

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Санкт–Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

В.П.Вейко, Е.А.Шахно

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ



Санкт–Петербург
2007

Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. Изд. 3-е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.

Учебное пособие содержит условия задач по лазерным технологиям для самостоятельной работы студентов, а также необходимые теоретические сведения и примеры решения. Рассмотрены вопросы, как общие для различных технологий (характеристики технологических лазеров и лазерного излучения, оптические схемы лазерной обработки, основные физические процессы), так и относящиеся к конкретным лазерным технологиям (резка, сверление отверстий, термоупрочнение, сварка, обработка пленочных элементов). В приложении даны основные теплофизические и оптические свойства некоторых материалов.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники для межвузовского использования в качестве учебного пособия для обучения студентов по специальности 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии» направления подготовки дипломированных специалистов 200000 «Оптехника».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

- © Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2007
- © В.П. Вейко, Е.А.Шахно, 2007.

Оглавление

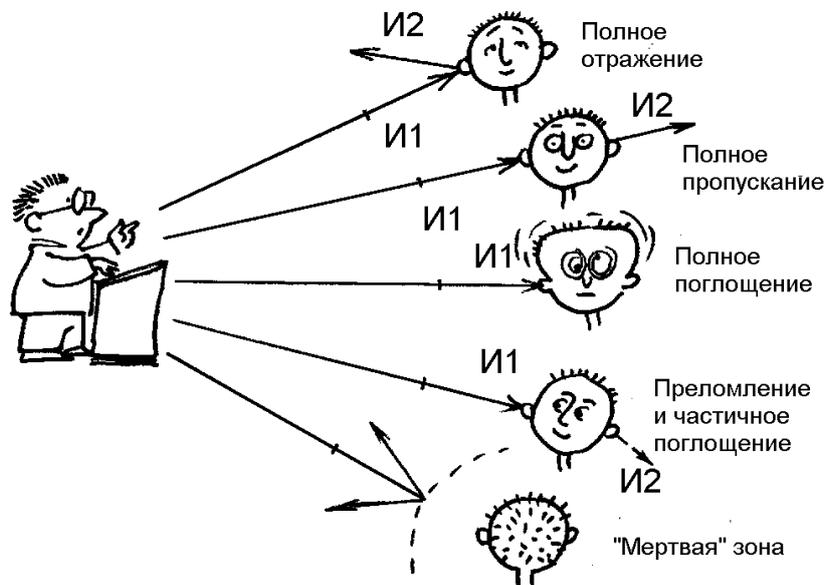
ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ	4
ПРЕДИСЛОВИЕ СОАВТОРА И РЕДАКТОРА ИЗДАНИЯ, ГДЕ ОН ПИШЕТ О ТОМ, ЧТО ПОБУДИЛО ЕГО К НАПИСАНИЮ ЗАДАЧНИКА	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 2. ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	15
РАЗДЕЛ 3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	28
РАЗДЕЛ 4. ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	37
РАЗДЕЛ 5. ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ И СВАРКА	46
РАЗДЕЛ 6. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	54
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	62
ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ [12–16]	63

Предисловие к третьему изданию

Опыт использования первого и второго изданий задачника подтвердил его эффективность. В третьем издании исправлены замеченные ошибки и опечатки. Добавлен ряд новых сведений в разделы 2 «Оптические схемы лазерной обработки», 3 «Основные физические процессы лазерных технологий» и 6 «Лазерная обработка пленочных элементов» и несколько задач в разделы 1–4 и 6. Авторы надеются расширить проблематику задачника и в будущем.

Предисловие соавтора и редактора издания, где он пишет о том, что побудило его к написанию задачника

Однажды, в 1991 г., меня попросили представить доклад на III международную конференцию “Education in optics” (Преподавание в оптике) в Сан-Хосе (США). В результате появился invited paper на тему «Взаимодействие лектора с аудиторией с точки зрения профессора по оптике». Суть предложенной концепции взаимодействия ясна из приведенного ниже рисунка.



Основные типы отклика I_2 студенческой аудитории на поток информации (лекцию) I_1 в линейном приближении — это: 1 — полное отражение ($I_2 = -I_1$), 2 — полное пропускание ($I_2 = I_1$), 3 — полное поглощение ($I_2 = 0$), 4 — преломление и частичное поглощение ($I_2 = k I_1$, $0 < k < 1$), 5 — «мертвая» зона.

Конечно, есть еще нелинейные явления, довольно часто встречающиеся в аудитории студентов, такие как самофокусировка, спонтанное (самопроизвольное) и вынужденное (соседями) рассеяние и др.

Но если ограничиться только линейным приближением и принять гипотезу о равномерном распределении студентов по возможным состояниям 1–5, то мы приходим к выводу, что в силу тех или иных причин только 20% слушателей (студентов) оптимально реагируют на лекцию и что необходимо повышать эффективность процесса обучения.

Известно несколько способов повышения эффективности передачи информации аудитории, но некоторые из них (физическое наказание) противоречат закону, другие неприемлемы по этическим нормам. Наиболее действенным является повышение степени мотивации аудитории, которая (степень) для студенческой аудитории далека от оптимума, и стимулирование активности студентов.

Если угодно, задачник и вообще задачи и предназначены для этих целей, т.к. знания, сообщаемые студентам при чтении курсов «Физико–технические основы лазерных технологий» (ФТОЛТ), «Лазерное оборудование, автоматизация и контроль технологических процессов», «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» и т.д. будут востребованы ими не когда–нибудь, не после окончания вуза, а непосредственно в процессе обучения и будут прямо влиять на их академическую успеваемость и в этом смысле — на их судьбу, а в процессе их решения возникает вполне естественный интерес и даже здоровая конкуренция.

Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д.т.н., профессор В.П. Вейко

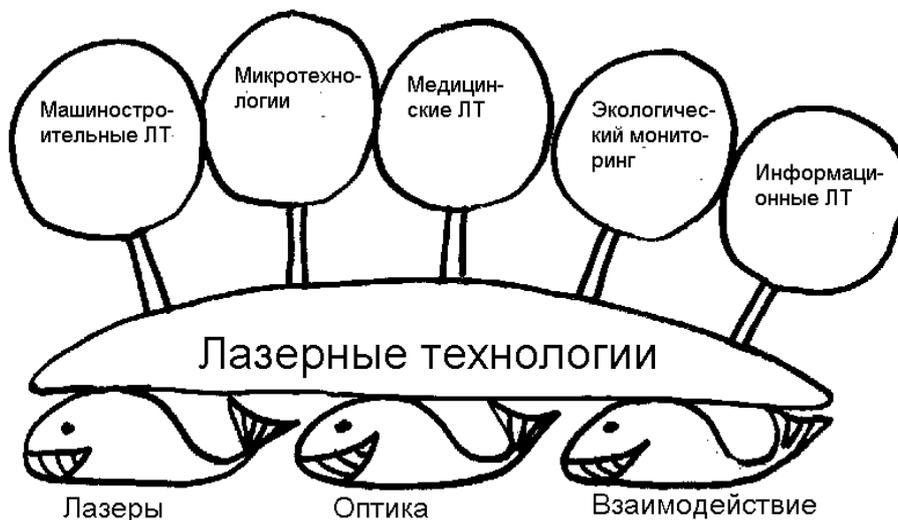
Введение

Составление задачника и обучение через решение задач — это достаточно традиционная технология в таких областях знаний, как математика и физика.

Если же говорить о технологиях обработки материалов вообще и о лазерных технологиях, в частности, то такие прецеденты авторам неизвестны. Связано это, скорее всего, со сложностью и многофакторностью лазерных технологий или тем, что называется «кухней» — рецепт один и тот же, а пирог у каждой хозяйки получается свой, и комплексностью лазерных технологий, когда надо быть специалистом и в лазерной технике, и в оптике, и в физике, и в материаловедении, и т.п.

Так или иначе, авторы столкнулись с большими трудностями уже при формировании структуры задачника. В том виде, в каком она представлена, она отражает подход к лазерным технологиям, который сложился в проблемной лаборатории, а затем и на кафедре лазерных технологий СПбГУ ИТМО с 1976 г. при проведении научной и учебной работы в различных конкретных направлениях лазерных технологий (ЛТ).

Мы считаем, что «материк» лазерных технологий, на котором произрастают различные конкретные процессы, базируется на трех китах, изображенных на рисунке — лазерах, оптике и взаимодействии излучения с веществом



В связи со спецификой СПбГУ ИТМО как приборостроительного политехнического университета, в задачнике нашли меньшее отражение вопросы мощной лазерной техники, оптики и технологии, которые, конечно, имеют свою специфику. Возможно, наши коллеги из других вузов заполнят этот вакуум, воодушевленные нашим примером.

Наконец, нельзя объять необъятное и, в частности, объять все известные лазерные технологии, включая такие экзотические пока, как лазерное разглаживание морщин и полировка роговицы глаза, лазерный термоядерный синтез и т.п.

Поэтому авторы ограничились основами — технологические лазеры и лазерное излучение, оптические схемы и системы для работы с лазерами, воздействие лазерного излучения на вещество — и наиболее общими технологиями, такими как лазерная резка и сверление отверстий, сварка и термообработка, лазерная обработка тонких пленок.

Если этот первый опыт окажется удачным, авторы планируют продолжить работы по составлению задач по лазерному трехмерному синтезу, лазерной термо- и фотохимии, лазерному формированию оптических элементов, лазерному отжигу полупроводников и другим разделам ЛТ.

Настоящее издание основано на восьмилетнем опыте преподавания с использованием указанных (и других) задач курса ФТОЛТ и в соответствии с его программой. Собственно перечислению задач в каждом разделе предшествует краткое изложение основных теоретических сведений, которые не заменяют курс лекций, но должны освежать в памяти некоторые его фрагменты.

Авторы благодарят всех студентов специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», начиная с 1993 г., аккуратно решивших задачи, защитивших и сдавших их преподавателям, а также всех сотрудников кафедры ЛТ, внесших посильный вклад в создание данного задачника.

Авторы вполне отдают себе отчет, что, несмотря на многократные проверки, в текст задачника вполне могли вкрасться различные недочеты, начиная от опечаток и кончая недостатком или избытком отдельных данных, условий и т.п. Авторы будут благодарны за все замечания по существу и по оформлению задачника. Они особенно надеются, что атмосфера творчества и сотворчества, возникшая при составлении задачника, частично присутствует в тексте и будет способствовать предложению преподавателями и студентами новых задач.

Все замечания и предложения можно посылать на имя авторов в Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО или по электронной почте veiko@lastech.ifmo.ru.

Раздел 1. Технологические лазеры и лазерное излучение

Выбор лазера для проведения технологической операции определяется спецификой воздействия лазерного излучения на данный материал и особенностями поставленной технологической задачи. Основными параметрами, характеризующими лазерное излучение, являются мощность, длина волны излучения, длительность воздействия излучения, энергия и частота следования импульсов, а также когерентность, направленность, монохроматичность и поляризация излучения.

Большинство лазерных технологий основано на тепловом действии излучения, то есть предполагается необходимость нагревания объекта воздействия до заданной температуры. Поэтому главной характеристикой лазера, используемого в таких технологиях, является его **мощность**. Для импульсных лазеров рассматривают мощность в импульсе и среднюю мощность, которая зависит от длительности и частоты следования импульсов.

Температура T , до которой нагревается объект воздействия, определяется плотностью поглощенной мощности излучения q , которая зависит от мощности излучения P_0 , ее распределения по облучаемой поверхности и поглощательной способности объекта A . В частности, при равномерном распределении плотности мощности в пределах облученной зоны,

$$q = P_0 A / S, \quad (1.1)$$

где S — площадь облученной зоны на обрабатываемой поверхности.

Нагревание тела излучением описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при сильном поглощении излучения, когда глубина проникновения света в материал $\delta = 1/\alpha$ (α — показатель поглощения света) много меньше толщины прогретого слоя $\sqrt{a\tau}$ (a — температуропроводность материала, τ — длительность импульса), например, для металлов в видимом диапазоне и для стекол в среднем ИК-диапазоне ($\lambda \sim 10$ мкм, $\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ см) имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1.2)$$

где t — время, x, y, z — декартова система координат, связанная с облучаемым телом.

Граничное условие на поверхности задает действие поверхностного источника:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y, t), \quad (1.3)$$

где $q = q_0(1-R)$, q_0 — плотность мощности падающего излучения, R — коэффициент отражения поверхности, k — теплопроводность материала, ось z перпендикулярна поверхности и направлена вглубь материала.

Если размеры нагреваемого тела достаточно велики ($l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a\tau}$), а практически ≥ 1 мм для металлов при $\tau = 10^{-3}$ с, его можно считать полубесконечной средой:

$$T|_{x \pm \infty} = T|_{y \pm \infty} = T|_{z = \infty} = T_H, \quad (1.4)$$

где T_H — начальная температура ($T|_{t=0} = T_H$).

Таким образом, из решения уравнения теплопроводности в каждом конкретном случае можно определить связь температуры облучаемого материала $T(x, y, z, t)$ с плотностью мощности лазерного излучения q_0 , что позволяет ввести понятие **порогового значения плотности мощности излучения** — такого, при котором температура поверхности тела в центре облученной области к моменту окончания воздействия излучения достигает заданного значения.

При расчете пороговых значений плотности мощности излучения удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела при нагреве его лазерным излучением (на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиуса r_0 в момент окончания воздействия), которую получаем при решении системы уравнений (1.2, 1.3, 1.4) для случая постоянной во времени и по площади облученной зоны плотности мощности излучения q :

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_H. \quad (1.5)$$

Выражение (1.5) имеет два непосредственно следующих из него частных случая:

а) при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (импульсное нагревание):

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H; \quad (1.6)$$

б) при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ (стационарный режим нагревания):

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_H. \quad (1.7)$$

Длину волны лазерного излучения выбирают так, чтобы обеспечить максимальное поглощение излучения веществом. Например, для обработки металлов используют излучение видимого и ближнего ИК–диапазона, стекол — среднего ИК–диапазона и т.д.

Длительность воздействия излучения определяет температуру нагреваемого объекта, темп нагревания и охлаждения, величину температурных градиентов и размеры прогретых слоев в материале. При использовании импульсных лазеров длительность воздействия определяется длительностью импульса излучения τ . Длительность воздействия лазеров, работающих в непрерывном режиме, зависит от скорости сканирования $V_{ск}$ лазерного пучка по поверхности материала:

$$\tau = \frac{2r_0}{V_{\text{ск}}}. \quad (1.8)$$

Частота следования импульсов определяет производительность обработки.

Важной характеристикой лазерного излучения является **степень его когерентности**. При обработке поверхности материала когерентным излучением возможно формирование на ней дифракционной картины, а также периодической поверхностной структуры, возникающей при образовании поверхностных электромагнитных волн. Большое значение когерентность излучения имеет в многолучевых лазерных системах, когда при согласовании фаз излучений отдельных лазеров суммарная интенсивность в многолучевой системе значительно превышает сумму интенсивностей излучений каждого лазера в отдельности (многолучевые CO₂-лазеры, полупроводниковые лазерные матрицы и т.п.).

Когерентность излучения связана с направленностью пучка излучения, его монохроматичностью и поляризацией.

Направленность пучка излучения характеризуется углом расходимости пучка и пространственным распределением интенсивности. Распределение интенсивности излучения на выходной апертуре лазера определяется типом используемого резонатора и модовым составом излучения. Для одномодового лазера это распределение описывается распределением Гаусса:

$$I(w) = I_0 \exp(-w^2/w_G^2), \quad (1.9)$$

где I_0 — интенсивность излучения на оси пучка, w — текущий радиус (расстояние до оси пучка), w_G — радиус, при котором интенсивность излучения снижается в e раз.

Теоретическая дифракционная расходимость пучка зависит от длины волны излучения λ и диаметра пучка на выходе лазера $2w_G$. Профиль радиального распределения интенсивности излучения сохраняется по мере удаления от лазера только для гауссовых пучков. Для определения угла расходимости пучков с произвольным распределением интенсивности рассматривают распределение интенсивности в дальней зоне ($x \gg w_0^2/\lambda$, где w_0 — радиус выходного окна лазера).

Теоретическая расходимость излучения многомодовых лазеров определяется углом дифракционной расходимости $\theta = 1.26 \frac{\lambda}{2w_0^{\text{min}}}$, в котором содержится 85% энергии пучка. Здесь w_0^{min} — минимальный радиус области генерации на выходном окне лазера, зависящий от числа поперечных мод. Число поперечных мод определяет число зон на выходной апертуре лазера, в которых они сосредоточены; соответственно характерный размер этих областей уменьшается с увеличением числа поперечных мод, что приводит

к увеличению расходимости излучения. Поперечное распределение интенсивностей продольных мод на выходе резонатора одинаково, они различаются лишь частотами излучения.

При равномерном распределении интенсивности излучения на выходе лазера (при очень большом числе мод) угол расходимости определяется классической дифракцией. На уровне первого дифракционного минимума (86% энергии) этот угол равен $\theta = 2.44 \frac{\lambda}{D}$, где D — диаметр пучка на выходе лазера.

В реальных условиях экспериментальная величина расходимости излучения θ превышает теоретический дифракционный предел.

Расходимость пучка излучения θ определяет возможности его фокусировки. Минимальный размер пятна в фокусе определяется выражением, следующим из геометрической оптики телецентрических пучков (взаимнопараллельные лучи которых пересекаются в одной и той же точке фокальной плоскости, см. рис. 2.1 из раздела 2):

$$d_0 = \theta f, \quad (1.10)$$

где θ — полный угол расходимости пучка, f — фокусное расстояние оптической системы.

Монохроматичность лазерного излучения характеризует свойство лазера излучать в узком диапазоне длин волн. Степень монохроматичности излучения зависит от свойств активной среды и характеристик резонатора: ее необходимо учитывать в технологических процессах, основанных на селективном воздействии (лазерная химия, медицина, биология, разделение изотопов).

В отдельных случаях лазерной обработки необходимо учитывать **поляризацию** излучения, в частности, в технологических процессах, при которых происходит многократное отражение излучения под углами, близкими к углу Брюстера (когда p -составляющая поляризованного излучения полностью отражается от поверхности). Примером такого технологического процесса является резка металлических материалов большой толщины.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Определить мощность и энергию импульсов излучения N_2 -лазера при длительности $\tau = 10^{-8}$ 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 см.

Решение

Мощность импульсов лазерного излучения определяется выражением

$$P_0 = q_0 S,$$

где $S = \pi d_0^2 / 4$ — площадь пятна в фокальной плоскости.

Определим, чему равен диаметр пятна в фокусе, по следующей формуле:

$$d_0 = \theta f = 30 \text{ мкм.}$$

Вычислим мощность импульсов излучения:

$$P_0 = q_0 \pi d_0^2 / 4 = 70 \text{ Вт,}$$

а энергия импульсов излучения равна $W = P\tau = 7 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Ответ: $P_0 = 70 \text{ Вт, } W = 7 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Задача 1.2. Определить, во сколько раз изменится диаметр пучка в фокусе линзы, если перед ней поставить телескопическую систему с увеличением b^x .

Решение

Диаметр пучка в фокусе линзы $d_0 = \theta f$.

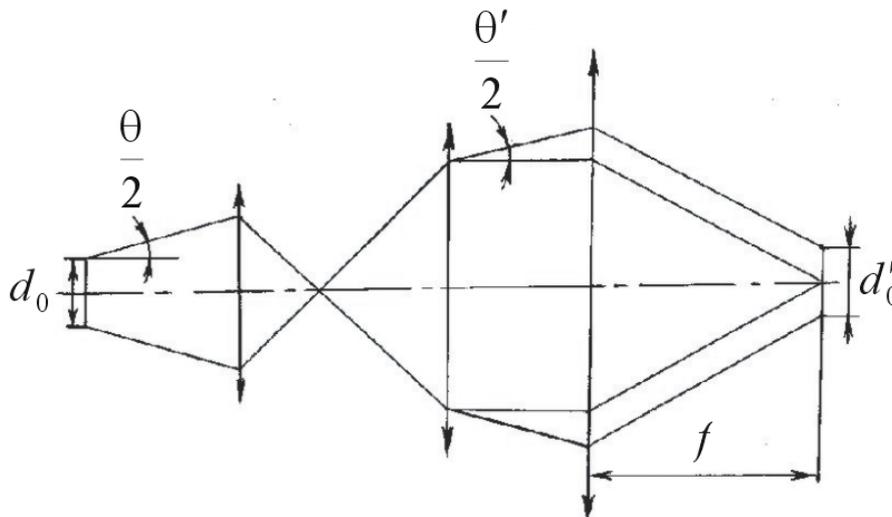


Рис. 1.1. Определение диаметра пучка в фокусе линзы

Если перед линзой поставить телескопическую систему, размер пучка в фокусе линзы определяется как $d'_0 = \theta' f$, где θ' — расходимость лазерного пучка после телескопической системы: $\theta' = \frac{\theta}{b^x}$. В результате получим:

$\theta' = \frac{\theta}{b^x}$. В результате получим:

$$\left. \begin{aligned} d'_0 &= \theta' f = \frac{\theta f}{b^x}; \\ d_0 &= \theta f, \end{aligned} \right\}$$

откуда $\frac{d'_0}{d_0} = \frac{1}{b^x}$.

Ответ: диаметр пучка в фокусе линзы уменьшится в b^x раз.

ЗАДАЧИ

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

2. Определить плотность мощности лазерного излучения на обрабатываемой поверхности в центре облученной области, если известна мощность излучения P и распределение плотности мощности излучения

а) гауссово - $q = q_0 e^{-(r/r_0)^2}$,

б) постоянное в пределах облученной области - $q = \begin{cases} q_0 & \text{при } r \leq r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0. \end{cases}$

3. Определить, какая доля лазерного излучения находится внутри круговой области $r \leq r_0$, где r_0 - характерный размер гауссова распределения плотности мощности излучения в пучке $q = q_0 e^{-(r/r_0)^2}$.

4. Определить радиус области, в которой сосредоточено 50%, 90% всей энергии гауссова пучка, если задан характерный размер гауссова распределения r_0 .

5. 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 40 мкс при частоте следования импульсов 250 Гц.

6. Определить распределение интенсивностей в многолучевой лазерной системе для случайного и постоянного сдвига фаз φ излучения отдельных лазеров, если излучение каждого из них поляризовано в одной и той же плоскости и колебания их электрического поля описываются формулой

$$E_i = E_0 \cos(\omega t + \varphi_i)$$

При решении задачи принять во внимание, что амплитуда суммы двух колебаний с амплитудами E_{01} и E_{02} , фазами φ_1 и φ_2 и одинаковой частотой равна

$$E_{0\Sigma} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

7. Определить полную мощность гауссова пучка, поперечное распределение интенсивности в котором определяется зависимостью от радиуса w :

$$I(w) = I_0 \exp\left(-\frac{w^2}{w_G^2}\right).$$

8. Определить расходимость гауссова пучка, если зависимость радиуса его поперечного сечения от расстояния определяется выражением

$$w_G(x) = w_0 \left[1 + \left(\frac{x\lambda}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

9. Определить теоретическую дифракционную расходимость излучения различных лазеров, считая распределение интенсивности равномерным в пределах заданного диаметра пучка для Cu, YAG:Nd, N₂ и CO₂ лазеров и гауссовым для He–Ne лазера, по следующим данным:

а) YAG:Nd	$\lambda = 1.06$ мкм	$D = 5$ мм;
б) He–Ne	$\lambda = 0.63$ мкм	$D = 0.3$ мм;
в) Cu	$\lambda = 0.5$ мкм	$D = 3$ мм;
г) N ₂	$\lambda = 0.34$ мкм	$D = 0.3$ мм;
д) CO ₂	$\lambda = 10.6$ мкм	$D = 5$ мм;

где λ — длина волны излучения, D — диаметр лазерного пучка на выходе лазера. Решение оформить в виде таблицы.

10. Определить расходимость излучения многомодового лазера в зависимости от числа генерируемых поперечных мод.

11. Вывести формулу для определения разности частот между ближайшими продольными модами резонатора.

12. Доказать, что при угле падения, равном углу Брюстера, угол между отраженным и преломленным лучами равен $\pi/2$.

13. Показать, какой режим, импульсный или непрерывный, более эффективен для лазерной обработки.

14. Рассмотреть различные методы обеспечения импульсного режима воздействия (режимы свободной генерации, модуляции добротности и синхронизации мод) и сравнить их по следующим параметрам: КПД, энергия импульса, длительность импульса, средняя и импульсная мощность, частота следования импульсов.

Раздел 2. Оптические схемы лазерной обработки

В лазерных технологиях инструментом воздействия на обрабатываемый материал является пучок лазерного излучения. Кроме энергетических характеристик пучка, рассмотренных в предыдущем разделе, существенную роль играют его пространственные параметры, такие как размер и форма зоны воздействия. Эти характеристики определяются выбранной оптической или оптико–механической схемой обработки, основное назначение которой состоит в концентрации энергии и в обеспечении заданного поля воздействия и формы облученной зоны внутри него.

В настоящем разделе рассмотрены методы формирования облученной зоны заданных размеров и формы при последовательном обходе лазерным пучком или при ее одновременном облучении методом оптической проекции. Концентрация энергии осуществляется либо путем фокусировки лазерного пучка, либо за счет его оптической проекции в соответствующем масштабе. Основными методами формирования облученной зоны являются:

- 1) методы сканирования поверхности сфокусированным пучком;
- 2) проекционные методы.

1. Методы сканирования поверхности сфокусированным пучком

При использовании этих методов изображение синтезируется в результате последовательного облучения заданного топологического рисунка сфокусированным пучком излучения. Обход контура на обрабатываемой поверхности осуществляется путем относительного перемещения пучка излучения и объекта обработки.

Фокусировка лазерного пучка зависит от поперечного распределения интенсивности в нем. Последнее определяется модовой структурой пучка. Для наиболее часто встречающихся в лазерных технологиях случаев можно ограничиться двумя моделями лазеров: одномодовой, хорошо известной из литературы [1], и телецентрической для многомодовых лазеров.

Последняя модель особенно важна, поэтому кратко опишем ее: считается, что все точки выходного сечения лазера являются источниками одинаковых конических пучков лучей, оси которых параллельны оптической оси лазера, а углы конусов равны полному углу расходимости излучения лазера (рис. 2.1).

Относительное перемещение пучка излучения и обрабатываемого изделия может быть обеспечено разными способами (рис. 2.2).

а). Перемещение детали в плоскости обработки (фокальной плоскости оптической системы). Деталь при этом располагается на координатном столе (рис. 2.2, а), на валу (при производстве гибких печатных форм, рис. 2.2, б) и т.п.

б). Перемещение оптической системы в заданной плоскости — так называемые плоттерные системы или системы с «летающей» оптикой (рис.

2.2, в) — или по заданной траектории в пространстве, когда излучение к оптической системе, управляемой роботом, подается с помощью оптического кабеля (рис. 2.2, г).

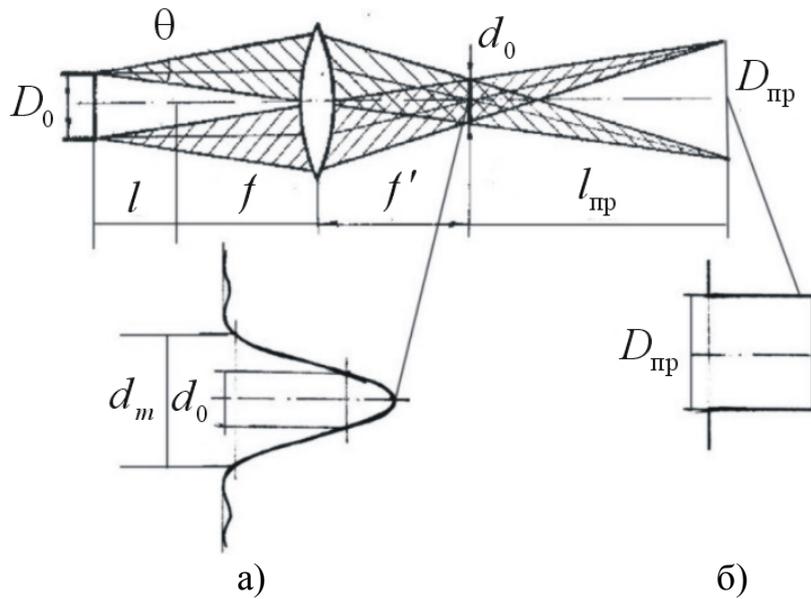


Рис. 2.1. Телецентрическая модель лазера совместно с оптической системой

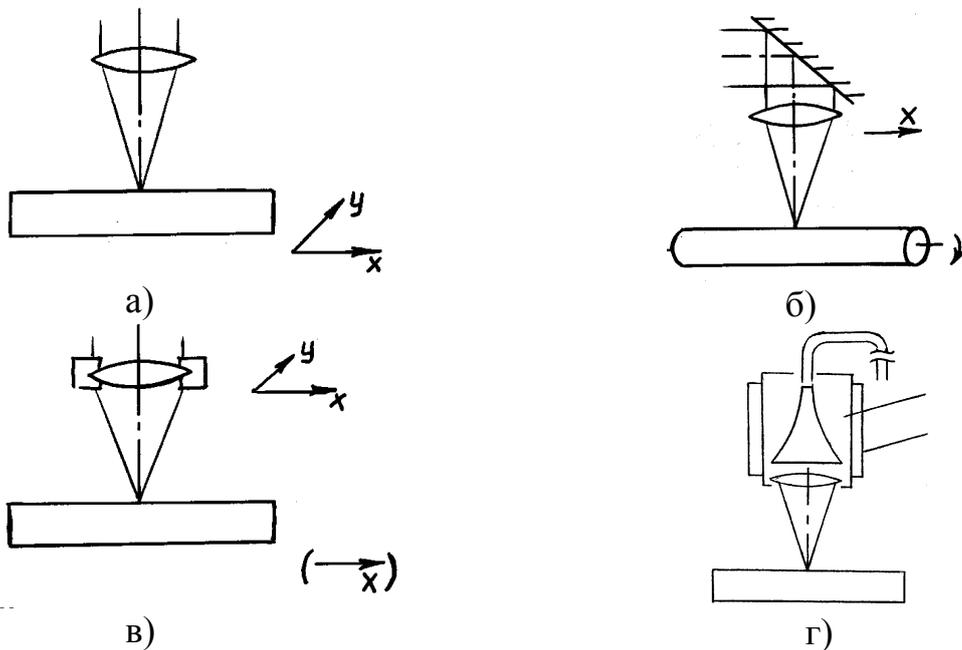


Рис. 2.2. Способы относительного перемещения пучка излучения и обрабатываемого изделия

Особенностью систем (а, б, в, г) на больших скоростях движения является проблема обеспечения постоянной плотности мощности излучения на поверхности детали при изменении скорости движения.

в). Отклонение пучка лазерного излучения, например, с использованием сканера, содержащего два качающихся зеркала с магнитоэлектрическим приводом (рис. 2.3). Как видно из рис. 2.3, размер облученной зоны d зависит от ее расположения относительно центра рабочего поля y . Увеличение размера облученной зоны при отклонении пучка происходит по двум причинам: вследствие дефокусировки пучка и вследствие наклонного падения пучка на обрабатываемую поверхность. Допустимое изменение размера облученной зоны определяет размеры рабочей области.

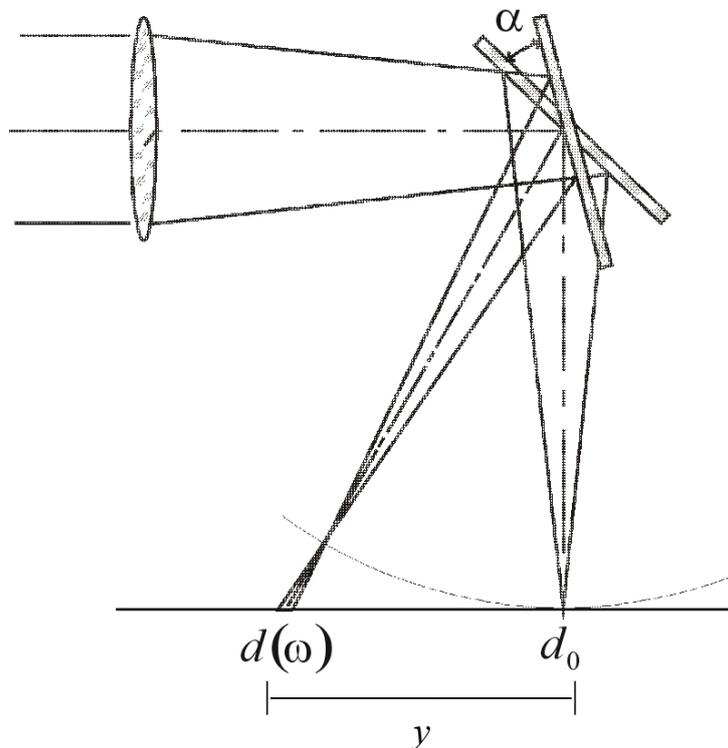


Рис. 2.3. Изменение размера облученной области при сканировании пучка

Основным достоинством методов сканирования сфокусированным пучком является возможность концентрации всей энергии излучения лазера на площадке минимальных размеров и относительная простота формирования сложного топологического рисунка. К недостаткам метода относятся невысокая точность, связанная с неравномерностью распределения энергии в фокальной плоскости и с изменением размеров облученной зоны в процессе сканирования, а также необходимость использования сложных систем управления и перемещения пучка (или объекта).

2. Проекционные методы

Сущность проекционных методов заключается в формировании изображения в целом, его части или образующего элемента путем проецирования пучком лазерного излучения изображения маски на обрабатываемую поверхность с заданным масштабом уменьшения.

Схема микропроеекционного метода представлена на рис. 2.4. Пучок излучения лазера 1 расширяется с помощью осветительной оптической системы 2 до размера маски-трафарета 3, уменьшенное изображение которого строится с помощью проекционного объектива 4 на поверхности обрабатываемого материала 5.

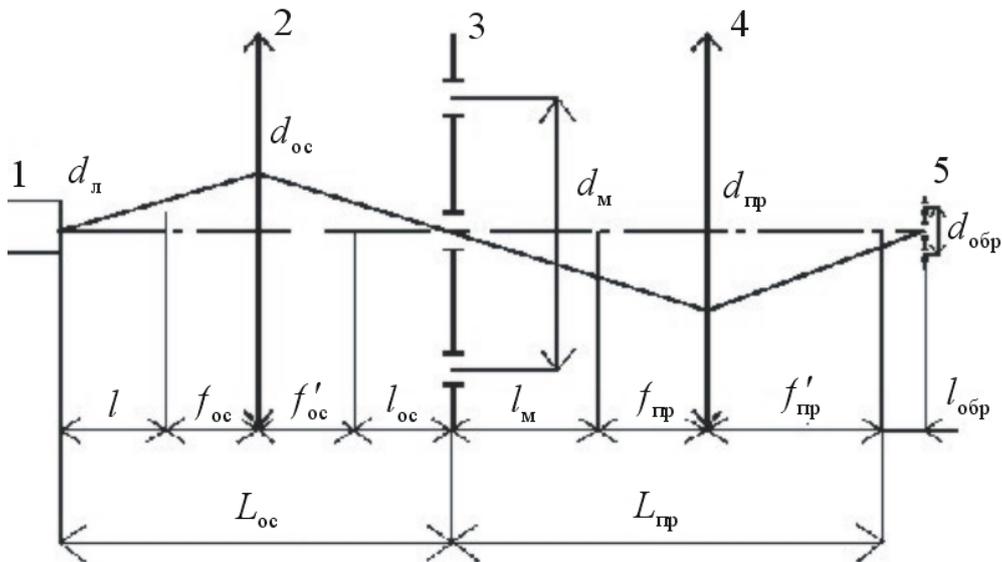


Рис. 2.4. Схема микропроеекционного метода

Методика расчета микропроеекционной схемы следующая. В качестве исходных данных, как правило, задаются: $d_{обр}$ — размер поперечного сечения образца, $d_{обр0}$ — размер минимального элемента изображения на образце, $d_{л}$ — размер поперечного сечения пучка на выходной апертуре лазера, $d_{м0}$ — минимальный размер щели в маске (обычно задается нижняя граница $d_{м0}$). Увеличение проекционной оптической системы $\beta_{пр}$ ($\beta_{пр} < 1$) определяется как

$$\beta_{пр} = d_{обр0}/d_{м0}. \quad (2.1)$$

При этом минимальный масштаб проекции, соответствующий $\beta_{пр}^{max}$, можно определить из условия обеспечения требуемой плотности энергии на образце $Q_{обр}$, при отсутствии разрушения маски:

$$\beta_{пр}^{max} = \sqrt{Q_{м}^{п}/Q_{обр}}, \quad (2.2)$$

где $Q_{м}^{п}$ — пороговая плотность энергии разрушения маски.

Максимальный масштаб проекционной системы ограничен дифракционными явлениями на апертуре проекционной системы и на маске.

Рабочее увеличение проекционной системы $\beta_{\text{пр}}$ должно лежать в интервале $\beta_{\text{пр}}^{\text{min}} < \beta_{\text{пр}} < \beta_{\text{пр}}^{\text{max}}$. Полный размер маски составляет $d_{\text{м}} = d_{\text{обр}}/\beta_{\text{пр}}$.

Увеличение осветительной системы определяется как

$$\beta_{\text{ос}} = d_{\text{м}}/d_{\text{л}}. \quad (2.3)$$

При этом максимальное увеличение осветительной системы определяется условием обеспечения сохранности маски при известной плотности энергии на выходе лазера $Q_{\text{л}}$: $\beta_{\text{ос}}^{\text{min}} = \sqrt{Q_{\text{л}}/Q_{\text{м}}^{\text{п}}}$.

Выбирая объектив и осветительную систему с известными фокусными расстояниями, находим значения $l_{\text{л}}$, $l_{\text{ос}}$, $l_{\text{м}}$, $l_{\text{обр}}$, определяющие габаритные размеры системы, из формул:

$$\beta_{\text{ос}} = \frac{l_{\text{ос}}}{f'_{\text{ос}}} = \frac{f_{\text{ос}}}{l_{\text{л}}}; \quad (2.4)$$

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{обр}}}{f'_{\text{пр}}} = \frac{f_{\text{пр}}}{l_{\text{м}}}. \quad (2.5)$$

В отдельных случаях могут быть использованы упрощенные варианты оптической схемы. Если $d_{\text{м}} < d_{\text{л}}$ и $Q_{\text{л}} < Q_{\text{м}}^{\text{п}}$, осветительная система может отсутствовать. Если не требуется уменьшение размеров маски и $Q_{\text{м}}^{\text{п}} > Q_{\text{обр}}$, может отсутствовать проекционная схема. В последнем случае проекционный метод сводится к контактному.

Особенностью микропроеекционного способа формирования изображения является то, что требования максимального поля обработки и высокой разрешающей способности $\delta = \frac{1}{d_{\text{обр0}}}$ находятся в противоречии: чем

выше разрешающая способность изображения, тем меньше площадь одновременно облучаемой поверхности.

Основными достоинствами проекционных методов обработки материалов являются возможность получения изображения сложной конфигурации и высокая разрешающая способность. Недостатками проекционных методов, ограничивающими их применение, являются потери энергии на маске и жесткие требования к равномерности освещения всего поля маски.

При отсутствии проекционной системы для получения изображения маски она должна быть вплотную прижата к обрабатываемой поверхности, и проекционный метод переходит в контактный. Недостатками контактного метода являются быстрый износ трафарета и механические повреждения образца, а также дифракционные искажения изображения при неплотном прижатии и невысокая разрешающая способность (несколько микрон).

3. Волоконно–оптические системы лазерной обработки

При расчете волоконно–оптических схем лазерной обработки используют инвариант Лагранжа–Гельмгольца (рис. 2.4).

$$D\alpha = D'\alpha' = J = \text{const} \quad (2.6)$$

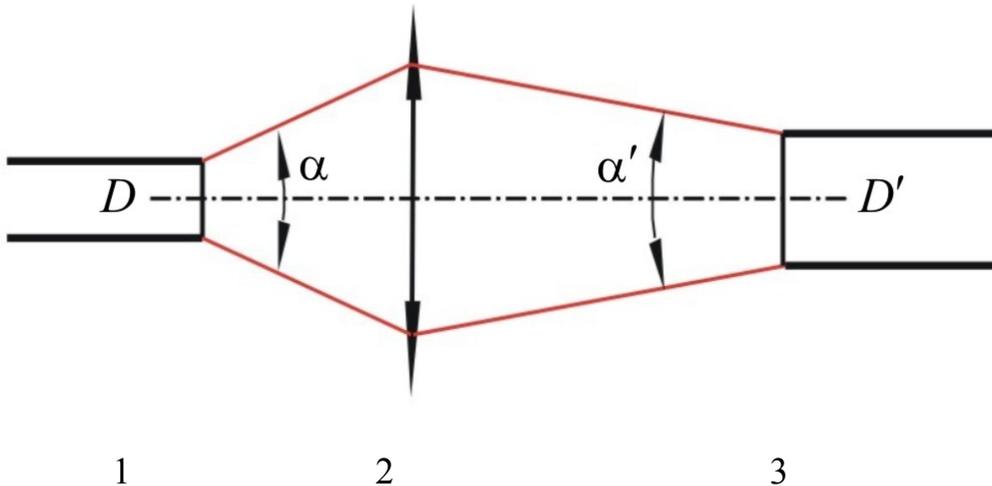


Рис.2.4. Схема оптической системы, состоящей из функциональных (1, 3) и согласующих (2) компонентов.

Чем меньше значение J , тем выше качество пучка.

3. Комбинированные методы

На практике большое распространение получили комбинированные методы формирования изображения, когда элемент изображения строится методом оптической проекции, а поле обработки перекрывается сканированием пучка (например, перемещением стола). К таким методам относятся мультиплицирование изображения и фотонабор, применяемые в фотолитографии, и некоторые другие. В лазерных технологиях наибольшее распространение из таких методов получил сканирующий проекционный или контурно–проекционный [3, 4].

Контурно–проекционный метод состоит в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата.

Схема контурно–проекционного метода аналогична схеме проекционного метода (рис. 2.4), но осветительная система работает с увеличением, меньшим 1.

Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера.

Достоинствами контурно–проекционного метода формирования оптического изображения являются: независимость размеров общего поля изо-

бражения от разрешающей способности; высокая точность рисунка (вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нем энергии); высокая разрешающая способность; небольшие потери энергии на маске.

Заметим, что рассмотренное выше положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной принцип построения осветительных систем — использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы. Преимуществами таких осветительных систем являются значительно меньшие габаритные размеры и более равномерное распределение интенсивности излучения.

Для осуществления трехмерной (рельефной) обработки поверхности могут быть использованы различные модификации метода, например, контурно-проекционный метод с «дрожжащей» маской (колеблющейся вдоль оптической оси системы по заданному закону в процессе перемещения облученной области по обрабатываемой поверхности), а также применение в микропроекционной схеме полутонных масок с переменным пропусканием.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Построить ход лучей лазерного пучка через линзу с фокусным расстоянием f . Определить зависимость диаметра пятна в фокусе d_0 от расходимости лазерного излучения θ и фокусного расстояния линзы f .

Решение

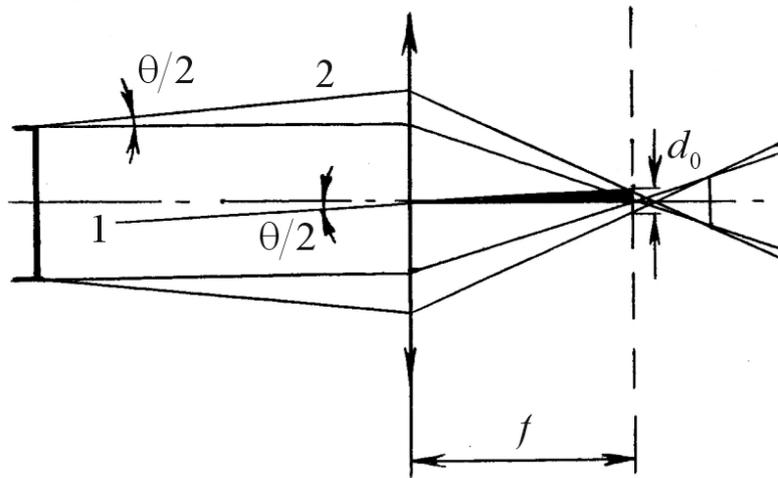


Рис. 2.5. Определение размера пятна в фокусе

Проведем вспомогательный луч 1, проходящий через центр линзы под углом $\theta/2$ к оптической оси. Как известно из геометрической оптики, луч, проходящий через центр оптической системы, не испытывает преломления. Далее известно, что луч 2, преломившись линзой, пересечется с лучом 1 в фокальной плоскости. Диаметр пятна в фокальной плоскости определим из заштрихованного треугольника:

$$\frac{d_0}{2} = f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}.$$

Учитывая, что для малых углов ($\frac{\theta}{2} \ll 1$) справедливо $\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$, получим окончательно

$$d_0 = \theta f.$$

Задача 2.2. Рассчитать оптическую проекционную схему с телецентрическим освещением маски, с параметрами $d_{\text{обр}} = 1 \text{ мм}$, $d_{\text{пр}} = 50 \text{ мм}$, $d_{\text{обр}0} = 10 \text{ мкм}$, $f_{\text{пр}} = 50 \text{ мм}$, $d_{\text{л}} = 1 \text{ см}$, $\beta_{\text{пр}} = 1/20$. Увеличение телескопа произвольно, материал маски — медная фольга толщиной 0.1 мм, материал образца — пленка хрома толщиной 0.1 мкм на стекле.

Решение

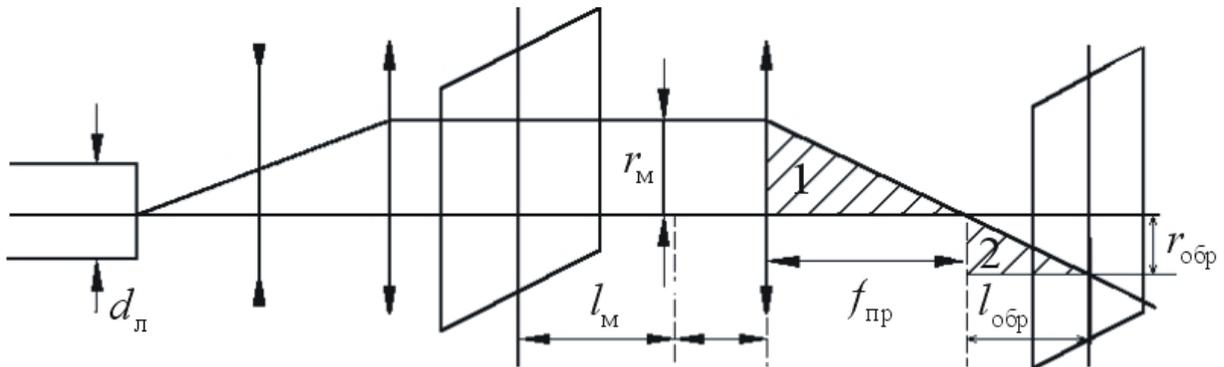


Рис. 2.6. Схема телескопической проекционной системы

Габаритный расчет.

Из условия $\beta_{пр} = \frac{d_{обр}}{d_m}$ найдем размер щели в маске: $d_m = 20$ мм. Увеличе-

ние телескопической системы равно $\beta_{ТС} = \frac{d_m}{d_l} = 2$. Величины $l_{обр}$ и l_m най-

дем из геометрических соображений: из подобия треугольников 1 и 2 по-

лучаем выражение для нахождения $l_{обр}$ $\frac{r_m}{r_{обр}} = \frac{f_{пр}}{l_{обр}}$, откуда

$$l_{обр} = \frac{r_{обр} f_{пр}}{r_m} = f_{пр} \beta_{пр} = 2.5 \text{ мм.}$$

Аналогично получаем выражение для l_m :

$$l_m = \frac{r_m f_{пр}}{r_{обр}} = \frac{f_{пр}}{\beta_{пр}} = 1 \text{ м.}$$

Энергетический расчет.

Обработка проекционным способом осуществляется при следующих условиях: температура на поверхности маски не должна превышать температуру плавления, так как нельзя допускать разрушения маски, а температура на поверхности образца должна быть больше температуры испарения. Таким образом, используя для определения температуры на поверхности выражение (6.2), получаем:

– для маски $T_{пл}(Cu) - T_H > \frac{q_m A_m t}{\rho_m c_m h_m}$;

– для образца $T_{кип}(Cr) - T_H < \frac{q_0 A_0 t}{\rho_0 c_0 h_0}$,

где ρ — плотность, c — теплоемкость, h — толщина слоя материала, A — поглощательная способность материала, q — плотность мощности излучения материала на поверхности детали, T_n — начальная температура; индекс «м» относится к маске, «0» — к образцу.

Учитывая, что $Q = qt$, где Q — плотность энергии, а q — плотность мощности, определим величину максимального увеличения проекционной системы из следующего выражения:

$$\beta_{\text{пр}}^{\text{max}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{мmax}}}{Q_{\text{обрmin}}}} = \sqrt{\frac{(T_{\text{пл}}(Cu) - T_n)\rho_{\text{м}}c_{\text{м}}h_{\text{м}}A_0}{(T_{\text{исп}}(Cr) - T_n)\rho_0c_0h_0A_{\text{м}}}}$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$\beta_{\text{пр}}^{\text{max}} = 44.$$

ЗАДАЧИ

1. Рассчитать длину l_0 и диаметр d_0 световой трубки, образующейся при фокусировке пучка лазерного излучения диаметром D_0 и расходимостью θ линзой с фокусным расстоянием f .

2. Показать графически, зависит ли размер фокального пятна от расстояния между лазером и фокусирующей оптической системой и от угла расходимости лазерного излучения θ .

3. Вывести формулу для геометрической глубины резкости при фокусировке лазерного излучения.

4. Определить расходимость пучка рубинового лазера, необходимую для получения на поверхности Луны пятна диаметром 3 км, и предложить оптическую схему системы.

5. Определить расходимость излучения лазера, обеспечивающую пятно диаметром 0.5 мм на поверхности Фобоса, если лазер удален от его поверхности на расстояние 100 м. Предложить оптическую схему.

6. Рассчитать пространственно-геометрические характеристики лазерных пучков (одномодового, многомодового, дифракционно-ограниченного и теоретические): угол расходимости, размер фокального пятна и глубину резкости.

7. Рассчитать оптическую систему энергетического фокусирующего канала для лазера на аргоне: $\lambda = 514$ нм, диаметр пучка на выходе лазера 1.5 мм на уровне $1/e$, расходимость пучка 0.5 мрад, если излучение должно быть сфокусировано в вакуумированной кювете длиной 30 мм в пятно диаметром 1.2 мкм.

8. Изобразить принципиальные схемы лазерных установок с плоттером и координатным столом. Указать условия постоянства плотности мощности излучения в системе с плоттером.

9. Построить рабочее поле в сканирующей системе по значениям допустимых отклонений $\Delta d = 200$ мкм размера фокального пятна $d = 50$ мкм в плоскости обработки для YAG:Nd-лазера. Фокусное расстояние оптической системы 60 см, расстояние от центра зеркала до обрабатываемой поверхности – 50 см.

10. Привести габаритный и энергетический расчет проекционной схемы с осветительной телескопической системой.

11. Определить теоретический предел максимального масштаба проекции при телецентрическом освещении маски.

12. Пояснить на примере противоречие между разрешающей способностью и полем изображения.

13. Дать размерные и энергетические характеристики микропроекционной оптической схемы. Сравнить с условиями обработки в схеме без осветительной системы, без проекционной системы.

14. Проанализировать возможность минимизации размеров контурно-проекционной схемы (за счет передвижения лазера), для чего построить ход лучей в оптической системе с лазером, расположенным в передней фокальной плоскости осветительной системы, до и после нее.

15. Рассчитать оптическую схему контактного способа обработки и сравнить с проекционным способом при увеличении $\beta_{пр} = 1$. Образец — пленка хрома на стеклянной подложке.

16. Провести сравнительный анализ достоинств и недостатков сканирующих и проекционных методов лазерной обработки. Результаты анализа свести в таблицу:

Метод формирования оптического изображения		Количество баллов				Сумма баллов
		Предельное разрешение	Точность воспроизведения рисунка	Эффективность использования энергии	Производительность	
Сканирующие	с координатным столом					
	с плоттером					

	с роботом и оптическим кабелем со сканером						
Проекционные	микроекционный						
	контактный						
Комбинированные	контурно-проекционный						

17. Провести габаритный расчет оптической системы для фокусировки излучения от оптического многомодового волокна с внутренним диаметром 400 мкм в пятно диаметром 200 мкм. Угол расходимости излучения 0.1 рад, расстояние от торца волокна до плоскости обработки 10 см.

18. Провести габаритный расчет оптической системы для фокусировки излучения ($\lambda=1.06\text{мкм}$) от оптического волокна со значением инварианта Лагранжа-Гельмгольца $d\Omega=0.21$ в пятно размером $d_0 = 100\text{мкм}$.

19. Определить, какое смещение маски вдоль оптической оси необходимо обеспечить в проекционной схеме с «дрожащей» маской для получения на образце рельефа высотой $\Delta_0=1\text{мкм}$.

20. В проекционной схеме с использованием полутонной маски (с переменным пропусканием) определить зависимость профиля обрабатываемой поверхности от пропускания маски, приняв скорость испарения

равной $V = \frac{q}{L_{\text{исп}}}$ (q - плотность мощности излучения, $L_{\text{исп}}$ - удельная тепло-

та испарения материала, Дж/см³). Рассчитать маску для заданной точности формирования профиля поверхности $\Delta=0.1\text{мкм}$ при длительности им-

пульса излучения $\tau=10^{-9}$ с, максимальном значении плотности мощности излучения на поверхности образца $q_{\max} = 10^{10}$ Вт/см². Определить количество импульсов, необходимое для получения профиля высотой 10 мкм.

Раздел 3. Основные физические процессы лазерных технологий

Основными физическими процессами лазерных технологий являются:

1. Испарение (и абляция в расплавленной фазе) — наиболее популярный процесс, который лежит в основе большинства промышленных технологий любых материалов в микроэлектронике, микромеханике и микрооптике; в настоящее время актуальными остаются проблемы точности и качества.

2. Нагревание до температуры размягчения (или плавления) с последующим деформированием в вязко–текучей фазе (дополненное тем или иным механическим воздействием — вытяжкой, вращением и т.п.) применяется для изготовления ближнепольных оптических зондов, медицинского оптического инструментария и т.п.

3. Направленное локальное нагревание, вызывающее появление контролируемого поля напряжений, приводящего к управляемому деформированию листовых материалов (*laser forming*), причем не только с целью формообразования, но и прецизионной сборки и юстировки микромеханических компонентов.

4. Локальное нагревание, вызывающее появление избыточного давления газа (пара) на поверхности раздела двух сред (например, пленка–подложка) с целью создания направленных микродеформаций и перемещений.

5. Послойный синтез трехмерных объектов методом послойного наращивания, в том числе стереолитография, селективное лазерное спекание и послойная сборка из листовых материалов (*laminated object manufacturing*).

6. Комбинированные лазерные процессы совместного действия с другим излучением или с плазмой для инициирования поглощения и т.п.

7. Манипулирование микрочастицами (молекулярная сборка), основанное на захвате частиц в фокусе лазерного излучения давлением света и последующем построении микроструктур.

Лазерные технологии могут быть основаны не только на высокой плотности мощности, но также и на большой плотности фотонов, что важно для нелинейных процессов (нелинейное поглощение в слабопоглощающих средах), в селективных технологиях (химические, биомедицинские технологии). Могут найти применение сильные и сверхсильные электромагнитные поля в области фокуса пучка. В последнее время появились технологии (манипулирование микрочастицами, атомно–молекулярная сборка — *laser trapping*), где используется давление света (при нормальном падении параллельного пучка на поверхность давление света определяется выражением $p_{\text{на}} = \varepsilon(1 + R)$, где ε — объемная плотность энергии излучения, R — коэффициент отражения поверхности).

Тем не менее, большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения. Остановимся на нем подробнее.

При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит вглубь материала, поглощаясь в нем.

Распространение излучения в веществе, как правило, описываются законом Бугера:

$$q(x) = q_0(1 - R) \exp(-\alpha x),$$

где $q(x)$ — плотность мощности излучения в веществе на расстоянии x от его поверхности, q_0 — плотность мощности падающего излучения, R — коэффициент отражения поверхности, α — показатель ослабления света в веществе.

При поглощении излучения вещество нагревается. Различают режимы нагревания материала, соответствующие сильному (поверхностному) и слабому (объемному) поглощению излучения. Для большинства технологических процессов используется лазерное излучение длин волн, находящиеся в спектральной области сильного поглощения вещества, так как это обеспечивает локальность воздействия и большую эффективность использования энергии. Сильное поглощение света имеет место в металлах, в полупроводниках при их «металлизации» достаточно мощным излучением, а также в полупроводниках и диэлектриках, когда длина волны излучения лежит в области их фундаментального поглощения. При этом глубина проникновения излучения обычно много меньше характерного размера теплопроводности ($\frac{1}{\alpha} \ll \sqrt{a\tau}$, где τ — время воздействия излучения, a — температуропроводность материала). Тепловой источник в материале в таких условиях является практически поверхностным. Математически при решении уравнения теплопроводности (1.2) это учитывается в граничном условии на поверхности (1.3). Толщина прогретого слоя в материале определяется характерным размером теплопроводности $\sqrt{a\tau}$.

Режимы облучения, обеспечивающие объемное поглощение излучения, $\frac{1}{\alpha} > \sqrt{a\tau}$, используют при необходимости создания в обрабатываемом материале объемного теплового источника или при фокусировке излучения (и локальной обработке) внутри объема.

Для решения уравнений теплопроводности существуют различные математические методы, среди которых наиболее употребительны методы интегральных преобразований (в том числе преобразование Лапласа), метод Фурье (разделения переменных) и метод источников. Заметим, что при нагревании материала его оптические и теплофизические свойства изменяются, в особенности коэффициент отражения R . Кроме того, большое влияние на процесс нагревания оказывает временная и пространственная

структура излучения. Эти факторы иногда необходимо учитывать для точного определения временного хода температуры нагреваемого излучением тела и пространственного распределения температуры.

При нагревании тела лазерным излучением в нем активируются различные процессы. К их числу относятся эмиссионные процессы (эмиссия электронов, ионов, нейтральных молекул), поверхностные и объемные химические реакции, структурные превращения, тепловое расширение и термомеханические процессы, плавление, испарение и т.п. Эти изменения могут быть положены в основу того или иного технологического процесса — например, испарение и плавление при резке и сверлении отверстий, плавление при сварке, структурные превращения при термоупрочнении материалов и т.д.

При определении основных параметров процесса на практике в большинстве случаев не требуется точного решения тепловой задачи, а достаточно оценить пороговую плотность мощности излучения q_n (или пороговую мощность P_n , пороговую энергию W_n). Пороговая плотность мощности излучения — это такое ее значение, при котором в облучаемом материале начинают происходить заданные изменения. Теоретически величина q_n определяется как такое значение плотности мощности падающего излучения q_0 , при котором максимальная температура обрабатываемого материала достигает значения T_* , соответствующего началу данного процесса (например, для испарения материала это температура его кипения). Пороговые характеристики могут быть определены из выражения, определяющего температуру на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия. Для облучения в режиме сильного поглощения эти выражения представлены в разделе 1 (формулы (1.5–1.7)).

Для облучения в режиме объемного поглощения

$$T = \frac{q_0(1-R)\tau}{\rho c \delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) - \frac{r_0^2}{4a\tau} \text{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) \right\} + T_n, \quad (3.1)$$

где δ — глубина проникновения света в вещество (при поглощении по Бугеру $\delta = 1/\alpha$), $\text{Ei}(u)$ — интегральная показательная функция, T_n — начальная температура.

Выражение (3.1) имеет два частных случая :

а) при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$:

$$T = \frac{q_0(1-R)\tau}{\rho c \delta} + T_n; \quad (3.2)$$

б) при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$:

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0^2}{4k\delta} \ln\left(19.4 \frac{a\tau}{r_0^2}\right) + T_n, \quad (3.3)$$

где k — теплопроводность материала.

В ряде технологических процессов лазерной обработки используется сканирование обрабатываемой поверхности лазерным пучком. Результаты теплового воздействия при этом зависят от скорости сканирования $V_{ск}$.

При быстродвижущемся источнике $\left(\frac{V_{ск}r_0}{a} \gg 1\right)$ максимальная температура на обрабатываемой поверхности сильно поглощающего материала:

$$T \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_0(1-R)}{k} \sqrt{\frac{2ar_0}{V_{ск}}} + T_n. \quad (3.4)$$

При медленно движущемся источнике $\left(\frac{V_{ск}r_0}{a} \ll 1\right)$

$$T \approx \frac{q_0(1-R)r_0}{k} \left(1 - \frac{V_{ск}r_0}{4a}\right) + T_n. \quad (3.5)$$

Другим важным параметром лазерной обработки является скорость активируемого в облучаемом материале процесса. Для большинства термически активируемых процессов, таких как испарение, различные термохимические реакции, скорость процесса V экспоненциально зависит от температуры T , что в наиболее общем виде характеризуется формулой Френкеля:

$$V(T) = c_0 \exp\left(-\frac{L^M \mu}{R_\Gamma T}\right), \quad (3.6)$$

где L^M — энергия активации соответствующего процесса в расчете на единицу массы (теплота испарения и т.п.), c_0 — скорость звука в твердом теле, R_Γ — универсальная газовая постоянная, μ — молярная (атомная) масса обрабатываемого материала.

В частности, фронт испарения — граница раздела парообразной и конденсированной (расплава) среды — продвигается вглубь материала с некоторой скоростью $V(T)$, являющейся функцией температуры поверхности T .

При испарении вещества возникает механический импульс отдачи, связанный с реактивным действием вылетающих паров. Давление отдачи можно оценить как половину величины давления насыщенных паров P_T , которое состоит из равных значений давления отдачи $P_{отд}$ и давления бомбардировки $P_{бомб}$ пара над поверхностью материала:

$$P_T = P_{отд} + P_{бомб}. \quad (3.7)$$

Считая, что при лазерном испарении $P_{бомб} = 0$, получим $P = 0.5P_{отд}$

Давление насыщенных паров при температуре T , равной температуре поверхности испарения, определяется из уравнения Клаузиуса–Клапейрона:

$$P_T = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{L_u^M}{R_T T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right], \quad (3.8)$$

где L_u^M — скрытая теплота испарения единицы массы материала, P_0 — давление насыщенных паров при температуре T_0 (например, $P_0 = 10^5$ Па при $T = T_k$ — температуре кипения при нормальном давлении).

Определение температуры материала, облучаемого лазерным излучением, и основанный на нем расчет скорости испарения дают возможность получить интегральные характеристики процесса обработки и определить необходимые параметры режима обработки.

В некоторых случаях тепловая модель воздействия излучения оказывается недостаточной для корректного рассмотрения процессов лазерных технологий. Например, при сверлении глубоких отверстий нельзя не учитывать поглощения излучения в парах в образующемся канале и т.п. В настоящем пособии эти вопросы не рассматриваются.

Существуют лазерные технологии, основанные на быстром тепловом расширении вещества при нагреве лазерным излучением. Технология сухой лазерной очистки поверхности твердого тела от загрязняющих частиц основана на быстром нагреве и тепловом расширении поглощающих излучение частиц и/или приповерхностного слоя основного материала импульсом лазерного излучения. После окончания импульса под действием инерционных сил происходит отрыв частиц от поверхности и их удаление.

Примеры решения задач

Задача 3.1. Оценить плотность мощности лазерного излучения, необходимую для нагревания алюминия, меди, вольфрама, железа до температуры плавления и температуры кипения излучением лазера с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм при длительности импульса излучения $\tau = 10^{-3}$ с, $\tau = 10^{-7}$ с.

Решение

При импульсном воздействии лазерного излучения на металлы температура поверхности определяется следующим выражением:

$$T = T_n + \frac{2q_0 A \sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}},$$

где $A = 1 - R$ — поглощательная способность материала; R — коэффициент отражения материала.

Отсюда получаем выражение для плотности мощности:

$$q_0 = \frac{(T - T_n) k \sqrt{\pi}}{2(1 - R) \sqrt{a\tau}}.$$

Результаты вычислений сведены в таблицу (плотность мощности излучения в таблице выражена в Вт/см²):

Длительность импульса	Al		Cu		W		Fe	
	$q_{0\text{пл}}$	$q_{0\text{кип}}$	$q_{0\text{пл}}$	$q_{0\text{кип}}$	$q_{0\text{пл}}$	$q_{0\text{кип}}$	$q_{0\text{пл}}$	$q_{0\text{кип}}$
$\tau_1 = 10^{-3}$ с	$6,2 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$
$\tau_2 = 10^{-7}$ с	$6,2 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$

Задача 3.2. Определить диапазон скоростей сканирования $V_{\text{ск}}$ пучка излучения непрерывного лазера при фокусировке его излучения в пятно диаметром 100 мкм, при которых время эффективного воздействия находится в диапазоне $10^{-3} - 10^{-9}$ с.

Решение

Скорость сканирования излучения непрерывного лазера определяется выражением

$$V_{\text{ск}} = \frac{d}{\tau}.$$

Тогда диапазон скоростей при данных временах эффективного воздействия будет следующим:

$$V_{\text{ск1}} < V < V_{\text{ск2}},$$

где $V_{\text{ск1}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 0,1 \text{ м/с}$; $V_{\text{ск2}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10^{-9}} = 10^5 \text{ м/с}$, или

$$0,1 \text{ м/с} < V_{\text{ск}} < 10^5 \text{ м/с}.$$

ЗАДАЧИ

1. Оценить толщину прогретого слоя материалов — стали, хрома, пластмассы и керамики — при воздействии на них излучения лазеров:

а) YAG : Nd, длительность импульса $\tau = 10^{-7}$ с,

б) YAG : Nd, $\tau = 10^{-8}$ с,

в) YAG : Nd, непрерывный режим, скорость сканирования 40 см/с, диаметр облученной области $d = 10$ мкм.

2. Оценить значение плотности мощности лазерного излучения q_0 , необходимой для нагревания поверхности алюминия, меди, вольфрама, железа до температуры плавления и температуры кипения непрерывным излу-

чением с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм, если размер области облучения $r_0 = 15$ мкм.

Объяснить зависимость q_0 от свойств материалов. Привести зависимость плотности мощности излучения, необходимой для нагревания поверхности до определенной температуры, от длительности импульса.

3. Оценить плотность мощности лазерного излучения q_0 , необходимую для нагревания поверхности керамики, стекла, пластмассы

а) до температуры размягчения излучением лазера с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм и длительностью импульса $\tau = 10^{-3}$ с и $\tau = 10^{-7}$ с;

б) до температуры разрушения непрерывным излучением YAG:Nd лазера при размере области облучения $r_0 = 100$ мкм.

4. Оценить плотность мощности лазерного излучения q_0 , необходимую для окисления поверхности хрома, никеля, висмута, ванадия, меди:

а) импульсным лазерным излучением на длине волны 1.06 мкм;

б) непрерывным излучением YAG:Nd-лазера;

в) непрерывным и импульсным ($\tau = 1$ мкс) излучением CO₂ лазера при размере области облучения $r_0 = 500$ мкм.

Сделать выводы о термохимической чувствительности этих металлов на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм при длительности импульса 1 мкс.

5. Оценить плотность мощности лазерного излучения q_0 и импульсную мощность P лазера на молекулярном азоте (длительность импульса $\tau = 10^{-8}$ с), необходимую для поверхностного окисления, плавления и испарения меди при радиусе облученной области $r_0 = 5$ мкм и 50 мкм.

6. Найти плотность мощности непрерывного излучения Ar и YAG:Nd лазеров, необходимую для термокоагуляции мягкой ткани (температура коагуляции $T = 42$ °C) при времени воздействия излучения 1 с, а также необходимую мощность и скорость сканирования пучка при радиусе облученной области $r_0 = 1$ мм.

7. Определить длительность воздействия, необходимую для испарения керамики, стекла, пластмассы следующими источниками излучения:

а) непрерывным излучением CO₂-лазера мощностью $P = 100$ Вт при радиусе облученной области $r_0 = 30$ мкм;

б) непрерывным излучением YAG:Nd лазера мощностью $P = 100$ Вт при $r_0 = 1$ мм.

8. Определить, произойдет ли локальное испарение поверхности вольфрама при фокусировании на ней пучка непрерывного YAG:Nd лазера мощностью 100 Вт (фокусное расстояние оптической системы $f = 10$ см) при расходимости пучка

а) $\theta = 2$ мрад;

б) $\theta = 20$ мрад.

9. Обосновать применение CO₂-лазера для обработки Al, Cu (сильное отражение). Рассчитать пороговые плотности мощности по двум схемам: 1)испарение металла, 2)окисление и испарение металла.

10. Определить зависимость размера зоны теплового воздействия на поверхности объекта от скорости сканирования излучения непрерывного лазера. Построить график этой зависимости.

11. Определить время воздействия на объект излучения непрерывного лазера, размер пятна которого d_0 , при скорости сканирования $V_{ск}$. Провести расчеты для $d_0 = 1; 10; 100$ мкм и $V_{ск} = 1$ см/с; 1 м/с.

12. Определить максимальную скорость сканирования лазерного пучка при лазерной гравировке испарением поверхности хрома излучением непрерывного YAG:Nd лазера мощностью 100 Вт при радиусе пятна облученной области $r_0 = 0.3$ мм.

13. Определить зависимость температуры тонкой пластины от времени при нагревании ее равномерно по площади и толщине импульсным лазерным излучением, плотность мощности которого изменяется во времени t следующим образом:

а) $q = q_*$,

б) $q = 2q_* \frac{t}{\tau}$,

в) $q = 2q_* \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)$,

где $q_* = \text{const}$, τ — длительность импульса излучения.

14. Рассчитать температуру поверхности облучаемого тела в центре облученной области при изменяющейся во времени плотности мощности излучения, приняв аппроксимацию $q(t) = q \left(1 - \left(\frac{t}{\tau}\right)^n\right)$, если

$$T = \frac{A\sqrt{a}}{k} \int_0^{\tau} \frac{q(t)}{\sqrt{\tau-t}} dt + T_0.$$

15. Найти давление отдачи при лазерном испарении железа, если скорость его удаления 1 м/с, а скорость пара у поверхности 1 км/с.

16. Определить давление отдачи, действующее на стальную мишень при испарении слоя 10 мкм импульсом лазерного излучения длительностью 10^{-7} с, если скорость вылета паров 1 км/с.

17. Определить связь импульса отдачи, возникающего при испарении материала с помощью лазерного излучения, и давления отдачи с плотностью мощности.

18. Построить зависимость скорости испарения железа от температуры поверхности. Определить, во сколько раз изменится скорость испарения при изменении температуры от комнатной до температуры кипения.

19. По формуле Френкеля найти максимальное значение dV/dT и определить его величину применительно к конкретным процессам испарения, окисления, диффузии.

20. Определить скорость движения частиц от поверхности детали при ее сухой лазерной очистке, предполагая, что частицы имеют сферическую форму и слабую адгезию к поверхности, распределение температуры в них равномерное, а теплоотвод из частиц в деталь пренебрежимо мал. Определить мощность излучения лазера, необходимую для достижения частицами меди скорости 0.1 м/с при размере облученной области 1 см^2 . Поглощательную способность частиц принять равной 0.1.

21. Оценить плотность фотонов, давление света на мишень и плотность мощности излучения при диаметре облученной области 1 см^2 и при следующих значениях длительности импульса τ , энергии импульса W и длины волны излучения λ :

- а) $\tau = 10^{-3} \text{ с}$, $W = 1 \text{ Дж}$, $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$;
- б) $\tau = 10^{-9} \text{ с}$, $W = 10^{-3} \text{ Дж}$, $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$;
- в) $\tau = 10^{-15} \text{ с}$, $W = 10^{-5} \text{ Дж}$, $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$;
- г) $\tau = 10^{-13} \text{ с}$, $W = 10^{-6} \text{ Дж}$, $\lambda = 0.8 \text{ мкм}$ (лазер на Ti-сапфире);
- д) $\tau = 10^{-14} \text{ с}$, $W = 10^{-3} \text{ Дж}$, $\lambda = 0.193 \text{ мкм}$ (Ar-P эксимерный лазер).

Раздел 4. Лазерная микрообработка материалов

Лазерная микрообработка как раздел лазерного формообразования, основанный на удалении материала, включает в себя прежде всего процессы сверления отверстий, резки, а также гравировки и маркировки. Основным механизмом удаления материала является его испарение и вытеснение расплава из зоны облучения под действием давления паров или внешних механических сил.

Начальная стадия процесса может быть описана моделью поверхностного испарения вещества. Пренебрегая затратами энергии на нагревание материала до температуры кипения $\rho c T_{\text{кип}}$, на расплавление $L_{\text{пл}}$, на теплопроводность, то есть считая, что вся подводимая энергия тратится на испарение $L_{\text{исп}}$ (что можно допустить с некоторой погрешностью для малых времен воздействия, т.к. $L_{\text{пл}}, \rho c T_{\text{кип}} \sim 0.1 L_{\text{исп}}$), получим скорость роста цилиндрического отверстия с диаметром, равным диаметру светового пятна d_0 и глубиной h , в виде

$$V \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = \frac{q \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]}{L_{\text{исп}} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right]} \quad (4.1)$$

где $V = h/\tau$ (τ — длительность воздействия).

При этом связь скорости движения границы испарения V с температурой поверхности T_0 определяется выражением (3.6).

Как видно из выражения (4.1), глубина отверстия h согласно этой модели растет линейно со временем, а диаметр d остается постоянным. Эксперимент удовлетворительно описывается этой моделью для начальной стадии процесса разрушения, когда $h(t) < d(t)$ (рис. 4.1). После этого рост отверстия в глубину замедляется, а его диаметр, наоборот, начинает увеличиваться. На этой стадии развития отверстия необходимо учитывать движение расплава и взаимное расположение поверхности материала и сфокусированного пучка излучения. Особенности лазерной размерной обработки с учетом этих факторов рассмотрим в применении к лазерному сверлению отверстий и резке материалов.

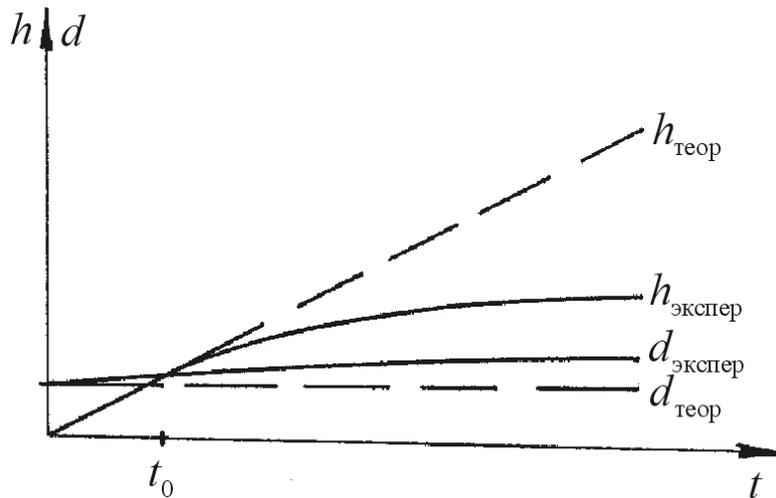


Рис. 4.1. Изменение глубины h и диаметра d отверстия во времени (экспериментальные и теоретические значения)

4.1. Лазерное сверление отверстий

Кинетика роста лунки при лазерном сверлении отверстий зависит от многих факторов, связанных с особенностями движения пара и течения расплава по стенкам отверстия сложной формы и их взаимным влиянием. Поэтому точное решение задачи достаточно сложно, и используются те или иные феноменологические модели. Согласно наиболее распространенной модели, основанной на результатах скоростной киносъемки, при фокусировке излучения ниже передней поверхности образца вблизи нее в материале образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому. Изменение размеров лунки со временем происходит таким образом, что ее радиус $r(t)$ и глубина $h(t)$ связаны между собой уравнением светового конуса с углом раствора 2γ (рис. 4.2):

$$r(t) = r_0 + \operatorname{tg}\gamma h(t). \quad (4.2)$$

Предполагается, что материал со дна лунки только испаряется, а со стенок уносится в виде расплава, причем оба процесса являются квазистационарными. Тогда в пренебрежении температурной зависимостью теплоты испарения и экранировкой поверхности продуктами разрушения уравнение энергетического баланса в лунке может быть записано следующим образом:

$$P(t)dt = \rho L_{\text{пл}} \pi r^2(t) dh + \rho L_{\text{пл}} 2\pi r(t) h(t) dr, \quad (4.3)$$

где $P(t)$ — текущее значение поглощенной мощности излучения, $L_{\text{пл}}$ — удельная теплота плавления материала (на единицу объема).

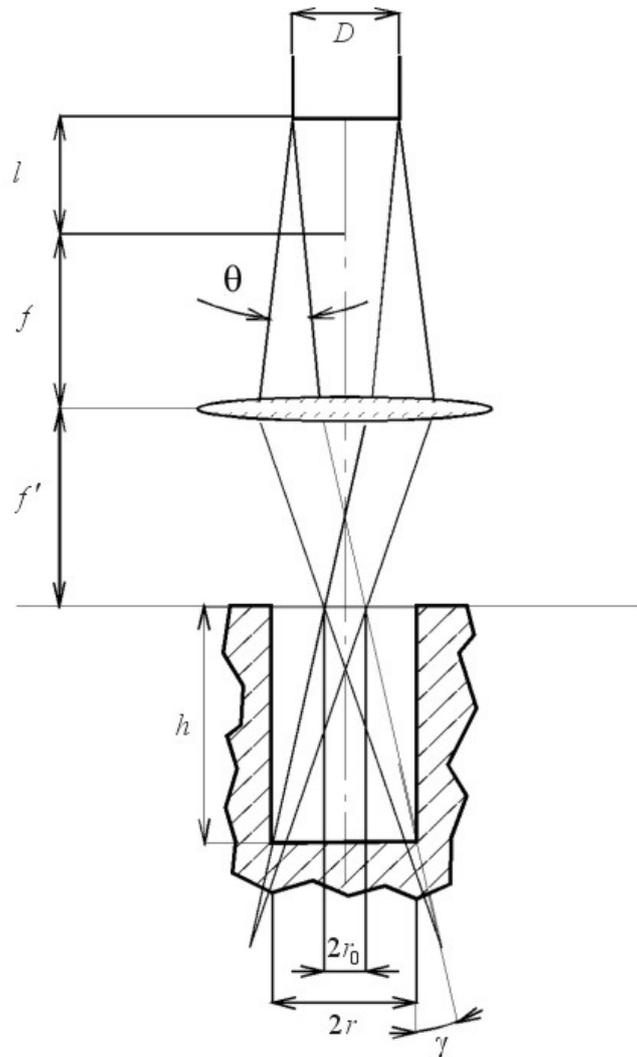


Рис. 4.2. Схема лазерного сверления отверстия

Решение системы (4.2, 4.3) для $P = \text{const}$ и $L_{\text{н}} \gg L_{\text{пл}}$ дает:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\text{tg}\gamma}\right)^3 + \frac{3Pt}{\pi \text{tg}^2\gamma \cdot \rho L_{\text{н}}} - \frac{r_0}{\text{tg}\gamma}}; \quad (4.4)$$

$$r = \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3Pt \text{tg}\gamma}{\pi \rho L_{\text{н}}}}. \quad (4.5)$$

Анализируя выражения (4.4) и (4.5), можно показать, что на начальной стадии процесса образования лунки ($h \ll r_0$) ее глубина растет линейно во времени за счет испарения материала по площади светового пятна (как в одномерной модели квазистационарного испарения), а диаметр меняется слабо. С течением времени скорость роста лунки в глубину замедляется, в предельном случае ($t \rightarrow \infty$) ее глубина и радиус растут пропорционально $t^{1/3}$, т.е. форма лунки не меняется. Такой режим квазистацио-

нарного развития лунки устанавливается при $q = 10^7 - 10^8$ Вт/см² к концу лазерного импульса длительностью $\tau = 1$ мс.

При заданных значениях h и r параметры режима обработки (преимущественно энергия излучения и фокусное расстояние оптической системы) определяются из баланса энергии и геометрических соотношений (в зависимости от отношения h/r).

Рассмотренная модель справедлива при фокусировке излучения вблизи начального расположения поверхности материала. Однако условия фокусировки оказывают значительное влияние на профиль лунки. При обработке в сходящемся световом пучке характерной является коническая форма лунки, в расходящемся — цилиндрическая. С увеличением расстояния между плоскостью фокусировки и поверхностью материала увеличивается радиус лунки и уменьшается ее глубина.

Существует ряд методов, позволяющих повысить точность и качество сверления отверстий.

а) Применение импульса с определенной формой и структурой. Оптимальным является импульс с коротким передним и задним фронтом ($\tau_{\phi} < 0.1r_0^2/a$). Благоприятным для размерной обработки является пиковый режим излучения.

б) Использование проекционной оптической системы и обработка отверстия в цилиндрической световой трубке (см. раздел 2).

в) Применение многоимпульсного метода обработки. При этом лунка растет в глубину постепенно за счет послойного испарения материала каждым импульсом. Окончательная глубина отверстия определяется суммарной энергией серии импульсов (в выражении (4.4) $Pt = W = \sum_{i=1}^n W_i$, где n —

число импульсов, W_i — энергия i -го импульса), а радиус отверстия — усредненными параметрами отдельного импульса (в выражении (4.5)

$Pt = W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$). Для многоимпульсного режима обработки характерно

снижение доли расплава в продуктах разрушения. Многоимпульсный режим используется для получения прецизионных или максимально глубоких отверстий. Таковым, по существу, является режим обработки серией коротких импульсов микросекундной или наносекундной длительности.

г) Применение систем автоподстройки фокуса. Производится относительное смещение оптической системы перед очередным импульсом на величину, равную толщине испаренного за предыдущий импульс слоя. Таким образом, плотность мощности излучения на движущейся поверхности испарения (дне отверстия) остается постоянной на протяжении всей обработки.

4.2. Лазерная резка материалов

Лазерная резка, как и другие виды лазерной обработки, основана на тепловом действии излучения, при этом характерной особенностью является то, что нагревание происходит под действием движущегося источника тепла. В зависимости от значения величины $\frac{V_{\text{ск}} r_0}{a}$ ($V_{\text{ск}}$ — скорость сканирования лазерного пучка по поверхности материала, r_0 — радиус облученной области, a — температуропроводность материала) источник можно считать быстро движущимся или медленно движущимся (см. раздел 3). При лазерной резке металлов и полупроводников со скоростью $V_{\text{ск}} \leq 1 \text{ см/с}$ и размере облученной области $r_0 \leq 0.5 \text{ мм}$ источник тепла, как правило, является медленно движущимся, и температура в центре облученной области определяется выражением (3.5). В этом случае из-за большой теплопроводности материала температура поверхности может зависеть и от толщины обрабатываемого листа или пластины h , если время $2r_0/u_0$ будет больше времени теплопроводностного прогрева пластины h^2/a , т.е. при $h < (2ar_0/u_0)^{1/2}$. При этом представляет интерес оценка температуры в центре зоны облучения в случае, когда за счет теплопроводности температура по толщине пластины становится одинаковой:

$$T \approx \frac{qr_0^2}{2kh} \ln \frac{2.25}{r_0 V_{\text{ск}}}. \quad (4.6)$$

При лазерной резке диэлектрических материалов или металлических пленок на диэлектрических подложках источник тепла является быстро движущимся, и температура в наиболее горячей точке определяется выражением (3.4).

Изложенные особенности процесса нагревания движущимся источником тепла характерны для режима непрерывного облучения материала. Если лазер работает в импульсном режиме, генерируя серию импульсов длительностью τ при частоте следования импульсов $f_{\text{и}}$, то при длительности импульса $\tau < 0.1r_0/V_{\text{ск}}$ импульсный источник можно рассматривать как неподвижный (что верно во всех представляющих интерес случаях при $V_{\text{ск}} < 1 \text{ см/с}$ и $r_0 > 10 \text{ мкм}$). После окончания очередного импульса материал начинает остывать, и если частота следования импульсов $f_{\text{и}} < a/30r_0^2$, то накопления тепла от импульса к импульсу не происходит, и результат воздействия зависит только от энергетических параметров отдельного импульса.

Лазерная резка может быть основана на различных процессах: испарении материала, плавлении с удалением расплава из зоны реза, химических реакциях (горении, разложении с выделением летучих соединений и др.). Получение глубокого реза испарением сопряжено с образованием

достаточно большого количества жидкой фазы и ее неполным удалением из зоны воздействия излучения давлением паров. В этом случае с целью исключения заплавления сквозного реза применяют устройства отсоса продуктов разрушения из зоны резания или поддув активного газа, обычно кислорода, в зону резания (газолазерная резка).

Примеры решения задач

Задача 4.1. Пользуясь геометрической моделью, найти максимально возможное отношение глубины отверстия к его диаметру.

Решение

Из формулы (4.2) следует, что $\frac{h(t)}{r(t)} = \left[1 - \frac{r_0}{r(t)}\right] \operatorname{ctg} \gamma$. Искомое отношение

$\frac{h(t)}{r(t)}$ максимально, если выражение в квадратных скобках стремится к 1, т.е. $r(t)$ максимально. Тогда

$$\frac{h(t)}{r(t)} = \operatorname{ctg} \gamma.$$

Из геометрии рисунка 4.2 следует, что $\operatorname{ctg} \gamma$ определяется следующим образом:

$$\operatorname{ctg} \gamma = \frac{2f'}{D}.$$

Таким образом, искомое отношение равно

$$\frac{h(t)}{2 \cdot r(t)} = \frac{f'}{D}.$$

Задача 4.2. Определить максимальную скорость резки V_{\max} медной фольги толщиной $h = 0.1$ мм:

а) непрерывным излучением YAG:Nd лазера мощностью $P_0 = 500$ Вт при радиусе пятна $r_0 = 50$ мкм;

б) импульсным излучением YAG:Nd лазера со средней мощностью $P_{\text{cp}} = 500$ Вт, $\tau = 10^{-7}$ с; частота следования импульсов $f_{\text{и}} = 10$ кГц, $r_0 = 50$ мкм, угол схождения излучения $\gamma = 3^\circ$.

Решение

Так как медь имеет большую теплопроводность, то можно предположить, что при сканировании непрерывным излучением можно воспользоваться формулой для медленно движущегося источника, и за время воздействия происходит выравнивание температуры по толщине фольги. При этом

$$T = \left(\frac{qr_0^2}{2kh} \right) \ln \left(\frac{2.25a}{r_0 V_{\text{ск}}} \right) + T_{\text{н}},$$

где $q = \frac{P_0(1-R)}{\pi r_0^2}$. Отсюда

$$V_{\text{ск}} = \frac{2.25a}{r_0} \exp \left[- \frac{2\pi kh(T - T_{\text{н}})}{P_0(1-R)} \right].$$

Максимальная скорость сканирования определяется нагревом фольги до температуры $T = T_{\text{кип}}$. Подставляя численные значения, получим $V_{\text{max}} = 4 \text{ см/с}$.

При обработке в импульсно-периодическом режиме происходит накопление тепла от импульса к импульсу, так как

$$f_{\text{н}} > \frac{a}{30r_0^2} = 1.5 \text{ кГц.}$$

В этом случае расчет строится на многоимпульсной модели (аналогично лазерному образованию отверстий). При этом толщина реза (здесь она равна толщине фольги) определяется выражением

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\text{tg}\gamma} \right)^3 + \frac{3W}{\pi \text{tg}^2 \gamma \cdot L_0} - \frac{r_0}{\text{tg}\gamma}},$$

где $L_0 \approx L_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения, γ — угол схождения, W — суммарная поглощенная энергия n импульсов ($W = nW_i$). Отсюда находим требуемую суммарную поглощенную энергию W :

$$W = \frac{\pi L_0 \text{tg}^2 \gamma}{3} \left[\left(h + \frac{r_0}{\text{tg}\gamma} \right)^3 - \left(\frac{r_0}{\text{tg}\gamma} \right)^3 \right] = 3.4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.}$$

Энергия одного импульса равна

$$W_{\text{имп}} = \frac{P_0(1-R)}{f_{\text{н}}} = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Максимальная скорость сканирования определяется минимальным количеством импульсов, облучающих каждую точку реза:

$$V_{\text{max}} = \frac{r_0 f_{\text{н}}}{n} = \frac{r_0 f_{\text{н}} W_{\text{имп}}}{W} = 7 \text{ см/с.}$$

ЗАДАЧИ

1. Оценить скорость испарения материала (скорость роста глубины отверстия) в стали, вольфраме при поглощенной плотности мощности излучения $q = 10^8 \text{ Вт/см}^2$.

2. Определить значения плотности мощности излучения, необходимые для получения отверстия глубиной 1 мм ($\tau = 10^{-3}$ с). Вывести зависимость поглощенной плотности мощности лазерного излучения от глубины отверстия.

3. Пользуясь законом сохранения импульса, оценить давление отдачи пара по известным экспериментальным значениям толщины испаренного слоя алюминия и длительности лазерного импульса. Сравнить с теоретическим значением. Построить зависимость толщины испаренного слоя от времени.

4. Определить предельную глубину отверстия в стали, связанную с расфокусировкой излучения, при $\gamma = 0.2$, $q = 10^8$ Вт/см², $\tau = 10^{-3}$ с, $r_0 = 10$ мкм.

5. Определить зависимость глубины и радиуса отверстия от параметров обработки (энергии лазерного импульса, угла расхождения излучения после фокуса оптической системы) по геометрической модели при $h(t) \gg r_0$ и $h(t) \ll r_0$.

6. Определить теплоту разрушения L_p при двухфазном разрушении и заданной схеме обработки (используя геометрическую модель образования отверстия).

7. Найти соотношение жидкости и пара в продуктах разрушения, образующихся при лазерном сверлении отверстий, используя двухфазную феноменологическую модель образования отверстия.

8. Оценить глубину отверстия, получаемую импульсом свободной генерации, игнорируя пиковую структуру, если $\tau = 10^{-3}$ с, $E = 10^{-2}$ Дж, диаметр пятна в фокусе 20 мкм. Определить перекрытие отверстий при скорости перемещения объекта $V_{ск} = 0.1$ см/с, частоте следования импульсов $f_{и} = 250$ Гц, $\text{tg } \gamma = 0.4$. Материал — железо.

9. Предложить оптико–механическую схему лазерного сверления отверстий диаметром от 10 до 200 мкм в фольге толщиной 100 мкм, если производительность лазера равна 600 отв/мин, фокусное расстояние оптической системы $f = 50$ мм, материал — сталь и медь.

10. Определить параметры оптической системы (γ и f) для профильной резки медицинских стентов («протезов» кровеносных сосудов) - металлических трубок диаметром 1 и 2 мм с толщиной стенок 100 мкм, при которых исключаются повреждения противоположной стенки трубки, когда ее передняя поверхность испаряется.

11. Назвать причины отклонения качества отверстий от идеальных.

12. Определить глубину отверстия h , его диаметр d и отношение h/d при многоимпульсной обработке, используя геометрическую модель образования отверстия.

13. Оценить параметры многоимпульсного режима обработки для получения в стали отверстий глубиной 1 мм и диаметром 100 мкм при скорости испарения $V_{\text{и}} = 1 \text{ км/с}$. Расчет провести для импульсов излучения длительностью 1 мс, 0.1 мкс, 10 нс.

14. Определить для указанных ниже материалов критерии быстро и медленно движущегося источника и пороговые плотности мощности излучения, необходимые для их резки при скоростях сканирования:

- 1) бумага, 500 см/с;
- 2) фанера, 2 см/с;
- 3) стекло, 2.5 см/с;
- 4) сталь, 10 см/с;
- 5) резина, 2.5 см/с;
- 6) кожа, 28 см/с.

Размер облученной области для стали — 200 мкм, для остальных материалов — 500 мкм. Определить значения необходимой мощности излучения.

15. Найти пороги лазерной резки материалов непрерывным излучением CO_2 и YAG:Nd -лазеров. Определить достижимые глубины резки при мощности излучения $P_0 = 100 \text{ Вт}$ (YAG:Nd -лазер) и $P_0 = 1000 \text{ Вт}$ (CO_2 -лазер). Найти максимальную скорость резки V_{max} пластины стали толщиной $d = 1 \text{ мм}$ для этих же лазеров.

16. Сравнить пороги резки для импульсного и непрерывного YAG:Nd лазера и скорости резки при толщине пластины $d = 1 \text{ мм}$ и при одной и той же средней мощности $P = 500 \text{ Вт}$.

17. Проанализировать возможность использования полупроводникового лазера (мощность 100 Вт, расходятся 250x150 мрад) для резки бумаги.

18. Определить необходимые и достаточные условия, при которых лазер может использоваться для резки.

19. Рассчитать изменение параметров установки при использовании оптической системы с автоподстройкой фокуса при заданной глубине и диаметре отверстий.

Раздел 5. Лазерное термоупрочнение и сварка

Явления нагрева и плавления материала без разрушения являются физической основой для технологических процессов термоупрочнения и сварки.

5.1. Термоупрочнение

Особенности применения лазерной термообработки определяются спецификой лазерного нагрева материалов. В частности, высокие скорости нагрева поверхности и ее охлаждения обеспечивают эффективное термоупрочнение поверхности при нагреве выше температуры закалки, а большие значения температуры и ее градиентов в зоне лазерного воздействия облегчают диффузию легирующих элементов в термообрабатываемый материал.

Основной целью лазерной закалки является повышение твердости и износоустойчивости материалов в результате изменения их структуры. Быстрое охлаждение поверхности материала за счет теплопроводности (со скоростью порядка 10^8 К/с) после прекращения подвода энергии лазерного излучения приводит к повышению твердости приповерхностных слоев в результате структурных изменений. Закалку производят как непрерывным, так и импульсным лазерным излучением. Для термоупрочнения заданной области поверхности используют сканирование лазерного пучка по поверхности или перемещение обрабатываемой детали. Температуру нагрева поверхности и глубину прогрева можно регулировать путем изменения мощности лазерного пучка, степени его фокусировки и длительности воздействия или скорости перемещения пучка по поверхности материала. Глубину закаленного слоя можно количественно оценить из выражения для распределения температуры в материале при равномерном облучении его поверхности. Для сильно поглощающего материала (например, металла) при условии, что размер облученной области r_0 существенно превышает толщину прогретого слоя ($r_0 \gg \sqrt{at}$, где a — температуропроводность материала, τ — длительность воздействия излучения), это выражение имеет вид

$$T(x, t) = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{at}}{k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + T_H, \quad (5.1)$$

где q_0 — плотность мощности падающего излучения на поверхности, R — коэффициент отражения, T_H — начальная температура материала, k — его теплопроводность, t — время, отсчитываемое с начала облучения, ось x направлена вглубь материала перпендикулярно его поверхности ($x = 0$ соответствует поверхности).

Выражение (5.1) позволяет также определить скорость нагрева и градиент температуры в материале.

После окончания воздействия излучения ($t \geq \tau$) распределение температуры определяется зависимостью

$$T(x, t) = (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left[\sqrt{t} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - (\sqrt{t - \tau}) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t - \tau)}} \right], \quad (5.2)$$

где T_0 — температура поверхности в момент окончания воздействия излучения. Выражение (5.2) позволяет определить скорость остывания материала.

Закалка может производиться как в твердой фазе, $T < T_{\text{пл}}$, так и через расплав, при $T > T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала). Глубина закаленного слоя, h_T , в первом случае ограничена нагреванием поверхности до $T_{\text{пл}}$, а во втором, $h_{\text{ж}}$, — до $T_{\text{кип}}$, таким образом, $h_{\text{ж}} > h_T$. Однако при закалке в твердой фазе сохраняется исходное качество поверхности детали, а при закалке из жидкой фазы оно ухудшается из-за конвекции и действия давления отдачи.

Возможна еще одна разновидность лазерной закалки — ударная закалка. Она происходит при лазерном испарении с поверхности обрабатываемой детали предварительно нанесенного тонкого слоя материала, имеющего низкую температуру испарения, за счет ударного воздействия давления отдачи паров на нагретый материал.

Другим направлением лазерной термообработки является лазерное легирование поверхности с целью повышения ее твердости. При этом на обрабатываемую поверхность наносится порошок, содержащий легирующие присадки, а затем производится облучение поверхности. В результате происходит механическое перемешивание расплавленного порошка и основного материала в тонком приповерхностном слое под действием гидродинамических сил и температурных градиентов или диффузное распространение с образованием твердого раствора.

5.2. Лазерная сварка

Метод лазерной сварки обладает важными преимуществами по сравнению с большинством других способов сварки.

Высокая плотность мощности излучения обеспечивает возможность сваривания тугоплавких материалов (вольфрам, тантал, молибден) и материалов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро). Кратковременность и локальность лазерного воздействия позволяют сваривать детали малой толщины (~ 10 мкм) и малых размеров при незначительном термическом воздействии на соседние участки. Большое значение имеют бесконтактность воздействия и возможность сварки в прозрачной газовой или жидкой среде.

Плавление под действием лазерного излучения представляет основной процесс, лежащий в основе лазерной сварки. При этом возможность сварки определяется, в первую очередь, используемыми материалами. Если мате-

риалы пригодны для лазерной сварки, то для обеспечения хорошего сварного соединения необходимо создать условия, при которых происходило бы опережающее плавление свариваемой детали больших размеров относительно плавления свариваемой детали меньших размеров.

При лазерной сварке металлов световое пятно, получаемое на поверхности свариваемых деталей при фокусировке излучения, является поверхностным источником нагрева, т.к. излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной в несколько сотых долей микрона. При значениях плотности мощности излучения, недостаточных для интенсивного испарения ($q \approx 10^5-10^6$ Вт/см² при длительности воздействия $\tau \sim 10^{-3}-10^{-2}$ с) передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется в основном за счет теплопроводности. При этом (теплопроводностный режим, рис. 5.1, а) форма зоны проплавления близка к шаровому сегменту.

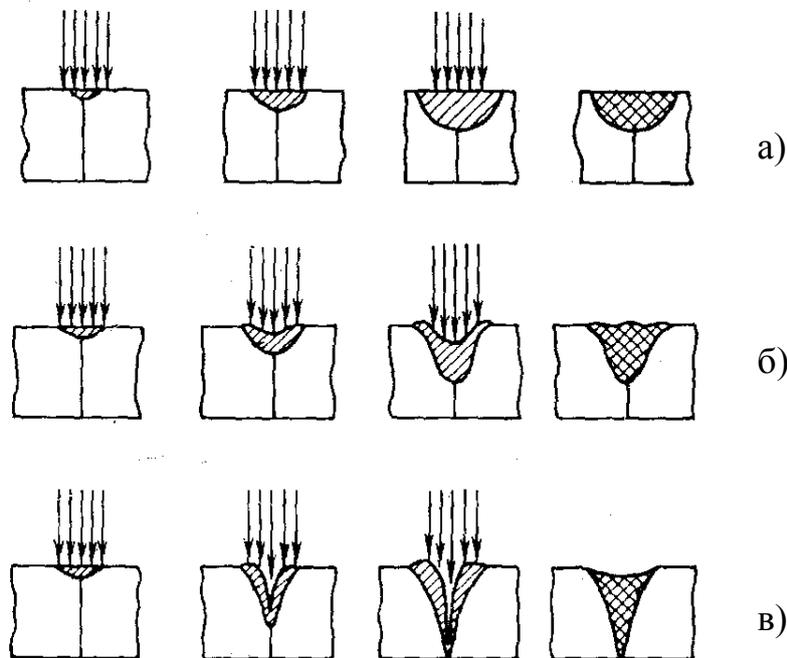


Рис. 5.1. Режимы лазерной сварки: а) теплопроводностный режим, б) сварка с прогибом, в) режим кинжального проплавления

Если плотность мощности излучения достаточна для испарения материала с поверхности образца (что обычно наблюдается при лазерной сварке), поверхность сварочной ванны прогибается под действием давления пара. При относительно малой плотности мощности излучения поверхностное натяжение расплавленного металла превышает силу давления паров, что препятствует выплеску расплава, т.е.

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma}{h_{пл}/2} > P_{отд}, \quad (5.3)$$

где $h_{пл}$ — толщина расплавленного слоя, $h_{пл}/2$ — радиус кривизны на краю зоны расплава. При этом после окончания воздействия излучения расплавленный металл заполняет образовавшееся углубление, но глубина проплавления увеличивается по сравнению с нагревом без заметного испарения. Форма зоны проплавления близка к конической (сварка с прогибом — рис. 5.1, б).

При увеличении плотности мощности излучения до величины $q \sim 5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$ Вт/см² в сварочной ванне образуется узкое глубокое отверстие, металл из которого частично испаряется, частично вытесняется к периферии зоны воздействия давлением паров. При этом после окончания воздействия излучения отверстие заполняется расплавом из периферийной части области воздействия, где интенсивность излучения была недостаточна для испарения расплава (режим кинжального или глубокого проплавления, рис. 5.1, в).

Оценка глубины проплавления при сварке в отсутствие испарения может быть получена из решения краевой задачи теплопроводности одномерного нагрева материала (5.1).

Существуют следующие разновидности сварки: точечная и шовная. Точечная лазерная сварка эффективно применяется в микроэлектронной технологии на операциях сварки проводов, приварки проволок к контактными площадкам и тонким пленкам, сварки тонких пластин. Шовная лазерная сварка производится с помощью лазеров, работающих в непрерывном режиме и в импульсно-частотном режиме методом перекрытия зон воздействия.

Скорость шовной импульсной сварки определяется диаметром сварных точек d , коэффициентом их перекрытия p и частотой следования импульсов f :

$$V = fd(1 - p). \quad (5.4)$$

При заданном коэффициенте перекрытия, от которого зависит качество шва, увеличение скорости сварки может быть достигнуто за счет увеличения диаметра светового пятна или его вытягивания в направлении шва. Из-за ограничений, налагаемых теплопроводностью, высокие скорости сварки возможны лишь для тонких деталей.

Примеры решения задач

Задача 5.1. Оценить скорость нагрева и охлаждения при лазерной импульсной закалке стали.

Решение

Выражение для скорости нагрева можно получить дифференцированием по времени уравнения (5.1):

$$T(x,t) = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{at}}{k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + T_H.$$

Тогда

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{q_0(1-R)}{k} \sqrt{\frac{a}{t}} \left(\operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \cdot \frac{x}{2\sqrt{at}} \right).$$

На поверхности (при $x = 0$) эта зависимость имеет вид

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{q_0(1-R)\sqrt{a}}{k\sqrt{\pi t}}.$$

Для оценки скорости нагрева при закалке стали введем величину T_0 — температура поверхности в момент окончания воздействия, которая изменяется в пределах от $T_{\text{зак}}$ до $T_{\text{пл}}$ и определяется следующим выражением:

$$T|_{t=\tau, x=0} = T_0 = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}}.$$

В итоге получаем:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{T_0}{2\sqrt{t\tau}}.$$

Оценим скорость нагрева при $t = \tau = 10^{-3} \text{ с}$; $T_{\text{зак}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ для стали:

$$5.6 \cdot 10^5 \frac{\text{K}}{\text{с}} < \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial t} < 8.8 \cdot 10^5 \frac{\text{K}}{\text{с}}.$$

Для нахождения скорости охлаждения воспользуемся формулой (5.2) для распределения температуры после окончания воздействия излучения:

$$T(x,t) = (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left[\sqrt{t} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - (\sqrt{t-\tau}) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right],$$

где T_0 — температура поверхности в момент окончания воздействия излучения, t — время, отсчитываемое с начала облучения.

Производная по времени $\frac{\partial T}{\partial t}$ от этого выражения имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = & (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{t}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} \cdot \frac{x}{4t\sqrt{a}} \right\} - \\ & - (T_0 - T_H) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{t-\tau}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{t-\tau}} \cdot \frac{x}{4(t-\tau)\sqrt{a}} \right\}. \end{aligned}$$

На поверхности ($x = 0$) получаем:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{(T_0 - T_H)}{2\sqrt{\tau}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \right\}.$$

Оценим скорость охлаждения поверхности при $t = 2\tau$:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(T_0 - T_H)}{2\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 1 \right) = -0.146 \frac{T_0}{\tau},$$

тогда, в зависимости от величины T_0 ($T_{\text{зак}} < T_0 < T_{\text{кип}}$), скорость охлаждения поверхности изменяется в пределах

$$-2.6 \cdot 10^5 \frac{\text{К}}{\text{с}} < \frac{\partial T(0; 2\tau)}{\partial t} < -1.6 \cdot 10^5 \frac{\text{К}}{\text{с}}.$$

Задача 5.2. Определить диапазон допустимых значений плотности мощности излучения для сварки «встык» двух пластин из фольги из золота и хрома толщиной 0.1 мм излучением YAG:Nd лазера ($\tau = 10^{-4}$ с). Считать, что до начала расплавления одной из пластин они теплоизолированы друг от друга, после чего температуры пластин в облученной области равны. Облученная область симметрична относительно сварного шва.

Решение

Для образования сварного соединения необходимо, чтобы оба металла достигли температуры плавления, но не начали испаряться. Плотность мощности излучения, необходимую для нагревания каждого из металлов до температуры T в течение импульса излучения в условиях отсутствия их теплового контакта, определим из уравнения баланса энергий в расчете на единицу площади облученной области:

$$q_0 A \tau = \rho c h (T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{\rho c h (T - T_H)}{A \tau}.$$

Вычисления показывают, что для Cr достижение температуры плавления требует плотности мощности излучения $q_0 = 1.47 \cdot 10^6$ Вт/см², для золота, по причине высокого коэффициента отражения, много больше — $q_0 = 12.9 \cdot 10^6$ Вт/см². Таким образом, при $q_0 > 1.47 \cdot 10^6$ Вт/см² происходит плавление фольги Cr в облученной области. После этого будем считать температуру обоих металлов в облученной области одинаковой. Уравнение баланса энергий при этом имеет вид

$$q_0 (A_{\text{Cr}} + A_{\text{Au}}) \tau = (\rho_{\text{Cr}} c_{\text{Cr}} + \rho_{\text{Au}} c_{\text{Au}}) h (T - T_H).$$

Отсюда

$$q_0 = \frac{(\rho_{\text{Cr}} c_{\text{Cr}} + \rho_{\text{Au}} c_{\text{Au}}) h (T - T_H)}{(A_{\text{Cr}} + A_{\text{Au}}) \tau}.$$

Диапазон допустимых значений плотности мощности излучения определим следующим образом:

$$\max \{ q_0 (T_{\text{плCr}}), q_0 (T_{\text{плAu}}) \} < q_0 < \min \{ q_0 (T_{\text{кипCr}}), q_0 (T_{\text{кипAu}}) \}.$$

Подставив численные значения, получим:

$$2.4 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2 < q_0 < 3.34 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2.$$

ЗАДАЧИ

1. Рассчитать глубину термоупрочненного слоя для стали 4-мя способами и сравнить с максимальной глубиной изотермической закалки:

1) из выражения $T(x, t) = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{at}}{k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} + T_{\text{н}}$ при условии $T_{\text{пов}} = T_{\text{пл}}$, температура закалки $T_3 \approx 0.5T_{\text{пл}}$;

2) как $h = \beta\sqrt{at}$ (найти коэффициент β);

3) из графика выражения (5.1);

4) из энергетических соображений, считая, что вся мощность идет на нагрев термоупрочненного слоя (в пренебрежении теплопроводностью).

2. Оценить диапазон значений плотности мощности излучения при лазерном термомеханическом упрочнении стали с помощью нанесенного на поверхность свинца в твердой фазе. Рассчитать толщину пленки свинца, при которой возможны режимы термомеханического упрочнения.

3. Определить максимальную скорость сварки стальных изделий излучением непрерывного CO_2 лазера мощностью 1 кВт при радиусе пятна облучения на поверхности 0.5 мм.

4. Найти глубину расплавленного слоя при лазерной сварке Al 4-мя способами (см. задачу 1).

5. Вывести закон изменения плотности мощности лазерного излучения по мере смещения сварочной ванны вниз (прогиб и проплавление), вверх (тепловое расширение).

6. Проанализировать влияние малых вертикальных перемещений расплавленной поверхности сварочной ванны на стабильность процесса проплавления при фокусировке излучения на поверхности. Нагревание осуществляется лазером на YAG:Nd мощностью $P = 100$ Вт, диаметр пучка лазерного излучения $d = 6$ мм, расходимость $\theta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад, фокусное расстояние используемой линзы $f = 50$ см.

7. Используя значения плотности поглощенной мощности q , давления отдачи $P_{\text{отд}}$, давления поверхностного натяжения $P_{\text{пов}}$, привести оценки границ режимов сварки: теплопроводностного, с прогибом, глубокого проплавления; оценить толщину слоя расплава.

8. Определить, как зависит диапазон допустимых значений плотности мощности излучения для сварки «встык» двух пластин из алюминия и хрома излучением YAG:Nd-лазера от положения облученной области. Толщина пластин 0.1 мм. Считать, что до начала плавления одной из пластин они теплоизолированы друг от друга, после чего температуры пластин в облученной области равны.

9. По оптимальному временному ходу температуры при импульсной сварке (рис. 5.2) (минимальное значение t_0 , постоянная $T_{\text{пл}}$ в течение импульса) определить требуемую зависимость мощности лазерного импульса от времени и предложить пути ее реализации.

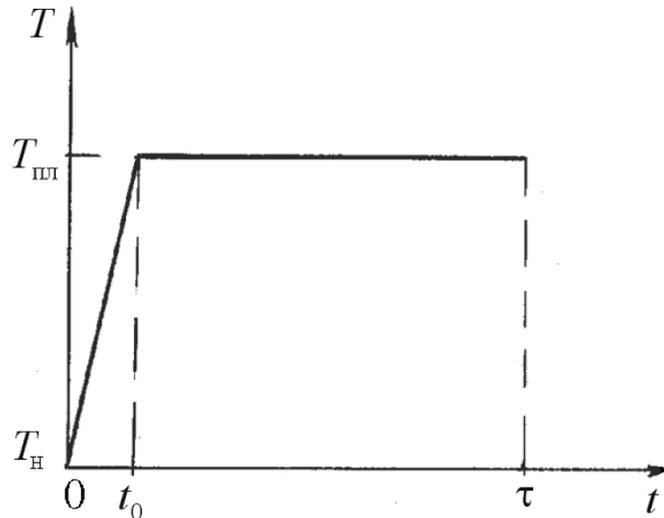


Рис. 5.2. Оптимальная зависимость температуры от времени при лазерной импульсной сварке

10. Провести анализ процесса приварки часовой пружины ко дну корпуса. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

11. Провести анализ процесса сварки зубных протезов. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

12. Провести анализ процесса герметизации корпусов микроприборов. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

13. Провести анализ процесса приварки обмотки к статору электродвигателя. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

14. Провести анализ процесса приварки сетчатки к главному дну. Разработать расчетные схемы, определить критерии сварки.

Раздел 6. Лазерная обработка пленочных элементов

Лазерная обработка нанесенных на подложку тонких пленок применяется для формирования пленочных элементов, широко используемых в приборостроении и микроэлектронике. Лазерная обработка тонких пленок отличается высокой точностью и локальностью, бесконтактностью, хорошей управляемостью и в большинстве случаев достаточной производительностью.

Физические механизмы действия лазерного излучения на тонкие пленки во многом аналогичны действию излучения на массивные материалы, но обладают некоторыми особенностями. Особенности поглощения лазерного излучения в пленке и преобразования лучистой энергии в тепловую связаны с тем, что длина свободного пробега электрона l_e в материале пленки соизмерима с ее толщиной. Поскольку электрон отдает свою энергию решетке на расстоянии $\sim 100l_e$, то пространственное распределение источников тепла по толщине пленки практически равномерно. Такое приближение оказывается приемлемым для большинства поглощающих пленок толщиной менее 5 мкм. При этом температура пленки практически одинакова по ее толщине, т.к. толщина пленки h , как правило, много меньше размера прогретого слоя в ней $\sqrt{a_1\tau}$ (a_1 — температуропроводность материала пленки, τ — длительность импульса излучения).

Специфика лазерного нагревания пленок связана с тем, что пленка на подложке является двухкомпонентной системой. Температура пленки в середине облученной области достаточно большого размера r_0 ($r_0 \gg \sqrt{a_1\tau}$) может быть определена из решения системы двух дифференциальных уравнений теплопроводности (для пленки и подложки) с соответствующими граничными и начальными условиями как

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{k_2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \psi \left[\exp(\psi^{-2}) \operatorname{erfc}(\psi^{-1}) - 1 \right] \right\} + T_H, \quad (6.1)$$

где $\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 t}}$, q_0 — плотность мощности падающего излучения, A —

поглощательная способность, ρ — плотность, c — теплоемкость, a — температуропроводность, k — теплопроводность, T_H — начальная температура, t — текущее время, $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-u^2} du$ — дополнительный инте-

грал вероятности, индекс «1» относится к пленке, «2» — к подложке.

Комплекс ψ определяет интенсивность теплоотвода из пленки в подложку. Его физический смысл заключается в том, что он характеризует отношение количества тепла в пленке к количеству тепла, запасенного в про-

гретом слое подложки. При $\psi \gg 1$ (теплоотвод в подложку мал, характерный масштаб времени для металлических пленок и диэлектрических подложек $t < 10^{-7}$ с) пленка нагревается как адиабатически изолированная, и выражение (6.1) приводится к виду

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 c_1 h} + T_H. \quad (6.2)$$

При $\psi \ll 1$ (нагрев пленки в основном определяется теплопроводностью подложки, а оптические характеристики пленки влияют лишь на количество поглощенной энергии, $t > 10^{-4}$ с)

$$T_1 = \frac{2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{k_2 \sqrt{\pi}} + T_H. \quad (6.3)$$

В отдельных лазерных технологиях используется обработка прозрачных и полупрозрачных пленок на непрозрачных или слабопоглощающих подложках. При этом поглощение излучения происходит полностью или частично в подложке. Выражения для определения температуры пленки в этих случаях приведены в [4].

С повышением температуры в пленке активизируется ряд процессов, которые могут привести к изменению ее физических или химических свойств. Основными процессами, используемыми в пленочных технологиях, являются испарение, плавление и термохимические реакции (в основном поверхностное окисление). Возможны также структурные превращения материала типа рекристаллизации, отжиг дефектов полупроводниковых структур, спекание и усадка пористых материалов, вжигание вещества пленки в подложку, термическое разложение в твердой и газовой фазе и др.

Основные сферы применения лазерной обработки пленочных элементов следующие.

1. Подгонка электрических параметров пленочных элементов (сопротивлений пленочных резисторов, емкостей пленочных конденсаторов, подстройка частоты кварцевых резонаторов, СВЧ–интегральных схем и т.п.)

Сопротивление пленочного резистора (рис. 6.1) определяется формулой

$$R_{\text{э}} = \frac{\rho_{\text{э}} L}{hB}, \quad (6.4)$$

где $\rho_{\text{э}}$ — удельное электрическое сопротивление материала пленки, h — толщина пленки, L и B — длина и ширина резистора. Подгонку сопротивления осуществляют, как правило, испарением части резистивного слоя. Изменение сопротивления резистора зависит от длины и ширины удаленной области пленки и ее ориентации на резисторе. Обычно используют X –рез (вдоль линий тока), Y –рез (поперек линий тока) и L –рез (комбинация X – и Y –резов). Изменение сопротивления резистора при его под-

гонке можно определить расчетом эквивалентной электрической схемы резистора. Альтернативным методом подгонки электрического сопротивления пленочного резистора является его нагревание без испарения, когда изменение его сопротивления происходит вследствие поверхностного окисления (увеличение сопротивления) или отжига дефектов (уменьшение сопротивления). В зависимости от условий осаждения и облучения преобладает один из двух указанных эффектов.

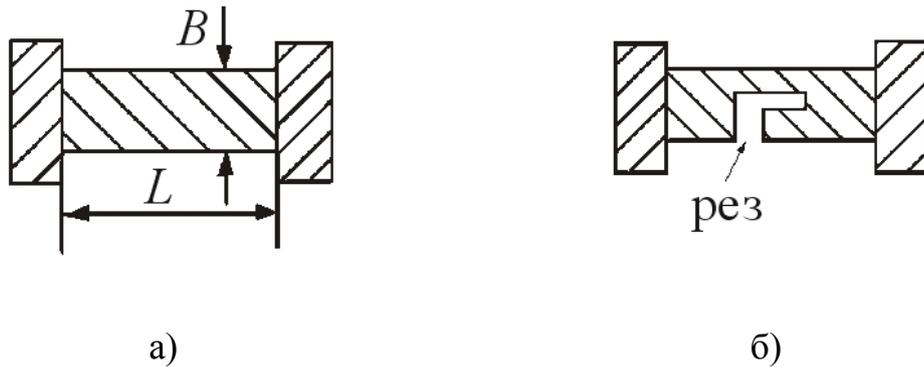


Рис. 6.1. Схема пленочного резистора до (а) и после (б) подгонки его сопротивления (L — рез)

Щелевые (гребенчатые) пленочные конденсаторы представляют собой систему металлических проводников (обкладок), выполненных в виде двух гребенок, вложенных одна в другую (рис. 6.2). Емкость конденсатора определяется выражением

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon N L / b,$$

где ε и ε_0 — эффективная диэлектрическая проницаемость среды и вакуума, N — число прорезей (зазоров) между проводниками обкладок, L и b — длина и ширина зазоров. Подгонка емкости конденсатора производится резом (испарением пленочного слоя) поперек обкладок, в результате чего количество действующих прорезей N уменьшается.

2. Размерная подстройка пленочных элементов (шкал, сеток, фотошаблонов, монолитных фильтров и т.п.) осуществляется испарением участков пленочного покрытия (устраняются дефекты типа «недотрав») и локальным лазерным переносом участков пленочного покрытия (устраняются дефекты типа «прокол»). Локальный лазерный перенос представляет собой перенесение участка пленки на обрабатываемую поверхность с донорной подложки, расположенной к ней вплотную, путем нагрева пленки лазерным излучением.

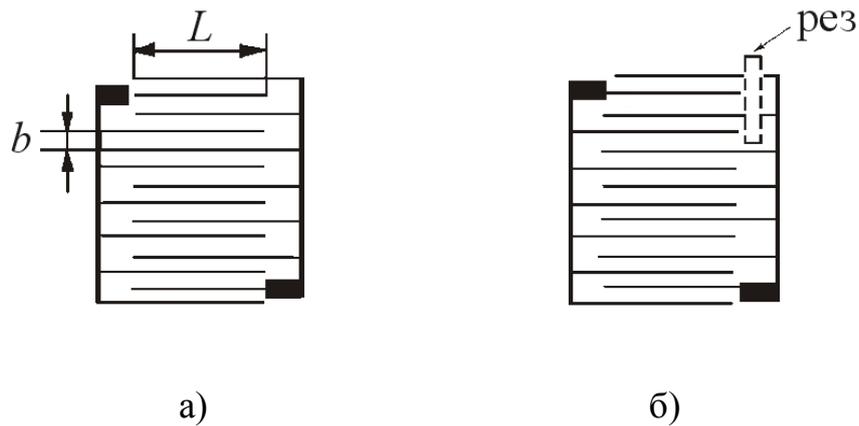


Рис. 6.2. Схема пленочного конденсатора до (а) и после (б) подгонки его емкости

3. Размерная обработка тонких пленок представляет собой формирование на подложке пленочной топологии. Она используется для изготовления пленочных микросхем, фотошаблонов, интегральных схем, оптических шкал, сеток, масок и т.п. При обработке используют различные фокусирующие и проекционные оптические схемы (см. раздел 2). Точность обработки преимущественно определяется термическими искажениями (величина которых оценивается размером прогретого слоя в пленке $\sqrt{a_1\tau}$) и оптическими искажениями (дифракционными, абберационными, а также связанными с неравномерностью распределения интенсивности излучения по сечению пучка и со сканированием пучка). Обработка обычно производится испарением пленочного покрытия в области, облученной в соответствии с заданным рисунком. При изготовлении пленочных элементов типа сеток или шкал, у которых площадь металлизированной (непрозрачной) поверхности мала по сравнению с площадью поверхности подложки, где пленка отсутствует, целесообразно использовать термохимический метод обработки. В этом случае облучаются те участки пленки, которые должны остаться на подложке, и плотность мощности излучения обеспечивает поверхностное окисление пленки без ее разрушения. Последующим травлением пленки в кислотном растворе удаляют необлученные участки пленки, а защищенные окислом участки остаются на подложке. Таким образом, на подложке создается «негативное» изображение.

4. Запись информации (цифровая и аналоговая) осуществляется формированием отверстий в пленке малых (субмикронных) размеров или образованием областей на поверхности пленки с измененными оптическими свойствами путем воздействия на нее пучка лазерного излучения.

Принципиальной характеристикой лазерной обработки пленок является размер минимального получаемого элемента, то есть разрешающая способность метода. При обработке пленок методом абляции (образования малых отверстий) размер минимально возможного элемента в расплавлен-

ном участке пленки r_* определяется его термодинамическими характеристиками – максимумом свободной энергии образовавшихся поверхностей (при попытке получить отверстие радиуса $r < r_*$ оно будет схлопываться сразу же после образования). При обработке пленки неразрушающим методом, например термохимическим, минимальный размер элемента зависит от размера фокального пятна и увеличения размера из-за теплопроводности.

Для обработки пленок обычно используются эксимерные лазеры, YAG:Nd, N₂ и Cu-лазеры, реже — лазеры на CO₂, стекле с неодимом и He-Ne лазеры. Для записи информации используют также полупроводниковые и He-Cd лазеры.

Примеры решения задач

Задача 6.1. Определить плотность мощности излучения, необходимую для расплавления пленки хрома толщиной 0.1 мкм на стеклянной подложке при воздействии N₂-лазера с длительностью импульса 10 нс.

Решение

Температура плавления в этом случае определяется формулой (6.1), но, т.к. длительность импульса невелика ($\tau = 10^{-8}$ с), то теплоотвод в подложку мал, и можно воспользоваться формулой (6.2):

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 \tau}{\rho_1 c_1 h} + T_i,$$

где индекс «1» относится к пленке; T_i — температура плавления материала пленки. Тогда выражение для плотности мощности имеет следующий вид:

$$q_0 = \frac{(T_1 - T_i) \rho_1 c_1 h}{A_1 \tau}.$$

Подставляя данные для пленки хрома ($\rho_1 = 7.19 \cdot 10^3$ кг/м³, $T_1 = 1877$ °С, $c_1 = 425$ Дж/(кг · К), $A_1 = 0.5$ — для N₂-лазера $\lambda = 0.34$ мкм), получаем $q_0 = 11.35 \cdot 10^6$ Вт/см².

Задача 6.2. Определить скорость сканирования при обработке металлической пленки на стекле излучением импульсного YAG:Nd лазера при $\tau = 10^{-8}$ с, если диаметр зоны воздействия $d_0 = 10$ мкм, погрешность ширины реза 0.1 мкм.

Решение

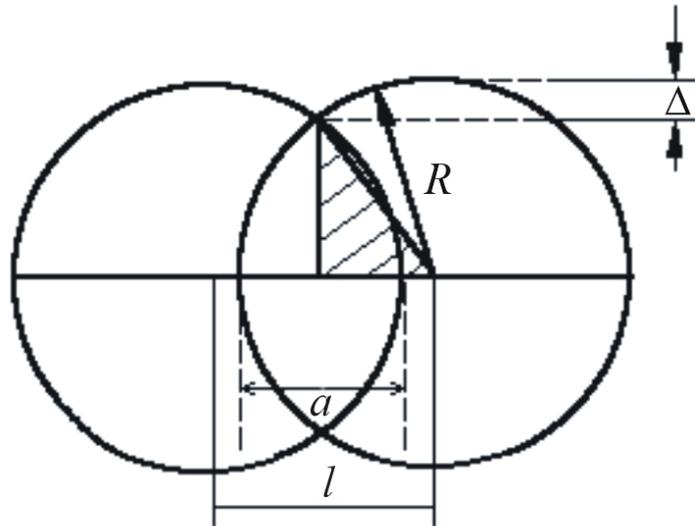


Рис. 6.3. Перемещение облученной зоны при сканировании пучка

Пусть за промежуток времени между двумя импульсами облученная зона переместилась на расстояние l . Из рисунка следует, что $\left(R - \frac{a}{2}\right)^2 = R^2 - (R - \Delta)^2$, откуда получаем: $\frac{a}{2R} = 1 - \sqrt{\frac{2\Delta}{R} - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^2}$.

Учитывая, что $d_0 = 2R = 10$ мкм, $\Delta = 0.1$ мкм, вычислим величину a :

$$a = 8 \text{ мкм.}$$

Скорость сканирования в этом случае выражается следующей формулой:

$$V_{\text{ск}} = \frac{d_0 - a}{\tau} = 198 \text{ м/с.}$$

ЗАДАЧИ

1. Выписать систему уравнений для лазерного нагрева пленки, нанесенной на поверхность подложки, с граничными условиями и объяснить допущения, которые приняты.

2. Во сколько раз уменьшится глубина прогретого слоя в подложке при лазерной обработке пленок при переходе от YAG:Nd лазера в режиме свободной генерации к N₂-лазеру?

3. Как изменится соотношение между энергиями, затрачиваемыми на испарение пленки и на нагрев подложки, по мере сокращения длительности импульса?

4. Определить энергетическую эффективность лазерной обработки пленки $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ (где Q_1 и Q_2 - количество тепла, полученное соответственно пленкой и подложкой при действии импульса лазерного излуче-

ния) в зависимости от теплофизических свойств материалов пленки и подложки, толщины пленки и длительности импульса излучения. Определить значение η для случаев обработки пленки меди на кварце и хрома на стекле импульсами излучения YAG:Nd-лазера в режиме свободной генерации и N₂-лазера.

5. Найти плотность мощности излучения, необходимую для расплавления пленки Cu толщиной 0.1 мкм на керамической подложке при сканировании в непрерывном режиме со скоростью 1 см/с пучком YAG:Nd-лазера при размере облученной области 15 мкм.

6. Оценить плотность мощности лазерного излучения q_0 и импульсную мощность лазера на молекулярном азоте, необходимые для окисления, плавления, испарения пленки Cr толщиной 0.1 мкм на стеклянной подложке при размере области облучения $d_1 = 10$ мкм и $d_2 = 100$ мкм, $\tau = 10^{-8}$ с.

7. Определить, достигается ли температура окисления пленки Cr толщиной 0.1 мкм, нанесенной на стеклянную подложку, при нагревании ее излучением лазера с длиной волны 1.06 мкм, длительностью импульса 10 нс и при сканировании в непрерывном режиме со скоростью 1 м/с. Размер облученной области 20 мкм. Плотность мощности излучения 10^7 Вт/см².

8. Оценить допустимое время воздействия τ при обработке металлических пленок, если требуемая погрешность обработки составляет $x_{\text{пр}} = 0.1$ мкм для непрерывной и импульсно-периодической лазерной обработки (диаметр пятна 50 мкм).

9. Определить скорость сканирования излучения непрерывного лазера, его плотность мощности и размеры светового пятна при обработке металлической пленки (испарение или окисление пленок Cr на стекле), необходимые для получения элементов шириной 0.1 мкм, 1 мкм, 10 мкм.

10. Рассчитать изменение сопротивления пленочного резистора R при лазерной подгонке в зависимости от ориентации и вида реза.

11. Определить модовый режим работы лазера и рассчитать оптическую систему, обеспечивающие формирование в режиме сканирования двух отдельных полос на поверхности тонкой пленки.

12. Определить плотность мощности излучения, необходимую для получения на обрабатываемой поверхности n полос в результате дифракции. Определить максимальную длительность импульса излучения, при которой количество полос не изменится из-за теплопроводности. Провести расчет для случая локального испарения пленки Cr на стеклянной подложке излучением N₂-лазера при $n = 1 \dots 5$.

13. Составить таблицы «Оптимальные импульсные лазеры для обработки пленок» и «Оптимальные непрерывные лазеры для обработки пленок» (указать скорость сканирования). Расставить их по порядку в соответ-

ствии с критериями точности и производительности, простоты и надежности.

14. Определить изменение свободной энергии E поверхностей системы пленка-подложка при лазерном формировании в пленке цилиндрического отверстия радиуса r . Определить разрешающую способность лазерной обработки пленок, соответствующую минимально возможному разме-

ру отверстия в пленке r_* из условия $\left. \frac{dE}{dr} \right|_{r=r_*} = 0$.

Список рекомендуемой литературы

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. – М.: Высшая школа, 1987.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989.
3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Изд. Болгарской АН, 1991.
4. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, 1986.
5. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1966.
6. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970.
7. Рэди Дж.Ф. Действие лазерного излучения. – М.: Мир, 1974.
8. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. – Л.: Лениздат, 1973.
9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов, т. 5. – М.: Высшая школа, 1988.
10. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. Основы лазерного термоупрочнения сплавов, т. 6. – М.: Высшая школа, 1988.
11. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975.
12. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Киикоина. – М.: Атомиздат, 1976.
13. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978.
14. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975.
15. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1988.
16. Кошкин Н.И. Элементарная физика: справочник. – М.: Наука, 1991.
17. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
18. Яковлев Е.Б. Лазерное оборудования, автоматизация и контроль технологических процессов. Конспект лекций. Часть I. Учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
19. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
20. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. Опорный конспект лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
21. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
22. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964.
23. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1977.

Приложение. Основные теплофизические и оптические параметры некоторых материалов [12–16]

Таблица 1. Параметры металлов

Металл	Параметры							
	плотность, ρ , 10^3 кг/м ³	теплопро- водность, k , Вт/м · К	теплоем- кость, c , Дж/кг · К	температура плавления, $T_{пл}$, °С	температура кипения, $T_{кип}$, °С	теплота плавления, $L_{пл}^m$, 10^6 Дж/кг	теплота ис- парения, L_u^m , 10^6 Дж/кг	коэффици- ент отраже- ния R , ($\lambda = 1.06$ мкм)
Al	2.7	233	920	660	2447	0.396	10.9	0.93
Au	19.3	300	128	1063	2700	0.065	1.65	0.98
Bi	9.7	8	122	271	1559	0.052	0.72	0.55
Cr	7.1	45	460	1903	2642	0.280	6.71	0.57
Cu	8.2	373	386	1083	2595	0.205	4.78	0.91
Fe	7.9	50	450	1535	2900	0.278	7.0	0.63
Ni	8.7	68	440	1453	2800	0.303	6.48	0.74
V	6.0	31	514	1730		0.344	8.98	0.55
W	19.3	190	105	3380	5530	0.191	4.35	0.68

Таблица 2. Ориентировочные значения параметров неметаллических материалов

Материал	Физические параметры					
	плотность, ρ , 10^3 кг/м ³	теплопро- водность, k , Вт/м · К	теплоемкость, c , 10^3 Дж/кг · К	температура раз- рушения, T_p , °С	показатель по- глощения, α , м ⁻¹	поглощательная способность, A
бумага	0.7	0.25	1.5	600	100	0.55
фанера	0.9	0.5	2.5	1800	100	0.8
керамика	1.5	0.8	0.6	1500	100	0.9
пластмасса	2.2	0.5		600	50	0.5
стекло	2.3	0.75	0.8	1700		0.9
резина	1.2	0.15	0.9	900		



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в медицину, биологию, экологию, промышленность, строительство, транспорт, связь, шоу–бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD–диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, и т.д., а в ближайшей перспективе — для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 3 разных периода:

Период I — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982–1988 гг.

Период III — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер–педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

- За период времени с 1988 по 2005 г. кафедра выпустила более 300 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;
- В настоящее время кафедра активно сотрудничает с университетами и институтами Германии (BIAS, FHS Emden), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

В последние годы по приглашению различных зарубежных организаций прочтен ряд курсов лекций по лазерным технологиям.

Основные научные направления кафедры

- 1). Лазерная обработка пленочных элементов.
- 2). Лазерное локальное осаждение тонких пленок.
- 3). Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.

4). Создание новых оптических материалов и элементов микро– и нанооптики на базе лазерных технологий.

5). Лазерные технологии элементов фотоники и волоконно–оптических устройств.

6). Создание теории субдлинноволновых источников излучения и разработки методов изготовления и контроля ближнепольных зондов.

7). Лазерное медицинское оборудование и инструмент.

8). Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.

9). Лазерный трехмерный синтез объемных моделей.

10). Физико–математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Е.Б.Яковлев, д.т.н., профессор Е.А.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.–м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.ф.–м.н., доцент А.Н.Проценко.

Вадим Павлович Вейко
Елена Аркадьевна Шахно

Сборник задач по лазерным технологиям

Компьютерный набор и верстка

Дизайн обложки

Редакционно–издательский отдел СПбГУ ИТМО

Зав. отделом

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано в печать

Отпечатано на ризографе

Тираж 200 экз.

С.М.Сарнаков

С.М.Сарнаков

Н.Ф.Гусарова

Заказ №