

Методическое дополнение по теме «Применение лазеров» для классов профильного обучения

Оглавление

- 1. Свойства лазерного луча**
- 2. Применение лазеров**
 - 2.1. Лазерный нагрев твердых материалов**
 - 2.2. Применение лазеров в промышленности**
 - 2.2.1. Лазерная сварка**
 - 2.2.2. Лазерное разделение материалов**
 - 2.2.3. Лазерная прошивка отверстий**
 - 2.2.4. Лазерная поверхностная термообработка**
 - 2.2.5. Лазерные дальномеры**
- 3. Голография**
- 4. Применение лазеров в военном деле**
- 5. Лазерная связь**
- 6. Применение лазеров в медицине**

Литература

1. Свойства лазерного луча

Уникальные возможности луча лазера можно понять при сравнении с другими источниками энергии. Основные характеристики лазерного луча: монохроматичность, когерентность, направленность, плотность мощности в сфокусированном пятне, диаметр сфокусированного пятна, длина волны или возможный диапазон волн. Благодаря таким характеристикам, можно говорить о многообразных возможностях лазерного луча для их практического применения. Рассмотрим некоторые свойства:

- высокая степень монохроматичности видна из выражения: $\Delta\lambda < 10^{-11}$ м;
- очень высокая плотность мощности: пусть энергия в импульсе 1Дж, а длительность импульса в режиме модулированной добротности 10^{-8} с. Диаметр сфокусированного пятна 100мкм. Тогда плотность мощности в пятне: $4 \cdot 10^{12}$ Вт/см². для сравнения плотность мощности солнечного света всего 0,13Вт/см² без фокусировки, или с такой же фокусировкой – 1,7 кВт/см²»
- временная и пространственная когерентность: если время импульса $t = 1$ нс, то длина когерентности $L_k = c t$ и $L_k = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 30$ см, а для импульса 10^{-8} с получим $L_k = 3$ м. Для дневного света $L_k = 0,1$ м;
- высокая направленность: угол расходимости газовых лазеров меньше 10 минут. Для сравнения луч мощного прожектора дал бы на поверхности Луны пятно диаметром 40000 км, лазерный луч дает пятно всего 3 км.
- к.п.д. для разных лазеров может быть в пределах от 0,1 до 95%: у гелий-неоновых 0,1%, для CO₂ – лазера – 40%, для полупроводниковых более 95%.
- яркость лазерного луча на много порядков выше солнечного луча;
- мощности лазеров составляет: от 1мВт (гелий-неоновый лазер) до нескольких сотен кВт (газодинамические CO₂ – лазеры);
- длительности импульсов: от 10^{-14} с (экцимерные лазеры) до 1нс (неодимовые лазеры);
- диапазон длин волн: от 30мкм (полупроводниковые лазеры) до 0,13мкм (экцимерные и полупроводниковые).

2. Применение лазеров в промышленности

Первые лазеры были разработаны в самом начале 60-х годов, и сразу их стали использовать в различных отраслях деятельности человека[27]. Внимание к ОКГ заключается в особых свойствах лазерного луча – высокая

степень монохроматичности, когерентности и направленности. Применение лазеров в промышленности основано на способности лазеров нагревать до высоких температур любые твердые материалы. Все материалы характеризуются индивидуальными оптическими и физико-химическими свойствами. Поэтому это следует учитывать при выборе типа лазерного устройства. Металлы хорошо поглощают излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн и, несколько, хуже дальнего ИК. Нагревание металлов происходит в результате электронного поглощения в приповерхностном слое. Нагревание неметаллических материалов носит решеточный характер посредством фононной теплопередачи, так как поглощение объемное. В результате высокой теплопроводности металлов тепло распространяется вглубь материала и расчет температуры можно приближенно проводить методом классической теории теплопроводности, например, решая дифференциальное уравнение Фурье с начальными и граничными условиями. Непростое решение уравнения Фурье дает лишь оценочные ориентиры при выборе параметров теплового лазерного источника. Окончательный выбор режимов работы конкретного излучателя даст эксперимент. Тем не менее, выкладки теории теплопроводности Фурье, позволяют получить в виде обобщений выводы для практического применения лазерной обработки материалов.

2.1..Лазерный нагрев твердых материалов

Ни один природный и даже искусственный источник излучения не дает таких плотностей мощности и энергии, как это реализовано в лазерах. Судите сами, сфокусированный солнечный луч дает плотность мощности всего $1,3 \text{ кВт/м}^2$. Электронный луч после фокусировки дает величину - 10^8 Вт/см^2 . Яркость, или светимость, лазерного луча в миллионы раз ярче солнечного света, а плотности мощности для непрерывных лазеров это - 10^{10} Вт/см^2 , а

для импульсных лазеров - 10^{18} Вт/см². При этом расходимость луча от прямолинейности составляет единицы миллирадиан, опять же, недостижимых в других видах излучения. В результате, лазерный луч может плавить, испарять, резать, сваривать, легировать, закалять и термоупрочнять инструменты, сверлить микроотверстия, производить подгонку параметров микроэлементов, стимулировать физико-химические процессы и реакции, разделять изотопы, наконец, участвовать в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза. Серьезным преимуществом метода лазерного напыления является размещение испарителя вне вакуумной камеры. В зависимости от поставленной задачи применяют режимы импульсного или непрерывного нагревания материалов. В настоящее время существует большая номенклатура типов лазерных систем. На практике чаще используются иттрий-алюминиевые ($\lambda = 1.06$ мкм) и газовые CO₂ – лазеры ($\lambda = 10,6$ мкм) в импульсном и непрерывном режимах. Лазеры с короткими импульсами менее 10 нс и острой фокусировкой дают плотность мощности излучения на мишени более 10^{10} Вт/см². Эксимерные газовые лазеры наиболее мощные в УФ диапазоне позволяют обрабатывать поверхности разной природы, испаряя верхний атомный и молекулярный слой в результате действия фотонного излучения и ударной волны, без глубинного нагревания материала. Длины волн эксимерных лазеров на основе димеров инертных газов и их галогенов может быть от 157 нм до 351 нм. Частоты от 1 до 300 Гц. Средняя мощность современных эксимерных лазеров до 400 Вт и длительность импульсов от 1 до 70 нс. Уменьшение отражения металлов добиваются искусственной шероховатостью или путем окисления поверхности мишени. Температура поверхности материала, на которую сфокусирован луч лазера, определяется плотностью мощности в пятне луча, физической характеристикой излучения и материала. Любой материал обладает своими физико-химическими свойствами, а частности,

коэффициентами отражения и поглощения для определенных длин волн света. Зная среднюю мощность излучения, нетрудно вычислить плотность мощности на мишени с учетом ее коэффициента отражения поверхности:

$$q = \frac{P_{\text{ср}} A}{S}, \text{ Вт/см}^2, \text{ где:}$$

$A = 1 - R$, коэффициент поглощения, а R - коэффициент отражения, S - площадь лазерного пятна. Оценить распределения температуры на поверхности мишени и в глубине можно с помощью задачи теплопроводности Фурье (1768 – 1830), которая решается в дифференциальных уравнениях, с учетом граничных и начальных условий конкретного случая. Решению тепловых задач посвящено много теоретических работ, например: А.В.Лыков, Г.Карслоу и Д.Егер[28,29] и др. Применительно к лазерной тематике, задачи теплопроводности рассмотрены в работах В.П.Вейко, Н.Н.Рыкалина[30 – 33] и многих др.. В твердых телах тепловая энергия передается от более нагретых участков к менее нагретым участкам путем теплопроводности, в результате коллективного колебания атомов решетки неметаллов и свободных электронов в металлах. Колебания атомов решетки создают волновой фронт, перемещающийся в направлении уменьшения температуры. Энергия колебаний отдельных атомов квантуется, как величина $h\nu$. и эту энергию можно назвать фононом, аналогично светового фотона. Условно можно говорить о фононном газе, вроде как о обычном газе, но в виде температурного фронта, перемещающегося в направлении еще не прогретого слоя. Но тогда, коэффициент теплопроводности для твердого тела можно оценить по формуле, по которой вычисляют этот коэффициент для газов. Так как атомная система квантовая, то расчет коэффициента теплопроводности достаточно сложная задача, и решается методами квантовой теории. Для лучшего понимания темы лазерного нагревания твердых материалов, получим упрощенный вывод уравнения Фурье. Вначале следует сделать допущения, без которых задача теплопроводности становится слишком сложной. Пусть обрабатываемый

материал однороден и неподвижен. Потерями на лучеиспускание можно пренебречь. Пространственно-временное состояние температурного поля в общем виде можно выразить функцией: $T = f(x, y, z, t)$. Само температурное поле может быть стационарным и нестационарным. Установившееся поле от времени не зависит и тогда: $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. В случае одномерного поля: $T = f(x, t)$ и $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Для двумерного поля: $T = f(x, y, t)$ и $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Внутри нагретого тела распределение температуры можно описать изотермическими поверхностями и изотермами. Изотермы нигде не пересекаются, иначе, в одной точке окажется две разные температуры, и не обрываются внутри тела. Наибольшее изменение температуры происходит вдоль нормали к изотермическим поверхностям. В теории поля такому изменению физической величины присвоено название градиент того или иного поля. В нашем случае. градиент температуры является вектором, направленный по нормали, а численная его величина равна производной от температуры в направлении нормали.

$\text{grad } T = \mathbf{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n}$, где \mathbf{n}_0 - единичный вектор, направленный в сторону возрастания температуры. Этот вектор можно разложить по координатным осям.

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n} \cos(\mathbf{n}, x) = \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n} \cos(\mathbf{n}, y) = \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n} \cos(\mathbf{n}, z) = \frac{\partial T}{\partial z}.$$

В декартовой системе координат проще записать: $\text{grad } T = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k}$.

Тепловой поток Q можно выразить через вектор плотности теплового потока \mathbf{q} , как скалярное произведение вектора \mathbf{q} и единичного вектора нормали \mathbf{n}_0 к элементарной площадке изотермической поверхности.

$Q = \int \mathbf{q} \mathbf{n}_0 dS = \int q_n ds$, где q_n - проекция вектора \mathbf{q} на направление нормали \mathbf{n}_0 . В данном направлении интенсивность теплового потока максимальная. Правда, для изотропных материалов теплопроводность не зависит от направления теплового потока. Вектор плотности теплового потока \mathbf{q} больше нуля, если угол между этим

вектором и нормалью острый. Через малый элемент изотермической поверхности ds за малый промежуток времени dt , тепловой поток dQ пропорционален температурному градиенту $\frac{\partial T}{\partial n}$.

$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS dt$, где λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$. Коэффициент можно получить экспериментально или теоретически. Для нескольких веществ значение λ при давлении воздуха одна атмосфера, а температура - 273 К: Медь – 395, алюминий - 207, сталь 20 – 55, водород – 0,172, гелий - 0,143, воздух - 0,0244, водяной пар (373к) – 0,0237 $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$. керамика – 0,8 (для 10,6 мкм). При повышении температуры теплопроводность металлов увеличивается, а для большинства жидкостей уменьшается.

В расчетах, особенно в лучевых способах нагрева вещества, удобно вместо теплового потока использовать плотность теплового потока: $q = dQ/ds dt$, $\text{Вт}/\text{м}^2$ Вектор \mathbf{q} направлен вдоль нормали к изотермической поверхности, т.е. в сторону уменьшения температуры:

$$\mathbf{q} = -\lambda \mathbf{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n}, \text{ или } \mathbf{q} = -\lambda \text{ grad } T, \text{ где } \mathbf{n}_0 - \text{единичный вектор нормали}$$

Выведем уравнение теплопроводности, исходя из закона Фурье. Пусть к малому объему ΔV подводится тепловая энергия от внешнего и внутреннего источников с виде непрерывной функции $q = q(x, y, z, t)$. Здесь q представляет собой объемную мощность источника тепла. Из теории поля: предел отношения вектора \mathbf{q} к величине объема тела V , когда объем стягивается в точку, пусть точка M , называется дивергенцией вектора \mathbf{q} , $\text{Дж}/\text{м}^3 \text{ с}$.

$$\text{div} \mathbf{q} = \lim_{V \rightarrow M} \frac{\int \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} ds}{V} \text{ при } V \rightarrow M. \text{ Тогда: } \Delta Q = -\text{div} \mathbf{q} \Delta V \Delta t, \text{ где } \text{div} \mathbf{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \text{ в}$$

декартовой системе координат. Внутреннюю энергию элемента ΔV , или энтальпию (h), в некоторый момент времени, можно определить из выражения:

$\rho \Delta V h(x, y, z, t)$, где ρ – плотность вещества, кг/м^3 . Через время Δt имеем: $\rho \Delta V h(x, y, z, t + \Delta t)$.

$\Delta Q_{\text{ист}} = \rho \Delta V [h(x, y, z, t + \Delta t) - h(x, y, z, t)] = \text{div} \mathbf{q} \Delta V \Delta t + q_v \Delta V \Delta t$, правую и левую части разделим на $\Delta V \Delta t$ и перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ изменения функции энтальпии:

$\lim \frac{h(x, y, z, t + \Delta t) - h(x, y, z, t)}{\Delta t} = \frac{\partial h}{\partial t}$ если $\Delta t \rightarrow 0$, т.к. $T = T(x, y, z, t)$ и $h = h(T, p)$ и $p = p(x, y, z, t)$ имеем: $\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t}$, для изобарического процесса $p = \text{Const}$ и

поэтому:

$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} = C_p \frac{\partial T}{\partial t}$, где C_p - теплоемкость при постоянном давлении. В итоге:

$\frac{\Delta Q_{\text{ист}}}{\Delta V \Delta t} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{q} + q_v$, но $\mathbf{q} = -\lambda \text{grad} T$, тогда закон Фурье имеет вид:

$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_v$. Если $\lambda = \text{Const}$, тогда $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \text{div}(\text{grad} T) + \frac{q_v}{\rho C_p}$. Введем

коэффициент температуропроводности через известные коэффициенты: $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, $\text{м}^2/\text{с}$. Значение коэффициента - a для: меди – $1,16 \cdot 10^{-4}$, для воздуха – $1,88 \cdot 10^{-5}$, для воды(373К) - $1,69 \cdot 10^{-7}$.

Теперь: $\frac{\partial T}{\partial t} = a[\text{div}(\text{grad} T) + q_v]$, или посредством оператора лапласиан в декартовой системе координат: $\frac{\partial T}{\partial t} = a(\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + \frac{q_v}{\rho C_p}$,

или $\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho C_p}$, полученное дифференциальное уравнение и есть уравнение Фурье.

Пусть объемная плотность мощности источника тепла внутри материала выражается функцией – $f(x, y, z, t)$, тогда уравнение теплопроводности: $\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{f(x, y, z, t)}{\rho C_p}$, где ρC_p – удельная объемная теплоемкость вещества мишени, T –

температура в произвольной точке мишени. Функцию $f(x, y, z, t)$ можно представить в форме:

$f(x, y, z, t) = - \frac{\partial q(x,y,z,t)}{\partial x} = \alpha(x)q(y, z, t)\exp\left(- \int_0^x \alpha(x)dx\right)$. где $\alpha(x)$ – коэффициент поглощения лазерного излучения веществом мишени, $q(y, z, t)$ – плотность теплового потока на поверхности мишени во времени. При этом, в соответствии с законом Бугера-Ламберта поглощение световой энергии происходит согласно выражению:

$q(x) = q_0(1 - R)\exp\left(- \int_0^x \alpha(x)dx\right)$, где R – коэффициент отражения поверхности мишени, который может измениться во времени, в результате воздействия высоких температур, q_0 - начальная плотность потока энергии лазерного луча, а $\alpha(x)$ – коэффициент поглощения света в поверхностном слое материала. В ряде случаев, коэффициент поглощения световой энергии не изменяется, например, при низких плотностях мощности излучения или для сверхкоротких импульсов. Тогда $\alpha(x) = \text{Const}$ и $q(x) = q_0(1 - R)\exp(- \alpha x)$. Выбор типа лазера, и соответственно длины волны, излучения зависит от поставленной задачи, Для обработки конкретных материалов - металлов или диэлектриков, следует учесть их оптические характеристики. Металлы хорошо поглощают излучение неодимовых лазеров с длиной волны 1,06 мкм, и хорошо отражают излучение CO₂ лазера с длиной волны 10,6 мкм. Большинство оптических диэлектриков прозрачны для $\lambda = 1,06$ мкм, и хорошо поглощают излучение на $\lambda = 10,6$ мкм. Широкозонные полупроводники, типа сульфид цинка, на длине волны 10,6 мкм ведут себя как диэлектрики. Характерная величина коэффициента поглощения металлов $\alpha = 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-1}$, а коэффициент отражения для полированных поверхностей может достигать до 98%. у диэлектриков на соответствующей длине волны коэффициент поглощения лазерного излучения составляет значение $10^4-10^5 \text{ см}^{-1}$ (размерности см^{-1} соответствует значение выражения $hc/\lambda = 19,86*10^{-24} \text{ Дж} = 1,24*10^{-4} \text{ эВ}$). Величину прогретой области лучом лазера у металлов и широкозонных

полупроводников можно грубо оценить как \sqrt{at} , где $a = \frac{\lambda}{\rho C p}$ –

температуропроводность. Для решения задачи теплопроводности Фурье: $\frac{\partial T}{\partial t} = a$

$\Delta T = \frac{f(x,y,z,t)}{\rho C p}$, необходимо добавить начальные и граничные условия. В условиях

быстропротекающих и высокотемпературных процессов теплообменом с внешней средой можно пренебречь. Для локального поверхностного нагрева

сфокусированным лазерным лучом начальное условие: $T(x, y, z, t) = T_n$ при $t = 0$.

Для поверхностного нагрева, когда тепловая энергия передается вглубь, то есть,

по оси Ox , граничное условие выглядит: $T(x, t) = 0$ при $x = 0$. Решение похожей по

смыслу задачи теплопроводности приведено у Карслоу и Егеря и Лыкова вместе с

таблицей функции ошибок Гаусса: $\Phi(x)$ и $i^n \Phi^*(x)$, в другой записи: $i^n \operatorname{erfc} x$

Функция $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\vartheta^2} d\vartheta$ при этом: $\Phi(0) = 0$, $\Phi(\infty) = 1$, $\Phi(-x) = -\Phi(x)$, $\Phi^*(0) = 1$

$\Phi^*(x) = 1 - \Phi(x)$ и $i^n \Phi^*(x) = \int_x^\infty i^{n-1} \Phi^*(\vartheta) d\vartheta$, где $n = 2, 3, 4, \dots$ В упрощенном

варианте, когда источником тепла является излучение лазера, решение: $T(x, t) =$

$$\frac{q}{2\pi\lambda} x$$

$$x \left\{ \exp(\alpha^2 at) \left[\exp(-\alpha x) \Phi^* \left(\alpha\sqrt{at} - \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + \exp(\alpha x) \Phi^* \left(\alpha\sqrt{at} + \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + \right] \right. \\ \left. + 4\alpha\sqrt{at} i \Phi^* \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - 2\exp(-\alpha x) \right\},$$

из оценочных расчетов Вейко В.П. для непрерывного и импульсного лазерного нагревания мишени, следует выражение:

$$T(x, t) = \frac{2q_0}{\lambda} (1 - R)\sqrt{at} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - i \operatorname{erfc} \frac{r_0}{2\sqrt{at}} \right) + T_n, \text{ для непрерывного излучения}$$

$\sqrt{at} \gg r_0$, а для импульсного излучения $r_0 \gg \sqrt{at}$. Так как функцию $\operatorname{erfc} x$ можно разложить в ряд:

$$\operatorname{erfc} x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^3} + \frac{1}{2^2 x^5} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 x^7} + \dots \right), \text{ то для непрерывного}$$

излучения получим температуру в пятне: $T = \frac{q_0(1-R)}{\lambda} + T_n$, для импульсного

излучения имеем: $T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_0(1-R)\sqrt{at}}{\lambda} + T_n$ где q_0 – плотность потока излучения в

лазерном пятне на мишени, R – коэффициент отражения поверхности мишени на определенной длине волны лазера, λ – коэффициент теплопроводности, a – коэффициент температуропроводности. Как уже отмечалось ранее, плотность мощности лазерного луча на поверхности мишени описывается законом Бугера-Ламберта: $q(x) = q_0(1 - R)\exp(-\alpha x)$, если коэффициент поглощения α изменяется незначительно. Для широкозонных диэлектриков температуру на поверхности можно оценить по формуле $T(x, t) = \frac{q\alpha t}{\rho c} \exp(-\alpha x)$, или $T(t) = \frac{q\alpha t}{\rho c} + T_H$, с учетом высокого значения коэффициента поглощения α и малого значения толщины прогреваемого слоя x . Для металлов оценка температуры дает: $T(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_0(1-R)\sqrt{at}}{k} + T_H$. Полученные упрощенные формулы для оценки температуры при

нагреванию лазерным лучом достаточно близки к результатам конкретных экспериментов.

2.2. Применение лазеров в промышленности

Практически одновременно с появлением квантовых генераторов в начале 60-х годов стали развиваться лазерные технологии обработки материалов. Рассказать о многочисленных технологиях в объеме данной работы нет возможности, но о наиболее востребованных промышленностью технологиях следует остановиться. Выбор типа лазера зависит от конкретной технологии. Все лазеры можно разделить по разным категориям: по мощности, длине волны, активной среде, способу накачки и охлаждению, импульсные и непрерывные, по расходимости луча, по типу резонаторов, одномодовые и многомодовые, перестраиваемые и специализированные для узкого применения. В различных серийных производствах широко используют профильную лазерную технику для технологических операций: сварка, сверление, разделение материалов, закалка инструментов и др. Воздействие лазерного луча на поверхность твердого

материала можно разделить на отдельные временные интервалы: поглощение поверхностное и объемное, нагревание без разрушения, плавление, испарение, остывание. О поглощении и нагревании твердых материалов говорилось выше. Следует лишь напомнить, что для металлов глубина проникновения света составляет доли микрона и ее можно грубо оценить из выражения \sqrt{at} , где a - коэффициент температуропроводности, t - длительность импульса. У металлов излучение поглощается свободными электронами, которые затем передают свою энергию решетке. Для металлов тепловой источник поверхностный, и ее температуру можно оценить через выражение: $T(x, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{k} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ при $x=0$ получим $T(0, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{k\sqrt{\pi}}$, где q - плотность мощности излучения. Неметаллы поглощают и передают энергию посредством колебаний атомов и молекул. В этом случае, оценка температуры будет: $T(x, t) = \frac{q\alpha t}{\rho c} e^{-\alpha x}$, при $x=0$ имеем $T(x, t) = \frac{q\alpha t}{\rho c}$, где α - коэффициент поглощения, c - теплоемкость. Экспериментально установлено, что для импульсного излучения границам мощностей соответствуют разные операции: 1) для поверхностной термообработки требуется плотность мощности около 10^4 Вт/см²; 2) для сварки требуется от 10^4 до $5 \cdot 10^5$ Вт/см²; 3) для газолазерной резки требуется от 10^6 до 10^7 Вт/см², далее начинается интенсивное испарение.

2.2.1. Лазерная сварка

Точечная и шовная лазерная сварка усовершенствовались по мере развития лазерных излучателей в плане увеличения мощности импульсного и непрерывного режимов. Для микросварки в электронике больших мощностей не требуется. Разработка мощных импульсных и непрерывных CO₂ - лазера и неодимового лазера ИАГ позволили внедрить в производство шовную сварку. Глубина проплавления шва выросла до нескольких миллиметров, даже для цветных металлов. Стало возможным сваривать разнородные металлы, в том

числе, с высоким коэффициентом отражения и теплопроводности. В производстве полупроводниковых приборов точечная лазерная сварка позволяет избежать перегрев и термические напряжения. При импульсной сварке в режиме свободной генерации и плотности мощности до $10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ более глубокое проплавление происходит в результате теплопроводности и наличия пиковой структуры лазерного луча. Обычно процесс сварки сопровождается испарением материала. При этом, на поверхности расплава наблюдается воронка, как следствие давления паров вещества. При плотности мощности в лазерном импульсе до $10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ в расплаве наблюдается узкий канал, который по окончании импульса затягивается. Технология лазерной сварки используется во многих отраслях деятельности человека, особенно там, где лазерной сварке нет замены, например, через стекло в вакууме.

2.2.2. Лазерное разделение материалов

Современный уровень лазерной техники и технологии позволяет разделять любые твердые материалы. Лазерная резка материалов имеет ряд преимуществ: малая зона термического влияния, узкий шов, практически отсутствие механических напряжений, возможность применения газов под давлением, отсутствие отходов материала, возможность автоматизированного раскроя по любому профилю, возможность дистанционного визуального контроля за ходом процесса лазерного разделения. Для раскроя листового материала используют газолазерную резку с использованием струи сжатого газа, который ускоряет резку, улучшает качество кромок, охлаждает кромки листа и убирает расплав из зоны резки. При раскрое титановых листов в зону резки подается кислород, и разделение происходит в результате горения титана. В качестве примеров, скорость резки непрерывным излучением CO_2 – лазера мощностью 900 Вт: нержавеющая сталь – 35 см/мин при толщине листа 9 мм, продувка сжатым воздухом; титан – 324 см/мин при продувке кислородом и толщине листа 0,5 мм;

сталь – 180 см/мин толщина листа – 2,2 мм, продувка воздухом. Разделения неметаллических материалов оптически непрозрачных для $\lambda = 10,6$ мкм применяют CO₂ – лазер мощностью 200 Вт: фанера – резки 22см/мин, толщина листа 6,5мм, продувка аргоном или азотом; асбоцемент – 2,5 см/мин, толщина – 0,5 мм, продувка воздухом; стекло – 10 см/мин, толщина – 4мм, продувка воздухом, мощность – 250 Вт; оргстекло – 10 см/мин, толщина 25,4 мм, мощность – 200 Вт, продувка кислородом. В промышленности выпускаются разнообразные типы профильных лазерных установок, предназначенных для конкретных технологических операций, однако, они могут быть использованы в других многочисленных приложениях В качестве примера приводятся характеристики двух лазерных установок для раскроя неметаллических материалов.

Лазерные установки раскроя материалов – ЛУРМ-1600 и ЛТН – 103 (твердотельный непрерывный):

- тип излучателя	CO ₂ (10,6мкм)	неодимовый ИАГ(1,06мкм)
- мощность излучения	800 Вт	250 ВТ
- габариты материала, см	160x150	140x200
- линейная скорость раскроя, м/мин	до 40	до 6
- точность реза	+/- 1мм	+/- 0,3 мм

Установки снабжены программным управлением.

При разделении полупроводниковых пластин из кремния и германия на отдельные чипы по устоявшейся технологии алмазным скрайбером наносят продольные царапины. После этого производят разламывание по линии канавки. Однако, при таком разделении, вдоль всей линии образуются заметные поперечные трещины, которые могут вызвать разлом не по линии скрайбирования. Кроме этого, алмазный скрайбер необходимо постоянно подправлять, поэтому на разделение полупроводниковой пластины диаметром

100 мм уходило несколько часов. Избежать подобный брак стало возможным при скрайбировании импульсным излучением газового или неодимового ИАГ лазеров, работающих в частотном режиме. Процесс скрайбирования заключается в том, что на поверхности пластины каждый импульс оставляет неглубокую лунку или термически напряженную точку. Затем производят разлом строго по линии скрайбирования. При такой технологии отсутствуют трещины и загрязнения уже готовых микросхем. Скорость скрайбирования резко увеличилась, а зона структурных изменений материала полупроводника составляет не более диаметра сфокусированного лазерного пятна. Несколько примеров лазерного скрайбирования материалов, применяемых в оптике и электронике: керамика на основе окиси алюминия(поликор): скорость скрайбирования – 80 см/мин, толщина 0,9 мм, мощность лазера 11 Вт; сапфир – 7 см/мин, толщина 1,3 мм, мощность – 13Вт; кристаллический кварц – скорость 6 см/мин, толщина – 0,3 мм, мощность – 3Вт; феррит – 120 см/мин, толщина – 0,3 мм, мощность – 3 Вт. Глубина лунок при скрайбировании – от 25 до 300 мкм.

2.2.3.Лазерная прошивка отверстий

Для сверления отверстий в прозрачных и непрозрачных материалах существует много вариантов. Среди них лазерный способ сверления отличается особенностями: возможность обрабатывать любые хрупкие и самые твердые материалы, прошивать материал одним или несколькими импульсами, размер отверстия можно регулировать фокусировкой и мощностью лазера, при последовательной прошивке отверстий вдоль произвольного контура форма отверстия может быть любой, технология прошивки лучом лазера легко программируется, термическая зона влияния не больше диаметра сфокусированного пятна. Процесс прошивки состоит из нескольких фаз: нагревание, плавление, испарение и газодинамическое действие. При этом расширение отверстия происходит за счет плавления, а углубление за счет

испарения. Для плавления металлов необходима плотность мощности 10^5 Вт/см², а для испарения на порядок и более выше. Отношение глубины к диаметру отверстия выражается величиной $\text{tg}\beta$, которая характеризует цилиндричность отверстия. Угол β зависит от светового конуса луча. Так как плотность мощности излучения в лазерном пятне изменяется относительно фокальной плоскости, то цилиндрические по форме отверстия сложно получить для больших толщин материала. Расположения фокальной плоскости относительно поверхности материала существенно влияет на профиль и глубину отверстия. Из опытов следует, что для получения более глубоких отверстий фокус должен находиться ниже поверхности материала. Выбором оптической системы можно получить вытянутую фокусировку в форме световой трубки. Это позволяет получать отверстия с минимальным значением $\text{tg}\beta$. В многоимпульсном режиме прошивки отверстий можно корректировать расположение фокуса внутри материала, улучшая профиль отверстия. Бывают случаи, когда в процессе одиночного импульса, образовавшееся сначала, отверстие вновь заплывается, в результате сил поверхностного натяжения. В этом случае, можно использовать продувку сжатым воздухом или азотом сверху, или пониженным давлением снизу материала. Качество прошивки можно улучшить если прошиваемый материал расположить между тонкими пластинками, то, как показал опыт, выходное отверстие будет без наплывов и более ровное. В качестве примеров для нескольких материалов режимы лазера и параметры: нержавеющая сталь – $E = 1,5$ Дж, $\tau = 10^{-3}$ с, $q = 2 \cdot 10^7$ Вт/см², $d = 100$ мкм, $h = 0,7$ мм, $n = 1$ имп; или $E = 0,2$ Дж, $\tau = 10^{-4}$ с, $q = 1,2 \cdot 10^8$ Вт/см², $d = 50$ мкм, $h = 1,2$ мм, $n = 12$ имп; керамика - $E = 1,4$ Дж, $\tau = 5 \cdot 10^{-4}$ с, $q = 4 \cdot 10^6$ Вт/см², $d = 200$ мкм, $h = 3,2$ мм, $n = 40$ имп; латунь – $0,05$ Дж, $\tau = 10^{-4}$ с, $q = 4 \cdot 10^7$ Вт/см², $d = 30$ мкм, $h = 0,1$ мм, $n = 2$ имп. Промышленная установка «Кристалл-б» для сверления, скрайбирования, фрезерования металлов, рубина, керамики, ситалла имеет технические характеристики: энергия импульса от 0,4 до 4 Дж, частота повторения от 0,5 до 20 имп, длительность импульса 0,2 мс,

диаметр отверстий от 0,1 до 0,6 мм, глубина отверстий до 3 мм, потребляемая мощность 4,5 кВт.

Лазерная поверхностная термообработка

Термическое воздействие на поверхность металлов может быть использовано для легирования, закалки, аморфизации, плакирования (оплавление поверхности), ударного упрочнения. Лазерное тепловое воздействие может быть импульсным и непрерывным. Следует заметить, что поверхностная обработка в процентном отношении востребована больше, чем другие виды лазерной обработки материалов. Легирование и плакирование заключается в плавлении необходимых для этого веществ, заранее нанесенных на поверхность металла. Для плакирования используют высокотемпературные вещества углерод, легированные стали, никель, которые плавятся и быстро остывают. Температура плавления легирующего вещества ниже температуры плавления основы. Для легирования используют легирующие добавки, что и для специальных сортов сталей и сплавов. Плакирование, легирование и аморфизация способствуют коррозионной стойкости и износостойкости. Одним из вариантов увеличения твердости и износостойкости инструментов и изделий является термическая закалка. При нагревании инструмента до температуры около $0,7T_{пл}$, а затем быстрого охлаждения кристаллическая структура металла из крупнозернистого строения превращается в мелкозернистое. То есть, при нагревании углеродистой стали происходит аустенизация кристаллической решетки. В процессе аустенизации зерна перлита и феррита насыщаются углеродом. Затем, при быстром охлаждении, аустенит превращается в мартенсит. К слову сказать, нагретую обычным способом деталь следует охлаждать не в холодной воде, а в кипятке, так как удельная теплота парообразования воды значительно выше ее удельной теплоемкости, и скорость охлаждения возрастает. Лазерный способ закалки является поверхностным. В результате этого, нагревание и охлаждение

происходит с большой скоростью. Серьезным преимуществом лазерной закалки является то, что эта операция является заключительной при изготовлении инструмента. Это значит, не требуется разогревать всю деталь, а, следовательно, не будет термических деформаций. После проведения предварительных экспериментов и проведения металлографических исследований шлифов зон термического влияния операцию лазерной закалки можно прогнозировать и автоматизировать. Уровень плотности мощности в лазерном пятне 10^5 Вт/см² достаточен для фазовых переходов в зоне разогрева, но не достаточен для плавления и испарения. В металлах излучение поглощается свободными электронами, которые затем передают энергию кристаллической решетке в результате электронной теплопроводности. Коэффициент поглощения излучения можно увеличить, уменьшая отражение в результате предварительного нанесения соответствующего покрытия. Для CO₂ – лазера это особенно важно, в виду того такие лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах, а его длина волны хорошо отражается большинством металлов. Поверхностная термообработка проводится при плотностях мощности до начала плавления металла в режимах свободной генерации, то есть при длительности импульсов до 10^{-3} с. При более коротких импульсах, например, в режиме модулированной добротности, глубина прогрева снижается, и большая часть энергии уходит на испарение верхнего тонкого слоя. Поверхность металлов, в большинстве случаев, отражает лазерное излучение до 95 и более процентов для инфракрасного диапазона длин волн. Поэтому для увеличения коэффициента поглощения применяют поверхностные поглощающие покрытия, которые наносят до лазерной обработки или создают искусственную шероховатость поверхности. Покрытия должны иметь высокий коэффициент поглощения, высокие температуры плавления и теплопроводности, хорошее сцепление с основой (адгезия) и не должны быть токсичными. Тонкие поглощающие покрытия подразделяют на: 1) химические (анодирование, воронение, сульфатирование,

фосфатирование; 2) лакокрасочные покрытия (краски, грунтовки, гуаши). Водорастворимые краски силикат натрия и алюмохромфосфат имеют коэффициент поглощения близкий к 90% и хорошо зарекомендовали в технологии лазерной термообработки. Эти краски наносят методом пульверизации и просушивают при нагревании за 10 минут. После лазерной термообработки эти краски хорошо смываются водой. Толщина лакокрасочного покрытия до 30 мкм; 3) предварительное напыление тонких поглощающих пленок вольфрама, кремния, титана и др. 4) покрытие на основе сажи имеют высокий коэффициент поглощения, но низкую адгезию, поэтому применяют не часто. Структура зоны термического влияния существенно зависит от параметров лазерного импульса в плане мощности, модовой структуры и размера пятна, длительности импульса и интервала между импульсами. Экспериментальные и расчетные данные позволяют скорректировать рабочие режимы лазерной термообработки. Решение дифференциального уравнения теплопроводности вместе с краевыми и начальными условиями задача сложная. Поэтому в подобных задачах приходится применять упрощения. Расчет глубины фазовых изменений носит оценочный характер. Основными параметрами в подобном расчете являются плотность мощности и критическая температура структурных превращений. λ_0

$$T(x,t) = \frac{q_0}{\lambda_0} \left(2 \sqrt{\frac{at}{\pi}} - x \right), \text{ где}$$

X – глубина прогревания, a – коэффициент температуропроводность, λ_0 – коэффициент теплопроводности τ

Для длительности импульса - t_0 глубина закалки оценивается как:

$$X_{\text{зак}} = 2 \sqrt{\frac{at_0}{\pi}} - T_{\text{зак}} \frac{q_0}{\lambda_0},$$

Для закалки непрерывным лазерным лучом деталь на координатном столе перемещают относительно луча, или луч сканируют по поверхности детали. В этом случае тепловая энергия распределяется более равномерно по всей линии действия луча. Оценку температуры закалки можно сделать из выражения:

$T_{\text{зак}} = \frac{q_0 r_0}{\lambda_0} \left(1 - \frac{v r_0}{2a}\right)$, где r_0 – радиус сфокусированного луча; v – скорость движения луча по поверхности детали

2.2.5. Лазерные дальномеры

Измерение координат движущихся объектов производят локаторной системой. Лазерная локация основана на том же принципе: объект облучают, а затем принимают отраженный сигнал. Лазерные локационные станции называют лидарами, и их назначение измерять дальность до объекта. Развитие лазерная локация получила после появления мощных импульсных лазеров. Локацию используют в метеорологии, геодезии, строительстве, в летательных аппаратах и др. Монохроматичность, высокая когерентность, узкая направленность в принципе недостижимы для СВЧ – локации. Кроме того, лидары имеют следующие преимущества по сравнению с радиолокаторами: большая точность определения координат цели, лучшее разрешение, доплеровский сдвиг частот определяется с большой точностью. Методы определения дальности могут быть: импульсный, интерференционный, фазовый и др. В импульсном методе измеряется время прохождения сигнала в обе стороны, используя калибровочные импульсы в количестве - n_k . Тогда: $\tau = n_k T = 2L/c$, где T – период калибровочного импульса. Погрешность зависит от точности измерения времени прохождения сигнала. В фазовом методе используется запаздывания фазы модулированного сигнала посланного к цели и обратно. В этом случае, расстояние до цели является функцией разности фаз длины волны

модуляции. $L = \frac{c}{2f} \left(m - \frac{\varphi}{2\pi} \right)$, где m - целое число, φ – изменяется в пределах $[0, 2\pi]$. Число m - определяется путем измерения дальности на нескольких частотах. В импульсных дальномерах используют неодимовые лазеры с длиной волны 1,06 мкм. Фазовые дальномеры используют газовые лазеры с $\lambda = 0,6328$ и 10,6 мкм полупроводниковые на арсениде галлия -0,85 мкм. Дальнодействие лазерных локаторов зависит от степени поглощения излучения молекулами воздуха на разной высоте и всех параметров лазерного луча. Лидар состоит из основных узлов: передатчик сигнала, приемник, система управления, система сопровождения цели.

3. Голография

Оптическая голография – метод получения объемного изображения объектов с помощью регистрации интерференционного снимка, как результат сложения объектной и опорной волн на фотобумаге. Голограмма совсем не похожа на обыкновенный фотоснимок, однако, на ней сохранилась полная информация об амплитуде и фазе световых волн, отраженных от объекта. На обычной же фотографии зафиксирована амплитудная составляющая из всей информации об объекте. Метод голографии, как способ сохранения полной информации об объекте, предложил Габор, решая проблемы разрешения микроскопов. В 1962г. Ю.Денисюк(ГОИ им.С.И.Вавилова) предложил использовать лазерное излучение для получения трехмерного изображения на фотобумаге с толстым слоем фотоэмульсии. Принцип голографии заключается в том, что объект освещается обычным светом и когерентной волной (объектная волна), а фотопластинка освещается когерентной (опорной волной) и объектной волной. Для опорной волны требуется одномодовый лазер с повышенной когерентностью. Лазерный луч расширяют и делят на две части с помощью зеркала. Одна часть направлена на объект и отраженный от

него сигнал попадает на фотопластинку (объектная волна), другая часть пучка направляется на фотопластинку (опорная волна). **Рис. 1** Схема записи и воспроизведения голограммы.

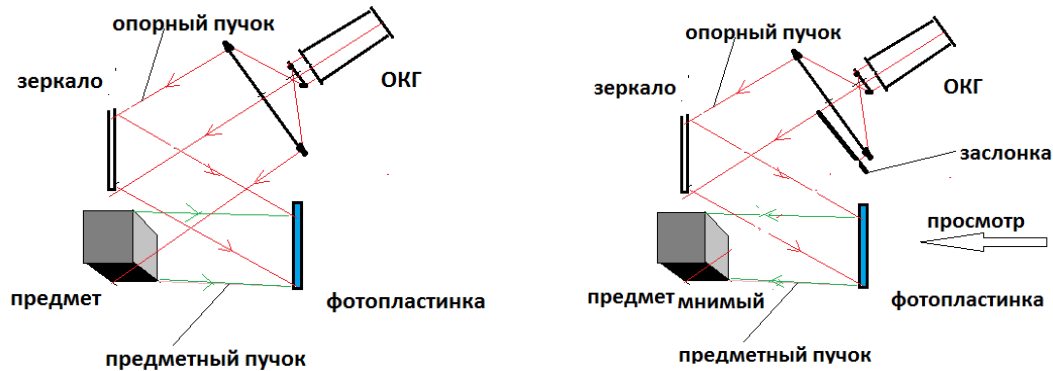


Рис. 1. Схема записи и воспроизведения голограммы

Так как объектная и опорная волны когерентны между собой, то на фотопластинке происходит интерференционное сложение волн. После обычного проявления фотопластинки получаем голограмму, на которой изображены непересекающиеся криволинейные линии (вроде топографических изоклин) различной интенсивности. При этом интерференционное изображение, не похожее на изображение обычного фотоснимка. Дело в том, что на обычном фотоснимке фиксируется только амплитудная составляющая отраженной волны от объекта, а на голограмме кодируется амплитудная и фазовая информация. В общем случае, для опорной волны голограмма представляет собой вариант дифракционной решетки, а поэтому восстанавливать информацию необходимо методами дифракции. Изображения восстанавливают с помощью того же лазера, а голограмму устанавливают в первоначальное положение. Часть, расширенного с помощью линзы, лазерного пучка закрывают диафрагмой (объект отсутствует), а другая часть направляется на голограмму. Дифракционное взаимодействие опорного луча и голограммы создает

несколько волн. Разность хода когерентных лучей, для условий максимума, выражается формулой:

$\Delta r = d \sin \varphi = k \lambda$, $k = 0, -1, +1$. При $k > 1$ дифракционные максимумы практически отсутствуют. В результате имеем три волны: $k = 0$ - волна направлена вдоль опорной волны; $k = 1$ - волна направлена по направлению предметной волны, $k = -1$ - этот максимум создает мнимое изображение, которое воспринимается посредством оптической системы глаза наблюдателя. Цветная голограмма получается при использовании в качестве опорной волны сразу трех цветных лазеров (красный, синий, зеленый). Каждый лазер ведет себя независимо от других, поэтому на голограмме имеем три пространственные интерференционные записи. Сложение трех цветных мнимых изображений в единую объемную картинку осуществляет глаз и мозг человека. Относительная плотность интерференционных линий и их контраст создают эффект объемности изображения при смене угла просмотра голограммы. На голограмме каждый участок содержит всю информацию об объекте. Это значит, если голограмму разделить на части, то каждая ее часть будет воспроизводить изображение объекта, но с меньшим разрешением, чем целая голограмма. Помимо изобразительной голографии для многих приложений стала развиваться цифровая голография. Компьютерная обработка голограмм позволяет промоделировать весь процесс от начала формирования интерференционного изображения до момента его восстановления. Цифровая голография появилась благодаря разработанному математическому аппарату, который позволяет описывать волновое поле объектной и опорной волн при формировании голограммы и при ее восстановлении. Этапы получения цифровой голограммы включают: ввод участка интерференционной картины в компьютер, вычисление фазовой и амплитудной спектральной информации отдельных участков голограммы с помощью интегральных преобразований, например, Фурье-

Френеля, выполнение подготовительных операций ввода информации на компьютер, подача голограммы на печать в увеличенном или уменьшенном масштабе. Голография и ее методы используются в многочисленных приложениях: получения художественных изображений, съемки подвижных объектов, для чтения печатных текстов, обработки аэрофотоснимков, микроскопии, создании безлинзовой оптики, создание фильмов и др.

4. Применение лазеров в военном деле

Все передовое, что появляется в науке, а затем в промышленности, используется для обороны страны, и, конечно, лазеры стали важным инструментом усиления обороноспособности. К основным направлениям военного применения лазеров можно отнести: системы противоракетной и космической обороны (ПРО и ПКО), лазерное оружие, лазерная связь, локация (наземная, подводная, космическая, бортовая), системы навигации и метеорология, медицина.

5. Лазерная связь

В узком смысле, под лазерной связью будем понимать кабельную связь посредством волоконно-оптической линии (ВОЛС). Передача цифровой информации в оптическом диапазоне длин волн имеет несомненные преимущества по сравнению с традиционными телефонными линиями связи. К этим преимуществам относят: широкую полосу пропускания (10^{14} Гц), скорость передачи информации (несколько терабит в сек.), помехозащищенность от действия внешних электромагнитных волн, низкий коэффициент затухания (0,2 – 0,3 Дб) на 100км без ретранслятора, электро- и пожаробезопасность, масса и стоимость многожильного ВОЛС на единицу длины ниже многожильного медного кабеля связи, так как световолокно очень хрупкое, то в кабель ВОЛС вставляют медные и стальные жилы. К недостаткам оптиковолоконной связи является высокая стоимость наладки и

оборудования, стоимость ремонта при обрывах в полевых условиях. Оптическая связь включает: передатчик (лазер или светодиод), модулятор сигнала (внутренний или внешний), приемник с демодулятором, а также: соединители, ответвители, аттенюаторы др.. Внутренний или прямой модулятор управляет силой тока, при этом, его быстродействие ограничено. Внешний модулятор управляет изменением параметров светового сигнала: амплитуда, мощность, фаза, поляризация и др.. и, в основном, используется для дальней связи. В качестве модуляторов применяют ячейку Керра, электрооптический и электроабсорбционный модуляторы, также модулятор Маха Цандера и др.. Сфера применения волоконной связи и световолокна, в частности, постоянно возрастает по мере развития лазерной техники и методов управления информационными потоками в световолокне.

6. Применение лазеров в медицине

Лазерный луч обладает массой достоинств, и, понятно, медики оценили их по достоинству. Монохроматичность, когерентность, высокая направленность и мощность, как в импульсном, так и в непрерывном режимах излучения. В настоящее время, промышленностью выпускается обширная номенклатура разного типа лазеров: по мощности, по длительности импульса, по длине волны ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазона. Применение остросфокусированного лазерного луча вместо хирургического скальпеля стало первым применением лазера в медицине. Стерильность, отсутствие механического давления, совершенно тонкий разрез, дистанционный контроль, работа в труднодоступных участках и на расстоянии. При этом, операции малокровные и безболезненные, заживление ран происходит значительно быстрее. Работая с лазерным скальпелем, хирург психологически и морально чувствует себя увереннее, особенно в сложных операциях. Лазер широко применяется в онкологических операциях по удалению злокачественных

опухолей и устранения меланомы на поверхности кожи. В офтамальтологии давно используются ультрафиолетовые эксимерные лазеры для лечения целой группы заболеваний глаз. Большие мощности и сверхкороткие импульсы позволяют получить плотности мощности в сфокусированном пятне до 10^{14} Вт/см², что позволяет испарять наружную ткань глаза, толщиной всего в несколько молекулярных слоев, не повреждая внутреннюю ткань. С помощью лазерного луча приваривают сетчатку глаза, исправляют роговицу, предотвращают катаракту и глаукому. Практика показала, что использование гелий-неонового лазера ускоряет сращивание переломов костей, устраняет последствия тропической язвы и ожогов. Для проведения сложных операций на внутренних органах часто используют волоконнооптические лазерные излучатели, в качестве скальпеля, осветителя или локального нагревателя.

Литература

1. Методика формирования научного мировоззрения учащихся при обучении физике. Шаронова Н.В., М.: МГУ, 1995,
2. Обучение физике в условиях профильной школы, Ельцов А.В. и др., Российский научный журнал, вып. 4, 2008, с. 88
4. Справочник по лазерам в 2-х т. М. Ф. Стельмах и др.; Под ред. А. М. Прохорова.— М.: Сов. радио, 1978.Т.2. —400 с
5. Некоторые аспекты физики и технологии получения тонких пленок в том числе с применением СО₂ – лазера., Поздняк Н.И., изд. СПбПГУ, 2015, 108
6. Лазеры в технологии/Под общ. Ред. Стельмаха М.Ф., М.: Энергия, 1973, 207 с.
7. Теория теплопроводности, Лыков А.В., М., Высшая школа, 1967
8. Лазерная обработка материалов. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н., М.,

9. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Ченвяков Г.Г., Яковлев В.Б., М., Физмат, 2008
10. Лазерная обработка неметаллических материалов, Григорьянц А.Г., Соколов А.А., М.: Высшая школа, 1988, 191 с.
11. Лазерная обработка, Вейко В.П., Либенсон М.Н., Л., Лениздат, 1973
12. Сборник задач по лазерным технологиям, Вейко В.П., Шахно Е.А., 3-е испр. СПбГУ ИТМО, 2007, с.67
13. Таблицы физических величин. Справочник под ред. Акад. Кикоина И.К., М., Атомиздат, 1976
14. Лазерное напыление многослойных покрытий, Поздняк Н.И., Мыльников В.С., Ж. ОМП, 1980, №2, с.53