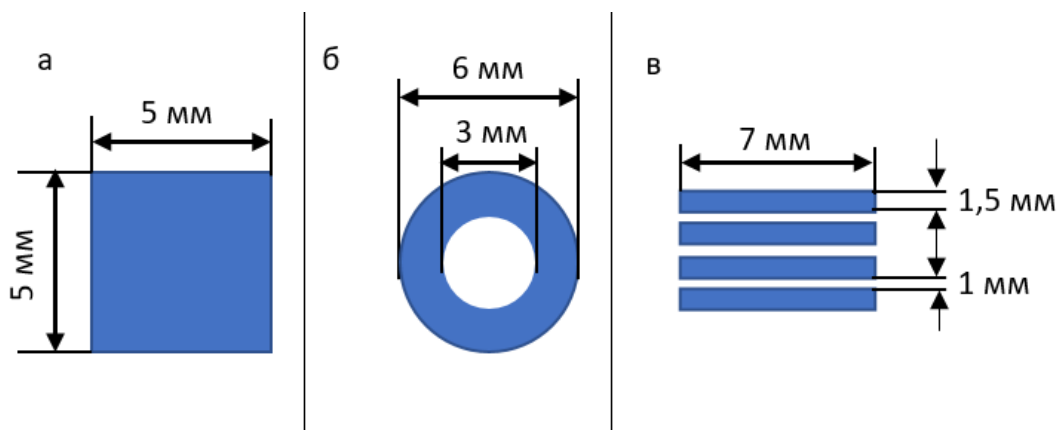


Рис. 23. Геометрические фигуры для маркировки поверхности

Установите маркировку со скоростью перемещения луча 100 мм/с. Мощность излучения на первом этапе необходимо выставить, равную 500 мВт. Плотность заливки – 100 линий на мм. Количество проходов – 10.

4) Образцы протрите ацетоном и установите их на специальный столик под сканирующей системой. Убедитесь, что место перетяжки лазерного луча попадает на поверхность образца.

5) Запустите программу маркировки. Промаркируйте каждый образец.

6) Далее сделайте аналогичную операцию для фигуры, изображенной на рис. 14 а, с мощностью излучения 800 и 1000 мВт на том же образце. Сканирование каждый раз производить в область, не обработанную ранее лазерным излучением. Выключите источник лазерного излучения.

7) Исследуйте поверхность первого образца с тремя фигурами, которые были сделаны при разных режимах воздействия, при помощи оптического микроскопа.

8) Результаты в виде графических изображений сохраните на электронном носителе.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Результаты в виде графических изображений всех промаркированных образцов.
4. Описание и анализ полученных результатов. Сравнение поверхности обработки при разной мощности лазерного излучения. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Описать устройство и принцип работы гальванометрической сканирующей системы.
- 2) Для чего служит гальванометрическая сканирующая система?
- 3) За счет какого физического процесса реализуется лазерная маркировка?
- 4) Как изменение мощности лазерного излучения влияет на поверхность обработки?

5) Как подобрать режим воздействия лазерного излучения для маркировки поверхности?

Практическая работа № 6

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ

Цель работы: изучение принципов работы лазера, ознакомление с техникой безопасности при работе лазерными комплексами. Изготовление коллоидных растворов методом лазерной абляции в жидкость.

Теоретическая часть.

Большой практический интерес представляет собой процесс абляции материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов в различных средах. С помощью такой обработки возможно не только получать различные структуры на поверхности материала, которые могут иметь значительное отличие от исходной поверхности и обладать улучшенными физико-механическими свойствами, но и синтезировать различные гранулы, которые, в совокупности, могут представлять собой порошковый материал, различной формы и размеров. Получаемые при помощи лазерного излучения наноматериалы, находят широкое применение в различных областях, они могут применяться в качестве микроинструмента для пайки микросхем, либо резцов для обработки металлов, в качестве спекающей добавки для улучшения физико-механических свойств, в качестве наполнителя. Лазерное излучение позволяет синтезировать порошковый материал узкого гранулометрического состава за счет высокой локальности обработки. При использовании одновременно лазерного излучения и подбора различных сред возможно создавать принципиально новые материалы, которые другим путем получить или очень трудно, или вообще невозможно, в связи с чем такие материалы могут обладать уникальными свойствами.

Лазерная абляция представляет собой процесс удаления вещества с его поверхности при помощи лазерного импульса. Если воздействие производится в жидкой среде, то при определённом режиме воздействия происходит образование так называемого коллоидного раствора

– раствор, содержащий наночастицы обрабатываемого материала. На рис. 24 представлена упрощенная схема лазерной абляции в жидкой среде.

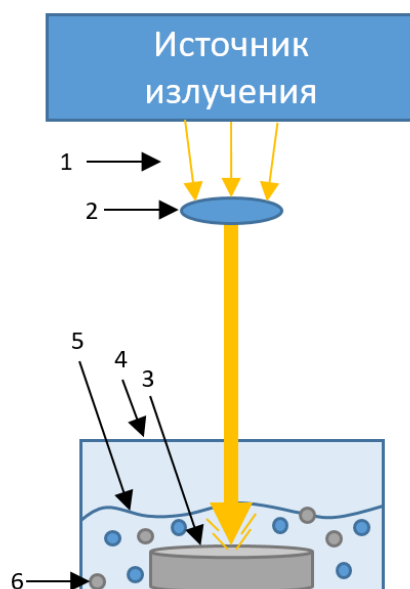


Рис. 24. Схема процесса лазерной абляции в жидкой среде

На рис. 24 приняты следующие обозначения: 1 – лазерное излучение, 2 – фокусирующая линза, 3 – образец, 4 – сосуд, 5 – жидкость, 6 – абляционные наночастицы. Во время воздействия импульса происходит изменение состояния вещества, которое связано с повышением температуры и энтальпии системы. Энергия фотона, который был поглощен системой, инициирует возбуждение электронной подсистемы в некоторой локальной области. Обычно время релаксации процесса меньше, чем время начального возбуждения. Но в некоторых случаях это условие не выполняется, и время процесса возбуждения может быть больше. В локальной области воздействия температура высока, вследствие этого лазер испаряет материал, и могут образовываться пузырьки пара, это приводит к нормальному процессу кипения. Расширение пузырьков пара инициирует взрывное вскипание.

Основным механизмом лазерной абляции при фемтосекундных длительностях импульса является фазовый взрыв, вследствие которого появляется парокапельная смесь, содержащая в себе пар и наночастицы. Такой метод, как фемтосекундная лазерная абляция, имеет и некоторые недостатки, основным из которых является низкая эффектив-

ность данного метода. Тем не менее, данный метод является перспективным в научных исследованиях в связи с возможным синтезом частиц, имеющих правильную сферичную форму, получением порошков с узким гранулометрическим составом, что влияет на текучесть и укладку порошкового материала. При помощи лазерного излучения возможно обрабатывать практически любые виды материалов, а также получать их различные соединения, правильно подобрав режим обработки.

Наночастицы, то есть частицы с размерами в нанометровом диапазоне, являются важными материалами, полезными в ряде приложений в физике, химии, технике и биологии. В основном это связано с тем, что они имеют большое отношение поверхности к объему и благодаря эффекту квантового ограничения обладают уникальными физическими свойствами, зависящими от их размера. Существует множество методов синтеза наночастиц, которые обычно основаны на золь-гель коллоидной химии, электрохимическом травлении и т. д. Среди них - синтез наночастиц методом лазерной абляции, который включает генерацию наночастиц путем лазерной абляции твердого тела. Это быстрый и простой метод синтеза наночастиц по сравнению с другими методами. Он не требует длительного времени реакции, высоких температур или многостадийных процедур химического синтеза. Благодаря этой методике возможно производить ряд различных типов наночастиц от металлических до полупроводниковых и полимерных, а также наночастиц из сложных многоэлементных металлических или полупроводниковых сплавов. Он не требует использования токсичных, опасных или пирофорных химических прекурсоров для синтеза наноматериалов и, таким образом, является экологически чистым («зеленым») и лабораторно безопасным методом. В случае, если генерация происходит в воде, образующиеся наночастицы, коллоидные растворы являются сверхчистыми (т.е. не содержат каких-либо противоионов или побочных продуктов реакции), что облегчает использование этих наночастиц в биологических или биохимических приложениях. Полученные наночастицы не несут на своей поверхности никаких изолирующих блокирующих лигандов, что, в свою очередь, облегчает их применение в органической электронике. Полученные наночастицы можно легко функционализировать выбранным лигандом путем последующего добавления лиганда в коллоидный раствор наночастиц после

его синтеза или путем проведения абляции в подходящем растворителе. Метод может применяться при практически неограниченном сочетании целевых материалов и жидкостей, что приводит к прямому синтезу наночастиц в выбранной среде. Свойства получаемых наночастиц, такие как форма, размер, распределение по размерам, состав и структура для каждого материала мишени, зависят от выбора параметров лазера, используемых для абляции, таких как длина волны, частота повторения импульсов, ширина импульса, энергия импульса, а также среды (вакуум, контролируемая газовая атмосфера или жидкость), в которой происходит генерация. Кроме того, генерация наночастиц в жидкостях дает уникальное преимущество, заключающееся в точной настройке распределения полученных наночастиц по размерам просто путем регулирования продолжительности времени абляции или путем пост-облучения коллоидного раствора полученных наночастиц. Наконец, синтез наночастиц методом лазерной абляции открывает возможность формирования так называемых «коллоидных сплавов», т.е. коллоидных растворов, состоящих из наночастиц сплавов или смеси наночастиц разных типов.

Порядок выполнения работы

Перед началом практической работы убедитесь, что глаза защищены специальными очками и на руках отсутствуют предметы, от которых возможно отражение лазерного излучения. Ход работы следующий:

1) Включите лазерную установку. Измерьте мощность лазерного излучения при помощи измерителя мощности.

2) Подключите гальваносканер. Проверьте юстировку оптической системы. Установите место перетяжки излучения. На компьютере откройте программу «Редактор» для построения области воздействия. Нарисуйте квадрат размерами 5 на 5 мм, определите его положение по центру и нажмите «Преобразовать в кривые». Установите скорость перемещения луча 100 мм/с. Далее задайте количество проходов, равное 10.

3) В программе управления лазерной системой необходимо выставить «Close shutter» для того, чтобы установить образец с сосудом в область воздействия лазера. Возьмите лабораторный образец, протрите

его поверхность ацетоном, при этом, перемещайте образец только с использованием специального пинцета. Отложите образец на чистую поверхность.

4) Возьмите сосуд, также предварительно протерев его раствором ацетона. Положите в середину сосуда образец. Залейте дистиллированной водой на высоту 15-20 мм.

5) Установите сосуд в область воздействия на специальный столик. Включите излучение при помощи кнопки «Open shutter» и убедитесь, что место перетяжки лазерного луча попадает на поверхность образца.

6) Установите мощность лазерного излучения, равную 500 мВт при помощи поляризатора и тока накачки.

7) Запустите программу маркировщик, нажав на изображение карандаша. Дождитесь окончания операции.

8) При помощи шприца транспортируйте получившийся раствор в пробирку, заранее ее пронумеровав.

8) Прodelайте данный опыт еще 2 раза, меняя при этом мощность лазерного излучения на 800 мВт и 1000 мВт.

9) Сравните полученные результаты, опишите наблюдение процесса абляции при разных мощностях.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Описание наблюдений при проведении эксперимента.
4. Анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Что подразумевается под понятием лазерная абляция?
- 2) В чем преимущества и недостатки фемтосекундной лазерной абляции материалов?
- 3) Для чего используется метод лазерной абляции?
- 4) Что такое коллоидный раствор?
- 5) Какие физические механизмы преобладают при ультракоротком воздействии?

Практическая работа № 7

ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Цель работы: Провести экспериментальные исследования по взаимодействию лазерного излучения наносекундной длительности с поверхностью титана. Изучить обработанные образцы при помощи зондового микроскопа.

Теоретическая часть

Лазерное текстурирование – это процесс, который изменяет свойства поверхности материала путем изменения его текстуры и шероховатости. Лазерный луч создает микроузоры на поверхности посредством лазерной абляции, удаляя слои с точностью до микрометра и идеальной повторяемостью. Типичные узоры включают ямочки, бороздки и свободные формы.

Лазерное текстурирование поверхности можно использовать для улучшения таких свойств, как адгезия, смачиваемость, электро- и теплопроводность, а также трение. Например, возможно улучшить сцепление с поверхностью перед нанесением обычных покрытий, таких как клей, краска или керамика. Лазерное текстурирование также можно использовать для подготовки поверхностей к нанесению термического напыления и лазерной наплавки, а также для улучшения характеристик механических уплотнений. Для обработки поверхности, такой как абразивоструйная очистка и процессы химического травления, требуются расходные материалы, такие как стальная крошка и кислота, для текстурирования поверхности. В отличие от этих процедур, процесс лазерного текстурирования осуществляется без расходных материалов. Это приводит к низким эксплуатационным расходам, минимальным затратам на техническое обслуживание, сохранению здоровья и безопасности на рабочем месте.

Лазерное текстурирование использует лазерную абляцию для выборочного удаления материалов с определенных участков поверхности. Регулируя параметры лазера, мы можем контролировать, сколько поверхности удаляется, а также создавать различные узоры. Обычно

это увеличивает шероховатость, создавая текстуру поверхности, на которой может легко задерживаться клей и обеспечивать дополнительную поверхность крепления.

Чтобы достичь порога абляции материала, импульсные лазеры концентрируют энергию для достижения высокой пиковой мощности. Время, необходимое для текстурирования поверхности, зависит от материала, желаемого уровня шероховатости и выходной мощности лазерной системы.

Лазерное текстурирование можно использовать для обработки поверхностей перед лазерной наплавкой, чтобы улучшить адгезию материала к поверхности и, таким образом, повысить его эффективность. В этом процессе используется лазерный луч для травления точной и повторяемой текстурированной поверхности, обеспечивая безупречную и последовательную подготовку поверхности.

Другие виды обработки поверхности, такие как абразивно-струйная очистка, могут создавать поверхностные дефекты, которые затрудняют лазерную наплавку. Технология лазерного текстурирования не создает подобных дефектов.

Подготовка поверхностей с помощью лазерного текстурирования делает методы термического напыления, например, как плазменное напыление, более эффективными. Благодаря высокой точности и повторяемости лазерное текстурирование может обеспечить оптимальную шероховатость поверхности, необходимую для нанесения покрытий распылением. Шероховатость улучшает смачиваемость подложки, что способствует растеканию брызг и формирует более прочную связь между покрытием и подложкой. Это также обеспечивает оптимальную плотность, пористость и количество включений покрытия.

При обработке мягких металлов, таких как алюминий и магний, методы текстурирования (пескоструйная обработка и химическая обработка) могут повредить поверхность, создавая микротрещины и включения. Лазерное текстурирование также не вызывает этих дефектов. Такая технология может даже укрепить детали с помощью лазерной гравировки определенных рисунков, которые блокируют распространение трещин.

Краска хорошо прилипает к чистым, шероховатым и волнистым поверхностям. Этот тип поверхности также можно получить с помощью лазерного текстурирования, чтобы значительно улучшить каче-

ство окраски, например, деталей из листового металла. Лазерное текстурирование оптимизирует адгезию и долговечность краски за счет удаления поверхностных загрязнений и улучшения электростатической связи между поверхностью и краской. Технология также предотвращает отслаивание краски, создавая устойчивый к коррозии оксидный слой. Благодаря высокой точности, лазерная технология позволяет получать стабильные результаты окраски.

Трение и износ являются двумя основными проблемами в различных инженерных приложениях, где существует взаимодействие поверхностей. Огромные исследовательские усилия были предприняты для контроля трибологических характеристик материалов, в которых сопрягаемые поверхности скользят друг относительно друга с манипулируемой текстурой поверхности. Текстурирование поверхности считается эффективным и широко используемым подходом к изменению взаимодействия между поверхностями для улучшения смазки, контролируемого трения и повышения износостойкости конструкционных материалов. На сегодняшний день влияние текстурирования поверхности на трибологические характеристики конструкционных материалов широко изучено экспериментально и теоретически.

Порядок выполнения работы

Перед началом практической работы убедитесь, что глаза защищены специальными очками и на руках отсутствуют предметы, от которых возможно отражение лазерного излучения. Ход работы следующий:

1) Включите лазерную установку. Измерьте мощность лазерного излучения при помощи измерителя мощности.

2) Проведите ряд экспериментов по исследованию условий получения того или иного цвета на поверхности сплава титана при лазерном воздействии, занесите параметры эксперимента в таблицу (Таблица 3).

Таблица 3. Экспериментальные данные

| № | Скорость, V(мм/сек) | Мощность, P(%) | Частота, f (кГц) |
|---|---------------------|----------------|------------------|
| 1 | 2 | 100 | 20 |
| 2 | 3 | 100 | 20 |
| 3 | 4 | 100 | 20 |
| 4 | 5 | 100 | 20 |

| | | | |
|---|----|-----|----|
| 5 | 6 | 100 | 20 |
| 6 | 7 | 100 | 20 |
| 7 | 8 | 100 | 20 |
| 8 | 9 | 100 | 20 |
| 9 | 10 | 100 | 20 |
| | | | |
| N | | | |

3) Изучить обработанные образцы при помощи зондового микроскопа.

4) Рассчитать перекрытие лазерного излучения (L) по формуле (18):

$$L_x \approx \left(1 - \frac{v_{\text{ск}}}{f * d}\right) * 100\%, \quad (18)$$

где $v_{\text{ск}}$ – скорость движения лазерного пучка, f – частота следования импульсов, d – диаметр сфокусированного пучка.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Описание каждого этапа при проведении эксперимента с графическими материалами.
4. Расчеты перекрытий лазерного излучения.
5. Анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Лазерное текстурирование поверхности металлов.
- 2) Основные процессы при воздействии на металлы лазерного излучения?
- 3) Особенности лазерного нагрева материала.
- 4) Свойства и применения функционализированных поверхностей при обработке лазерным излучением.

Практическая работа № 8

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ПЕРФОРАЦИЮ ОТВЕРСТИЙ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Провести эксперимент по лазерной перфорации отверстий листовых материалов. Получить зависимость диаметров отверстий от количества импульсов. Изучить физические процессы, протекающие при лазерном воздействии на металлы и их влияние на величину диаметра отверстий.

Теоретическая часть

Перфорация является результатом изготовления значительного числа правильно расположенных отверстий правильной формы в листовом и ином материале. В большинстве областей перфорацией называется сам процесс перфорирования. Перфорированный лист представляет собой материал, который имеет в себе как конструкционные, так и декоративные свойства. Данный факт позволяет использовать его в различных отраслях промышленности. Пример лазерного микроперфорирования представлен на рис. 25

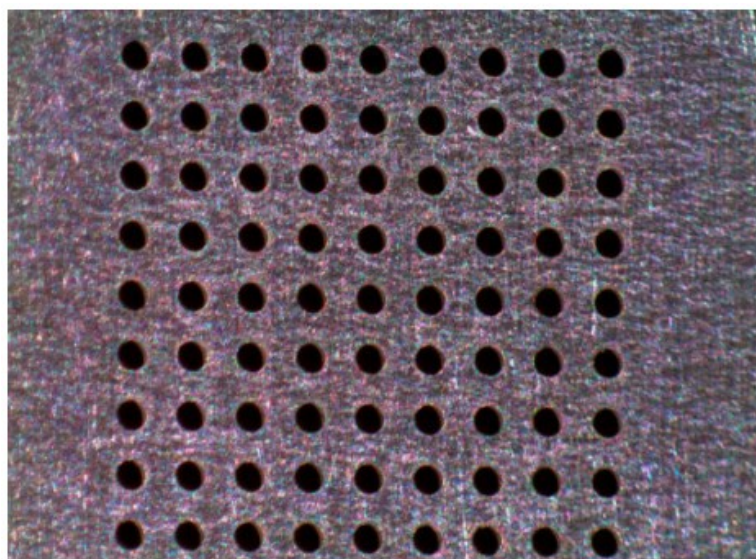


Рис. 25 Микроперфорированная пластина из нержавеющей стали

Размеры отверстий, а также расстояние между центрами отверстий могут быть разными и выбираются потребителем из предлагаемого размерного ряда. Характер расположения отверстий друг относительно друга также может быть различным. Перфорация металлического листа из различных сталей, сплавов алюминия и меди осуществляется при толщине листов-заготовок от 0,5 до 3 мм.

Лазерная перфорация высокой плотности предполагает использование энергии лазера для создания крошечных отверстий в листах, пленках или пластинах. Процесс начинается с лазера, который генерирует импульс с фиксированной частотой повторения. Затем с помощью светоделителя преобразуется одиночный лазерный луч в управляемую решетку лучей высокой интенсивности, которые пробивают материал отверстиями с требуемым диаметром. Вращающееся полотно переносит набор материалов для перфорации в заданные места для каждого лазерного импульса. В результате лазерная перфорация высокой плотности обеспечивает точную резку, высокую производительность и точное позиционирование. В отличие от методов перфорации с механическим приводом, на материале не остается остатков обработки.

Лазерная микроперфорация заключается в проделывании очень маленьких сквозных отверстий в различных листах, пленках или пластинах с использованием энергии лазерного источника в качестве метода перфорации. Применение этого метода очень разнообразно и охватывает почти все отрасли, от промышленных, таких как автомобилестроение или авиация, до здравоохранения и продуктов питания, потребительских товаров и обороны.

Широко используется лазерная микроперфорация пластиковых пленок в упаковочном секторе для изготовления открывалок, а в пищевом секторе она используется для продления срока службы скоропортящихся продуктов, таких как фрукты и овощи, создавая контролируемую атмосферу. Однако одним из менее распространенных применений является микроперфорация жесткого пластика, которую можно использовать для создания невидимых точек света, которые становятся видимыми, когда свет проходит через них.

Основным применением в большинстве промышленных секторов является изготовление инжекторов для турбин или автомобилей, а в санитарном секторе - производство медицинского оборудования, где требуется высокая точность и очень малые размеры.

Лазерная микроперфорация имеет множество преимуществ, некоторые из них:

- Минимальный размер отверстия, достижимый только с помощью этого метода, благодаря различным доступным оптическим конфигурациям.
- Метод не требует расходных материалов и бережно относится к окружающей среде, так как не образует отходов.
- Возможность перфорации любого материала при правильном выборе лазера.
- Возможность проделывания очень близких отверстий с высокой точностью без разрушения окружающего материала.
- Высокая скорость перфорации, удобна для поточных процессов.

Порядок выполнения работы

Перед началом практической работы убедитесь, что глаза защищены специальными очками и на руках отсутствуют предметы, от которых возможно отражение лазерного излучения. Ход работы следующий:

1) Используйте для проведения эксперимента лазерную установку «ЛРТ 7 Watt Pulsed GR Laser». Измерьте мощность лазерного излучения при помощи измерителя мощности.

2) Возьмите образец из нержавеющей стали. Проведите ряд экспериментов со следующими параметрами воздействия (Таблица 4-6):

Таблица 4. Режим №1

| № | Частота, Гц | Энергия, Дж | Длительность импульса, мс | Длительность воздействия |
|---|-------------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 4,7 | 2 | 1 секунда |
| 2 | 10 | 4,7 | 2 | 2 секунды |
| 3 | 10 | 4,7 | 2 | 3 секунды |

Таблица 5. Режим №2

| № | Частота, Гц | Энергия, Дж | Длительность импульса, мс | Длительность воздействия |
|---|-------------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 4,5 | 2 | 1 секунда |
| 2 | 10 | 4,5 | 2 | 2 секунды |
| 3 | 10 | 4,5 | 2 | 3 секунды |

Таблица 6. Режим №3

| № | Частота, Гц | Энергия, Дж | Длительность импульса, мс | Количество импульсов, шт |
|---|-------------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 2,5 | 10 | 1 | 10 |
| 2 | 2,5 | 10 | 1 | 20 |
| 3 | 2,5 | 10 | 1 | 30 |
| 4 | 2,5 | 10 | 1 | 40 |
| 5 | 2,5 | 10 | 1 | 50 |
| 6 | 2,5 | 10 | 1 | 70 |

3) Сфотографируйте каждый результат и занесите в таблицу.

4) Далее используйте установку «LPT 7 Watt Pulsed GR Laser». В таблице 7 представлены параметры воздействия. Сфотографируйте каждый результат и занесите в таблицу.

Таблица 7. Режим №4

| № | Мощность, Вт | Частота, кГц | Длительность импульса, нс | Количество проходов, шт |
|---|--------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 7 | 20 | 10 | 1000 |
| 2 | 7 | 20 | 10 | 2000 |
| 3 | 7 | 20 | 10 | 3000 |
| 4 | 7 | 20 | 10 | 4000 |
| 5 | 7 | 20 | 10 | 5000 |

5) Изучите обработанные образцы при помощи оптического микроскопа.

6) Получите изображения выборочных обработанных образцов при помощи растрового электронного микроскопа.

7) Занесите в таблицу и постройте график зависимости размеров отверстий от режимов воздействия.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.

2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.

3. Описание графических изображений, полученных при помощи оптического и растрового электронного микроскопа.

4. Анализ полученных результатов. Графики зависимости размеров отверстий от режимов воздействия. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Что такое лазерная перфорация?
- 2) Как зависит размер отверстий от режимов воздействия?
- 3) Для чего используется перфорация?
- 4) Как можно оценить размеры отверстий, полученных при помощи лазерной обработки?
- 5) Опишите физические процессы, протекающие при лазерном воздействии на металлы и их влияние на величину диаметра отверстий?

Практическая работа № 9

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: Провести эксперимент по нагреву стальной пластины с помощью лазерного излучения. Измерить зависимость скорости увеличения температуры в зависимости от мощности лазерного излучения. Провести сравнение теоретических и экспериментальных изменений температуры образца.

Теоретическая часть.

Физические явления, связанные с нагревом материала лазерным излучением, можно описать известным дифференциальным уравнением теплопроводности. Разрешение этого уравнения в частных производных, включая нелинейные и неоднородные случаи, обычно осуществляется численными методами, методом конечных разностей или методом конечных элементов. При использовании непрерывных лазеров в большинстве случаев требуется, чтобы мощность была как можно более стабильной в течение длительного времени, а также в течение короткого времени, в зависимости от конкретного применения. Для обеспечения стабильности, в том числе в условиях изменяющихся условий окружающей среды, таких как температура, вибрация и изменение параметров самого лазера, применяются микропроцессорные контуры управления.

Порядок выполнения работы

Перед началом практической работы убедитесь, что глаза защищены специальными очками и на руках отсутствуют предметы, от которых возможно отражение лазерного излучения. Ход работы следующий:

1) Используйте для проведения эксперимента лазерную установку иттербиевого волоконного лазера ЛС-02-Т. Данная лазерная установка -мощный, компактный и эффективный лазер, излучающий 200 Вт оптической мощности на длине волны 1070 нм. Данный лазер имеет IV класс опасности, т.е. его излучение может вызвать повреждение кожи и глаз, в том числе и необратимые изменения сетчатки, поэтому при работе с ним необходимо соблюдать определенные меры предосторожности. Измерьте мощность лазерного излучения при помощи измерителя мощности.

2) Подготовьте образец для проведения эксперимента. Образец, используемый в работе – стальная пластинка, марка стали: СТ45. Класс: Сталь конструкционная углеродистая качественная.

3) Проведите эксперимент при различном значении мощности лазерного излучения, результаты занесите в табл. 8.

Таблица 8. Изменение температуры пластинки

| t, с | T, °C | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | W = 10 Вт | W = 15 Вт | W = 20 Вт | W = 25 Вт |
| 0 | | | | |
| 10 | | | | |
| 20 | | | | |
| 30 | | | | |
| 40 | | | | |
| 50 | | | | |
| 60 | | | | |

4) Постройте график скорости роста температуры от времени в зависимости от мощности излучения.

5) Рассчитайте теоретическое значение температуры нагрева. Температура вычисляется по формуле:

$$T_0(t) \approx \frac{2Aq_0\sqrt{at}}{\sqrt{\pi k}} + T_n, \quad (18)$$

где T – температура; T_n – начальная температура; k – теплопроводность; q_0 – плотность светового потока.

$$q = A \cdot q_0, \quad (19)$$

где A – коэффициент теплового поглощения; q – плотность поглощённого светового потока.

$$q = W/S \quad (20)$$

$$S = \pi \cdot r_0^2 \quad (21)$$

$$T_0(t) = \frac{2W\sqrt{at}}{S\sqrt{\pi k}} + T_n, \quad (22)$$

где r_0 – радиус пучка: $14 \cdot 10^{-3}$ см; $a = 11,5 \cdot 10^{-6}$; $T_{\text{начальная}} = 22^\circ\text{C}$;

6) Постройте сравнительный график скорости роста температуры от времени в зависимости от мощности излучения по теоретическим расчётам.

7) Постройте график, отражающий сравнение теоретических и экспериментальных изменений температуры образца.

8) Запишите основные выводы по проделанной работе.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. График скорости роста температуры от времени в зависимости от мощности излучения, его описание и обоснование.
4. График сравнения скорости роста температуры от времени в зависимости от мощности излучения по теоретическим расчётам, его описание и обоснование.
5. График, отражающий сравнение теоретических и экспериментальных изменений температуры образца, его описание и обоснование.
6. Анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1) Опишите процесс взаимодействия света с поверхностью твёрдого непрозрачного тела.
- 2) Опишите зависимость коэффициента отражения от угла падения.

3) С помощью каких приборов можно измерить температуру нагрева образца при лазерном воздействии?

4) Влияет ли коэффициент отражения на максимальный нагрев металлов?

5) Приводит ли изменение температуры образца к изменению поглощательной способности? Объясните свой ответ.

Практическая работа № 10

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ

Цель работы: Изучить понятие плазмы. Изучить методы формирования плазмы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. Определить спектральные характеристики лазерной плазмы при взаимодействии на металлические образцы.

Теоретическая часть

Плазма – это ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц с примерно одинаковой плотностью заряда. Плазму можно получить, нагревая обычный газ до такой высокой температуры, что случайная кинетическая энергия молекул превышает энергию ионизации. Столкновения затем отрывают часть электронов от атомов, образуя смесь электронов и ионов. Поскольку процесс ионизации начинается при довольно четко определенной температуре, плазму часто называют «четвертым» состоянием вещества. Плазму также можно получить, подвергая обычный газ энергичным фотонам, таким как ультрафиолетовое излучение или рентгеновские лучи. Стационарная плотность ионизации зависит от баланса между ионизацией и рекомбинацией.

Спектральный анализ – мощный инструмент, используемый в различных областях для понимания и анализа данных с точки зрения их частотного содержания. Этот метод включает в себя разбиение сигнала или набора данных на составляющие его частоты, чтобы получить представление о его основных свойствах. Спектральный анализ имеет

широкий спектр применений, от акустики до астрономии, и может предоставить ценную информацию как исследователям, так и практикам.

Спектрометр – это устройство, которое измеряет непрерывную, недискретную физическую характеристику путем разделения ее на спектр составляющих ее компонентов. Исследование этих данных известно, как спектроскопия. Различные типы спектрометров измеряют разные характеристики. Наиболее распространенный тип спектрометра — оптический спектрометр – измеряет свойства света в определенном диапазоне электромагнитного спектра. Измеряемый спектральный диапазон варьируется от устройства к устройству в зависимости от конструкции спектрометра и его предполагаемого использования, но большинство из них работают в видимой части спектра. Оптические спектрометры широкого диапазона могут также работать в ближней инфракрасной и УФ-областях.

Другие типы спектрометров включают масс-спектрометры и спектрометры ядерного магнитного резонанса (ЯМР), но, если не указано иное, термин «спектрометр» обычно используется для обозначения оптических устройств.

Оптические спектрометры являются наиболее распространенным типом спектральных приборов. Их можно использовать для изучения того, как свет взаимодействует с образцом или излучается им. Это известно, как оптическая спектроскопия (или спектрометрия).

Название «оптический спектрометр» – это широкий термин, поскольку существует множество различных типов оптических спектрометров. Обычно они определяются диапазоном электромагнитного спектра, который они охватывают, но их также можно отличить по оптической конструкции, предполагаемому применению или конкретным функциям, которые они предлагают. Оптические спектрометры имеют широкий спектр применения в физике, химии и биологии. Их можно использовать для измерения пропускания, отражения, рассеяния или поглощения света образцом, а также электролюминесценции или фотолюминесценции. Каждое из этих измерений может дать большое количество информации о рассматриваемом материале или структуре, будь то тонкая пленка на подложке, двумерный материал, химический или электрохимический раствор, живая клетка или другой биологический материал или отдаленный объект, в том числе звезда.

Спектр длин волн излучаемого света определяет пригодность источника искусственного света (например, люминесцентных трубок, галогенных ламп, лазеров и широкополосного белого света или УФ-светодиодов) для данного применения. Для внутреннего освещения обычно требуется широкий диапазон длин волн, а светодиоды для цветных дисплеев должны излучать хроматически «чистый» свет с известной длиной волны. Между тем длина волны лазера определяет, как далеко могут распространяться сигналы, когда он используется для оптоволоконной связи. Определение характеристик источников света — простой процесс при условии, что оптический спектрометр работает в требуемом диапазоне.

Тонкопленочные покрытия часто наносятся на материалы, чтобы изменить взаимодействие света с поверхностью. Эти покрытия обычно имеют форму слоя металла для создания зеркала или слоев прозрачных диэлектрических материалов, которые за счет интерференционных эффектов увеличивают или уменьшают отражательную способность поверхности. Диэлектрические покрытия используются для просветления очков, объективов фотоаппаратов, лазеров и микроскопов. Свет, поглощаемый материалом, может дать представление о его атомной структуре. Например, пики, наблюдаемые в спектре оптического поглощения молекулы, соответствуют энергетическому разделению электронных орбиталей. Это может раскрыть информацию о природе химических связей в материале. Количество света, поглощенного образцом, также может служить количественной мерой концентрации поглощающих молекул внутри образца посредством закона Бера-Ламберта.

Измерения флуоресценции дополняют процесс поглощения (и, как правило, более чувствительны) и могут предоставить информацию о колебательных состояниях молекулы. Их также можно использовать для обнаружения легирующих примесей/загрязнений, идентификации материалов и наблюдения за изменениями в химической среде. Молекулы с высокой флуоресценцией широко используются в биологических исследованиях для «маркировки» определенных клеток или белков, что делает их более видимыми.

Эффективные фотоэлектрические устройства требуют согласования спектра поглощения устройства со спектром излучения источника (обычно солнца). Во-первых, это позволяет напрямую измерять спектр

источника. «Стандартный» спектр солнечных батарей хорошо известен, однако он варьируется в зависимости от местоположения, времени суток, сезона и погоды. Спектрометр позволяет в реальном времени измерить спектр солнечного излучения.

Масс-спектрометры дают спектры, которые показывают интенсивность как функцию отношения массы к заряду. Это делается путем ионизации исследуемого образца, подачи ионам кинетической энергии и направления их через магнитное поле. Ионы затем отклоняются полем. Те, у кого отношение массы к заряду меньше, отклоняются больше, а те, у кого отношение массы к заряду больше, отклоняются меньше. Изменяя магнитное поле в масс-спектрометре, ионы с различным соотношением массы к заряду будут отклоняться в детектор, создавая заряд, пропорциональный количеству ионов. Этот спектр затем можно использовать для определения относительного содержания изотопов атома, для идентификации химических соединений или для определения структуры определенной молекулы.

Спектрометры ядерного магнитного резонанса в основном используются в органической химии и биохимии для получения информации о структуре и составе молекул. При наличии внешнего магнитного поля некоторые ядра действуют как магниты. Если на образец направить радиоволны широкого диапазона частот, ядра будут резонировать на разных частотах. Резонансная частота зависит как от среды, в которой находятся ядра (например, от того, сколько и к каким атомам они расположены), так и от величины приложенного магнитного поля.

Таким образом, целью любого оптического спектрометра является измерение взаимодействия (поглощения, отражения, рассеяния) электромагнитного излучения с образцом или испускания (флуоресценции, фосфоресценции, электролюминесценции) электромагнитного излучения образцом. Оптические спектрометры изучают электромагнитное излучение, попадающее в оптическую область электромагнитного спектра, то есть свет, охватывающий ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра. Чтобы получить максимальную информацию, взаимодействие или излучение света следует измерять как функцию длины волны, и поэтому общей чертой всех оптических спектрометров является механизм выбора длины волны. В недорогих спектрометрах или в ситуациях, когда точный выбор длины волны не важен, оптические фильтры используются для изоляции интересующей области длины волны. Однако для точного выбора длины

волны и генерации спектров необходим дисперсионный элемент, разделяющий свет на составляющие его длины волн. Во всех современных спектрометрах этот дисперсионный элемент представляет собой дифракционную решетку, в которой используется конструктивная и деструктивная интерференция для пространственного разделения полихроматического света, падающего на решетку (рис. 26).

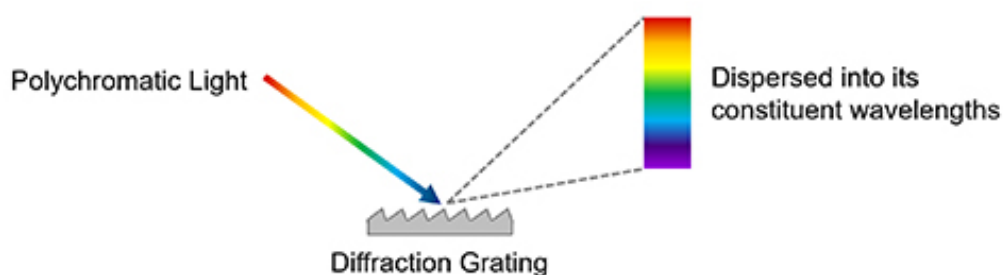


Рис. 26. Дисперсия света на составляющие его длины волн с помощью дифракционной решётки

Дифракционные решетки являются ключевым компонентом монохроматора, который представляет собой устройство, используемое для выбора определенной длины волны света от полихроматического источника света. В монохроматоре дифракционная решетка вращается для изменения длины волны, которая совпадает с выходной щелью и проходит через нее. Монохроматоры возбуждения имеются во всех спектрофотометрах для выбора желаемой длины волны возбуждения для достижения образца от источника белого света, а спектры измеряются путем сканирования монохроматора и измерения изменения сигнала как функции длины волны возбуждения. Для обнаружения света, излучаемого образцом, существует два подхода. Первый представляет собой эмиссионный монохроматор, который работает по тому же принципу, что и выше, за исключением того, что источником света является излучение образца, а монохроматор выбирает, какая длина волны света достигает детектора. Второй подход заключается в обнаружении спектра рассеянного света «всего сразу» с помощью матричного детектора (например, ПЗС-камеры), который называется спектрографом (рис. 27).

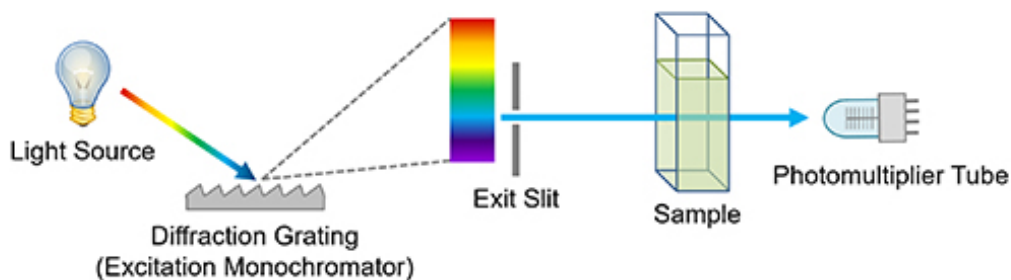


Рис. 27. Упрощенная схема однолучевого спектрофотометра

Порядок выполнения работы:

1) В качестве силового лазера использовать импульсно-периодический лазер CLW-50. Излучение Nd:YAG лазера с рабочей длиной волны 1064 нм, выходящее из лазерного излучателя по волоконно-оптическому кабелю, подается в оптико-механическую систему для формирования пятна нужного диаметра в зоне воздействия.

2) Для определения состава плазменно-эрозионного факела использовать спектрометр ASP-75. Прибор имеет волоконный вход SMA со щелью, размеры которой согласованы с детектором. Это позволяет проводить эксперименты как с помощью оптоволоконна, так и без.

3) Подготовить образцы для проведения экспериментов: алюминий, сталь-3 и сталь-45.

4) Провести воздействие на образцы при разной мощности лазерного излучения: 15, 20 и 25 Вт.

5) Построить графики зависимости спектральных характеристик от мощности лазерного излучения.

6) Определить состав лазерно-плазменного канала в зависимости от мощности излучения и материала воздействия.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.

3. Результаты измерений в виде графиков спектральных характеристик в зависимости от материала образца и мощности лазерного излучения.

4. Описание состава лазерно-плазменного факела в зависимости от мощности излучения и материала воздействия.

5. Описание и анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что означает понятие лазерно-плазменного факела?
2. Какими характеристиками обладает плазменный факел?
3. Опишите способы изучения плазменно-эрозионного факела.
4. При помощи каких устройств можно осуществить анализ плазменных характеристик?
5. Как зависит состав лазерно-плазменного факела от мощности излучения и материала воздействия?
6. Опишите сферы использования плазмы?

Практическая работа № 11

ЗАПИСЬ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Цель работы: Ознакомиться с теорией брэгговских волоконных решеток. С помощью фемтосекундной лазерной системы осуществить запись решетки в кварцевом волноводе с соответствующими параметрами; для полученной решетки определить резонансную длину волны отражаемого излучения.

Теоретическая часть

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой периодическое возмущение показателя преломления по длине волокна, которое формируется в результате воздействия на сердцевину интенсивной оптической интерференционной картины. Формирование постоянных решеток в оптическом волокне было впервые продемонстрировано Хиллом и др. в 1978 году в Канадском исследовательском центре связи (CRC), Оттава, Онтарио, Канада. Они направили интенсивное излучение лазера на ионах аргона в волокно, легированное германием, и заметили, что через несколько минут произошло увеличение интенсивности отраженного света, которое росло до тех пор, пока почти весь свет не отразился от волокна. Спектральные измерения, выполненные

косвенно путем настройки деформации и температуры волоконной решетки, подтвердили, что на всем 1-метровом отрезке волокна сформировался очень узкополосный фильтр на решетке Брэгга. Это достижение, впоследствии получившее название «Решетки Хилла», стало результатом исследования нелинейных свойств кварцевого волокна, легированного германием. Он установил неизвестную фоточувствительность германского волокна, что побудило несколько лет спустя провести другие исследования причины фотоиндуцированной рефракции волокна и ее зависимости от длины волны света, который использовался для формирования решеток. Детальные исследования показали, что прочность решетки увеличивается пропорционально квадрату интенсивности света, что предполагает двухфотонный процесс в качестве механизма. В первоначальных экспериментах лазерное излучение с длиной волны 488 нм отражалось от конца волокна, создавая структуру стоячей волны, которая формировала решетку. Одиночный фотон с половиной этой длины волны, а именно с длиной волны 244 нм в ультрафиолете, оказался гораздо более эффективным. Мельц и др. показали, что это излучение можно использовать для формирования решеток, которые будут отражать любую длину волны, освещая волокно через сторону оболочки двумя пересекающимися лучами УФ-света, теперь период интерференционных максимумов и изменения индекса задавался углом между лучами и длиной волны УФ-излучения, а не видимым излучением, запускаемым в сердцевину волокна. Более того, было обнаружено, что формирование решеток на порядки более эффективно. Поначалу наблюдение фотоиндуцированной рефракции в волокнах было всего лишь научным курьезом, но со временем оно стало основой для технологии, которая теперь играет широкую и важную роль в оптических коммуникациях и сенсорных системах. Исследования основных механизмов фоточувствительности волокна и его использования продолжают во многих университетах и промышленных лабораториях. В научной литературе, а также в материалах тематических конференций, семинаров и симпозиумов появилось несколько сотен статей, посвященных фоточувствительности и волоконным решеткам. ВБР теперь коммерчески доступны, и они нашли ключевые применения в маршрутизации, фильтрации, управлении и усилении оптических сигналов в телекоммуникационных сетях следующего поколения с высокой пропускной способностью.

Фоточувствительность волокна впервые наблюдалась в экспериментальной установке. Непрерывный синий свет (488 нм) от аргонового ионного лазера направляется в короткий кусок одномодового оптического волокна и контролируется интенсивность света, отраженного обратно от волокна. Первоначально интенсивность отраженного света невелика, но через несколько минут ее интенсивность возрастает до тех пор, пока почти весь свет, попадающий в волокно, не отражается обратно. Рост обратного отраженного света был объяснен новым нелинейным эффектом, названным «фоточувствительностью», который позволяет записать индексную решетку в волокне. Когерентный свет, распространяющийся по волокну, интерферирует с небольшим количеством света, отраженного обратно от конца волокна, создавая структуру стоячей волны, которая за счет фоточувствительности записывает индексную решетку в сердцевину волокна. По мере увеличения прочности решетки интенсивность обратного отраженного света увеличивается до тех пор, пока он не достигнет насыщения около 100%. В этих первых экспериментах были получены решетки с постоянным преломлением (решетки Брэгга) с коэффициентом отражения 90% на длине волны записи аргонового лазера. Полоса пропускания решетки Брэгга, измеренная путем растяжения волокна, очень узкая (200 МГц), что указывает на длину решетки 1 м. В то время было признано, что решетки в оптических волноводах будут иметь множество потенциальных применений при изготовлении устройств для использования в оптоволокне. Фактически было показано, что «решетки Хилла» можно использовать в качестве зеркала обратной связи для лазера и в качестве датчика деформации путем растяжения волокна. Хотя фоточувствительность оказалась идеальным средством для изготовления решеток в оптических волокнах, «решетки Хилла», к сожалению, функционировали только на длинах световых волн в видимом диапазоне, близких к длине волны пишущего света. Это ограничение фоточувствительности было преодолено примерно десять лет спустя в эксперименте Мельца и др., которые из работы Лама и Гарсайда признали, что фоточувствительность представляет собой двухфотонный процесс, который можно было бы сделать намного более эффективным, если бы это был однофотонный процесс. В их эксперименте волокно облучалось сбоку двумя пересекающимися пучками когерентного ультрафиолетового света. Длина волны ультрафиолетового света составляет 244 нм, что

соответствует половине длины волны 488 нм – длины волны синей линии аргонового лазера, используемой для создания «решеток Хилла». Два перекрывающихся луча ультрафиолетового света взаимодействуют, создавая периодическую интерференционную картину, которая записывает соответствующую периодическую индексную решетку в сердцевине оптического волокна. Метод, называемый поперечной голографической техникой, возможен, поскольку оболочка волокна прозрачна для ультрафиолетового света, тогда как сердцевина волокна сильно поглощает ультрафиолетовый свет. Период фотоиндуцированной решетки зависит от угла между двумя интерферирующими когерентными лучами ультрафиолетового света. Таким образом, даже несмотря на то, что для изготовления решетки используется ультрафиолетовый свет, решетки Брэгга можно заставить работать на гораздо более длинных волнах в спектральной области, представляющей интерес для устройств, которые применяются в волоконно-оптической связи и оптических датчиках.

Исторически сложилось так, что брэгговские решетки впервые были изготовлены с помощью внутренней записи и голографической техники. Оба эти метода, которые уже были описаны, были в значительной степени заменены методом фазовой маски, который проиллюстрирован на рис. 28.

Коэффициент заполнения фазовой маски выбран равным 50%. Амплитуда фазовой маски выбрана таким образом, чтобы уменьшить свет, передаваемый в пучке нулевого порядка, до уровня менее 5% от общей пропускной способности. Такой выбор обычно приводит к тому, что более 80% пропускной способности приходится на дифрагированные лучи.

Фазовая маска изготавливается из плоской пластины кварцевого стекла, прозрачного для ультрафиолетового света. На одной из плоских поверхностей с помощью фотолитографических методов выгравирована одномерная периодическая структура поверхностного рельефа. Форма периодического рисунка приближается к прямоугольному волнистому профилю. Ультрафиолетовый свет, падающий нормально к фазовой маске, проходит сквозь периодические структуры фазовой маски и дифрагирует.

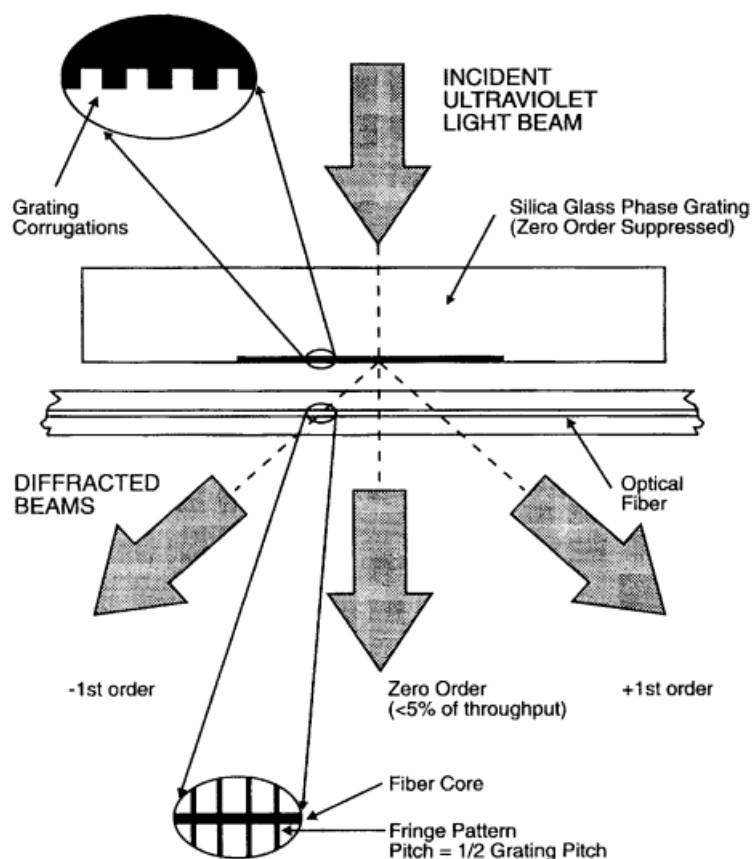


Рис. 28. Устройство для изготовления брэгговских решеток на основе дифракционной фазовой маски нулевого порядка

Преимущество метода фазовой маски заключается в значительном упрощении процесса производства решеток Брэгга, но при этом позволяет получать решетки с высокими характеристиками. По сравнению с голографическим методом метод фазовой маски обеспечивает более легкое выравнивание волокна и более низкие требования к когерентности луча ультрафиолетового лазера, что позволяет использовать более дешевый источник ультрафиолетового эксимерного лазера. Кроме того, существует возможность изготовления сразу нескольких решеток за одну экспозицию путем облучения параллельных волокон через фазовую маску. Возможность производить высокоэффективные решетки при низкой стоимости единицы решетки имеет решающее значение для экономической целесообразности использования решеток в некоторых приложениях. Недостатком метода фазовой маски является то, что для каждой различной длины волны Брэгга требуется отдельная фазовая маска. Однако некоторая настройка длины волны возможна путем приложения к волокну натяжения. Длина волны Брэгга в расслабленном волокне сместится на 2 нм. Метод фазовой маски не

только позволяет получать высокопроизводительные устройства, но и очень гибок, поскольку его можно использовать для изготовления решеток с контролируемыми характеристиками спектрального отклика. Например, типичный спектральный отклик решетки конечной длины с равномерной индексной модуляцией по длине волокна имеет вторичные максимумы по обе стороны от основного пика отражения. В таких приложениях, как мультиплексирование с разделением по длине волны, этот тип отклика нежелателен. Однако если профилю модуляции индекса по длине волокна придать колоколообразную функциональную форму, эти вторичные максимумы можно подавить. Метод фазовой маски также был распространен на изготовление чирпированных или аperiodических волоконных решеток. Чирпинг означает изменение периода решетки по длине решетки с целью расширения ее спектрального отклика. Аperiodические чирпированные решетки желательны для создания компенсаторов дисперсии. Для изготовления решеток с постоянным или регулируемым чирпом используются различные методы. Другим подходом к изготовлению решеток является метод «точка за точкой». В этом методе каждое индексное возмущение решетки записывается поточечно. Для решеток с большим количеством возмущений индекса этот метод весьма неэффективен. Однако он использовался для изготовления микро-Брэгговских решеток в оптических волокнах, но наиболее полезен для изготовления грубых решеток с шагом порядка 100 мкм, для которых требуются преобразователи мод и преобразователи поляризационных мод. В последнее время интерес к решеткам с грубым периодом возрос из-за их использования в полосовых режекторных фильтрах на волоконных решетках с длинным периодом и эквалайзерах усиления волоконных усилителей.

Порядок выполнения работы

- 1) Использовать в ходе проведения эксперимента фемтосекундную лазерную систему ТЕТА-10. После включения системы, произвести измерение мощности лазерного излучения.
- 2) Для записи решеток использовать кварцевые волноводы ($n=1,45$).
- 3) Параметры записи ввести с компьютера при помощи программы управления комплексом. Установить скорость записи $V=10$ мкм/с, длину штриха $L=30$ мкм.

4) После проведения экспериментов при помощи растрового электронного микроскопа получить изображения брэгговских решеток. Измерить ее период.

5) Произвести расчет параметров записи (периода) брэгговских решеток под требуемую длину волны. Исходя из условия Брэгга, учитывающего дифракционный порядок, можно рассчитать резонансную длину волны для полученного нами волновода с записанной брэгговской решеткой.

Подставить известные данные в формулу:

$$\lambda_{FBG} = \frac{2n_{eff}\Lambda}{m} \quad (23)$$

6) Произвести сварку оптических волокон.

Для разделки оптоволоконных кабелей требуется специальный инструмент. Он продается в виде готового набора, куда входят стрипперы, тросокусы, макетный нож, растворитель гидрофоба «D-Gel», безворсовые салфетки и другой обычный инструмент.

При разделке кабелей все делается по инструкции к муфте, где будет находиться место соединения кабелей.

Для снятия внешней оболочки применяется нож-стриппер (рис. 29).



Рис. 29. Нож-стриппер

У ножа вращающиеся лезвия, с помощью которых можно срезать наружный слой. Если кабель самонесущий, то трос удаляется тросокусами.

Внутреннюю оболочку следует снимать специально на нее настроенным ножом-стриппером. С модулей удаляются нитки, плёнка, гидрофоб и другие элементы. Для удаления гидрофоба применяется растворитель D-Gel.

Работать нужно в перчатках, гель плохо удаляется с рук. Затем

модули протираются одноразовыми безворсовыми салфетками с растворителем, потом спиртом. На необходимом расстоянии модули надрезают стриппером и снимают, оставляя волокна голыми.

Кабель необходимо завести в муфту, закрепить, после чего можно приступать к замеру необходимой длины оптоволокну и его зачистке. Затем на волокно надевают термоусадочную трубку, которая в дальнейшем будет защищать место сварки.

Очищенный конец оптоволокну вставляют в скалыватель (рис. 30). Устройство отрезает волокно так, что торец должен находиться под углом 90° к центральной оси. Допустимая погрешность не более 1,5.



Рис. 30. Скалыватель оптических волокон

После завершения подготовительных работ начинается сварка:

1. Спайщик укладывает подготовленное оптоволокну в аппарат для сварки и фиксирует в нем зажимами (рис.31);



Рис. 31. Аппарат для сварки оптических волокон

2. Устройство автоматически начинает сводить волокна до тех пор, пока они не покажутся в секторе обзора камер микроскопов;

3. После этого через электроды пропускается кратковременная электрическая дуга, уничтожающая остатки пыли на оптоволокну;

4. Если состояние волокон нормальное, то прибор с помощью сервомоторов, имеющих возможность перемещать оптоволокну в трех плоскостях, начинает их совмещать;

5. Подводя торцы волокон почти вплотную, прибор на несколько секунд подает мощную электрическую дугу, которая размягчает стекло;

6. Аппарат еще ближе подводит разогретые оптоволокну друг к другу, спаивая их таким образом;

7. Для проверки прочности соединения прибор с заданным усилием пытается развести оптоволокну в разные стороны;

8. Если тест пройден, то спайщик надевает трубку КДЗС на место сварки и перекладывает ее в печку, где происходит термоусадка гильзы.

Когда таймер сообщает, что процесс закончился, оператор достает оптоволокну и укладывает гильзу КДЗС на охлаждающую полку. Процесс сварки закончился, начинается укладка оптоволокну в муфту.

Содержание отчёта

1. Номер, название и цели работы.
2. Схема экспериментальной установки с перечислением её элементов.
3. Расчеты резонансной длины волны излучения, отражаемого разработанной решеткой.
4. Анализ полученных результатов. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Опишите механизм передачи энергии от фемтосекундного лазерного импульса решетке диэлектрического материала.
2. Что такое брэгговская решетка? Опишите ее применение.
3. Режимы фемтосекундной модификации прозрачных материалов.
4. Методы изготовления волоконных решеток.
5. Как происходит запись волоконных брэгговских решеток различных дифракционных порядков?

ЗАДАЧИ

1. Определить мощность и энергию импульсов излучения N_2 -лазера длительностью $\tau=10^{-8}$ с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе $q_0=10^7$ Вт/см², если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы 3,5 см.

2. Привести соотношения между импульсной и средней мощностью излучения, плотностью энергии и плотностью мощности. Привести характерную зависимость порогов разрушения (плотности мощности) от длительности импульса

3. Рассчитать параметры механического прерывателя, представляющего собой вращающийся диск с прорезью (размеры прорези и угловую скорость вращения диска), если из импульсов длительностью 100 мкс необходимо получить импульсы излучения длительностью 50 мкс при частоте следования импульсов 250 Гц.

4. Определить расходимость пучка рубинового лазера, необходимую для получения на поверхности Луны пятна диаметром 2 км, и предложить оптическую схему системы.

5. Оценить плотности мощности лазерного излучения, необходимые для нагревания алюминия, меди, вольфрама, железа до температур плавления и температур кипения излучением лазера с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм при длительностях импульса излучения $\tau=10^{-3}$ с и $\tau=10^{-7}$ с.

6. Оценить скорость испарения материала (скорость роста глубины отверстия) в стали, вольфраме при поглощенной плотности мощности излучения $q = 5 \cdot 10^8$ Вт/см².

7. Оценить параметры многоимпульсного режима обработки для получения в стали отверстий глубиной 1,2 мм и диаметром 80 мкм при скорости испарения $V_{\text{и}} = 1$ км/с. Расчет провести для импульсов излучения длительностью 1 мс, 0,1 мкс, 10 нс.

8. Определить диапазон скоростей сканирования $V_{\text{ск}}$ пучка излучения непрерывного лазера при фокусировке его излучения в пятно диаметром 110 мкм, при которых время эффективного воздействия находится в диапазоне 10^{-3} - 10^{-9} с.

9. Определить диапазон скоростей сканирования пучка непрерывного лазерного излучения при диаметре пятна в фокусе $d = 12$ мкм, если диапазон допустимых длительностей воздействия находится в диапазоне от 10 мс до 10 мкс.

10. Определить максимальную скорость резки V_{\max} медной фольги толщиной $h = 0,1$ мм: а) непрерывным излучением Nd:YAG-лазера мощностью $P_0 = 500$ Вт при радиусе пятна $r_0 = 50$ мкм; б) импульсным излучением Nd:YAG-лазера со средней мощностью $P_{\text{ср}} = 500$ Вт, $\tau = 10^{-7}$ с; частота следования импульсов $f = 10$ кГц, $r_0 = 50$ мкм, угол схождения излучения $\gamma = 3^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерные технологии широко используются в современной промышленности. Благодаря изучению параметров лазерного излучения и технологиям на основе использования данного инструмента стало возможным развитие новых решений в фундаментальных исследованиях и практических применениях в области фотоники и оптоэлектроники. Практические работы издания позволяют изучить основы применения лазерного излучения для дальнейшего исследования более сложных физических процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Лазерные технологии обработки материалов в современных технологических процессах незаменимы. Они не только позволяют автоматизировать процесс обработки, но и расширить набор методов и материалов для обработки, тем самым определяя новейшие направления в современных областях науки и техники.

Без знаний работы с лазерным оборудованием невозможно проводить полноценные исследования, понимать принципы работы оборудования и анализировать результаты проведенных экспериментов.

Авторы будут благодарны за замечания и предложения как по улучшению содержания издания, так и по форме изложения материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ю. М. Климков, В.С. Майоров, М.В. Хорошев. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: учебное пособие.//МИИГАиК, 2014. – 108 с
2. Shugaev M.V., Wu C., Armbruster O. et al. Fundamentals of ultrafast laser– material interaction //MRS Bulletin. – 2016. – V.41. – No.12. – P.960-968.
3. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции //Успехи физических наук. – 2002. – Т.172. – No.3. – С.301-333.
4. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Самохин А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов //Успехи физических наук. – 2017. – Т.187. – No.2. – С.159-172
5. Аракелян С.М. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие / С.М. Аракелян, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.Г. Рау, А.Г. Сергеев; под общ. ред. С.М. Аракеляна. – М.: Логос, 2015. – 744 с.
6. Макаров Г. Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии//Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – No. 7. – С.673-718.
7. Eason R. Pulsed laser deposition of thin films: applications-led growth of functional materials. – John Wiley & Sons, 2007.
8. Штанский Д.В., Кулинич С.А., Левашов Е.А. и др. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок //Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. – No. 6. – С. 1122-1129.
9. Голосов Е.В., Емельянов В.И, Ионин А.А. и др. Модификация поверхности титана импульсным лазерным излучением фемтосекундной длительности//Физика и химия обработки материалов. – 2010. – No. 2. – С.10-14.
10. Кононенко В.В., Пашинин В.П., Комленок М.С. и др. Модификация кварцевого стекла лазерными импульсами фемтосекундной длительности //Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. – No. 3. – С. 254-259.

11. Zhang Y.L., Chen Q.D., Xia H., Sun H.B. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing //Nano Today. – 2010. – V. 5. – No. 5. – P. 435-448.
12. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion, I. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser //Electronics Letters. – 2004. – V. 40. – No. 19. – P. 1170-1172
13. Korte F., Serbin J., Koch J. et al. Towards nanostructuring with femtosecond laser pulses //Applied Physics A. – 2003. – V. 77. – No. 2. – P. 229-235.
14. Завестовская И.Н. Лазерное наноструктурирование поверхности материалов //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – No. 11. – С. 942-954.
15. Vorobyev A. Y., Guo C. Femtosecond laser nanostructuring of metals //Optics express. – 2006. – V. 14. – No. 6. – P. 2164-2169
16. Хорьков К.С., Кочуев Д.А., Черников А.С., Чкалов Р.В., Аракелян С.М., Прокошев В.Г. Обработка материалов в режиме множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения // Известия Российской Академии наук, серия физическая. – 2017. – Т.81. – No 12. – С. 1630-1633
17. Кононенко Т.В. и др. Сравнительное исследование абляции материалов фемтосекундными и пико/наносекундными лазерными импульсами//Квантовая электроника. 1999. т.28, №2. с.167-172
18. Бармина Е.В., Стратакис Э., Фотакис К., Шафеев, Г.А. Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – No. 11. – С. 1012-1020.

Учебное электронное издание

ХОРЬКОВ Кирилл Сергеевич
ЗОЛОТОВ Артем Николаевич
ХАРЬКОВА Алёна Валерьевна

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод DVD-ROM.

Тираж 10 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.