

Э.И. Агеев, В.П. Вейко, С.Г. Горный,  
Г.В. Одинцова, А.А. Петров

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ЛАЗЕРНЫМ МИКРОТЕХНОЛОГИЯМ**

**Часть I**

**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**



Санкт-Петербург

2017  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Э.И. Агеев, В.П. Вейко, С.Г. Горный,  
Г.В. Одинцова, А.А. Петров

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ЛАЗЕРНЫМ МИКРОТЕХНОЛОГИЯМ**

**Часть I**

**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**Учебное пособие**

Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,  
д.т.н., проф. В.П. Вейко

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2017

Э.И. Агеев, В.П. Вейко, С.Г. Горный, Г.В. Одинцова, А.А. Петров. Лабораторный практикум по лазерным микротехнологиям. Часть I. Лазерная обработка конструкционных материалов. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 79 с.

Настоящее учебное пособие содержит описание 7 «физических» лабораторных работ, поставленных на базе учебно-лабораторного комплекса «Минимаркер-У» с импульсным волоконным лазером. Представленный цикл лабораторных работ является, по сути, первой попыткой создания материальной учебной лаборатории по лазерным технологиям, что стало возможным благодаря появлению в промышленном обиходе волоконных лазеров, обладающих, наряду с хорошими техническими характеристиками, высокой надежностью, сроком службы и удобством эксплуатации. Представленные работы посвящены основным операциям при лазерной обработке конструкционных материалов: резке, сверлению отверстий, маркировке, гравировке, гибке, очистке и управлению микрогеометрией поверхности.

Лабораторный практикум предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 12.04.05 “Лазерная техника и лазерные технологии”, 16.04.01 “Техническая физика”, 12.04.02 “Оптотехника”. Данное учебное пособие может быть полезно для средних специальных учебных заведений, для ФабЛабов и др. подобных центров, и может вызвать интерес на предприятиях, имеющих лазерные установки типа «Минимаркер» для расширения сферы их применения. Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники для студентов высших учебных заведений. студентов высших учебных заведений. Протокол № 6 от 24.10.2014 заседания Совета УМО.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Э.И. Агеев, В.П. Вейко, С.Г. Горный, Г.В. Одинцова, А.А. Петров, 2017

## Оглавление

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>5</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ЛАЗЕРНЫМ КОМПЛЕКСОМ «МИНИМАРКЕР-У» .....</b>	<b>16</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА МАТЕРИАЛОВ ОТ КРАСКИ .....</b>	<b>25</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА ТОНКОЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>34</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ЦВЕТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>43</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>52</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ГИБКА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН .....</b>	<b>58</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОБОРУДОВАНИЕ .....</b>	<b>63</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>76</b>

## Предисловие

Система высшего образования в нашей стране в настоящее время находится в процессе поиска новой, оптимальной образовательной модели. Необходимость смены образовательной модели кроется как в значительном ускорении научно-технического прогресса, когда знания могут устаревать до начала их использования, так и в смене экономической модели общества. Считается, что молодой специалист должен прийти на производство не только имеющим знания, но и способным их применить. С этой целью квалификационная модель образования: знания–умения–навыки, которая ранее являлась основой высшего образования, заменяется на компетентностную, куда входят не только профессиональные, но и социально-личностные, и другие компетенции, позволяющие выпускнику вуза сразу включиться в активную профессиональную деятельность. Система образования в этой модели должна быть нацелена на привитие указанных компетенций в процессе обучения. В этом смысле обучение через прохождение лабораторных работ, каждая из которых представляет из себя реальную технологическую задачу, является одним из способов достижений указанных целей. Решение реальных проектных задач на современном оборудовании одновременно с повышением профессионального уровня многократно увеличивает мотивацию студентов, прививает навыки организации творческой деятельности и изменяет уровень полученных знаний с их наличия на способность их использования, что, собственно, и является целью новой образовательной модели.

Авторы вполне отдадут себе отчет в том, что, несмотря на многократные проверки, в первое издание пособия 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 лабораторных работ. Они особенно надеются, что атмосфера творчества и сотворчества, возникшая при разработке лабораторных работ, частично присутствует в тексте и будет способствовать предложению преподавателями, сотрудниками и студентами идей и тем новых лабораторных работ.

Все замечания и предложения можно посылать на имя авторов в Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49, Университет ИТМО или по электронной почте [gvodintsova@corp.ifmo.ru](mailto:gvodintsova@corp.ifmo.ru).

## **Лабораторная работа №1. Оценка степени опасности лазерного излучения**

### **1. Цель работы**

Определение класса и измерение уровня опасности лазерного излучения. Получение навыков выбора защитных средств.

### **2. Оборудование**

«Минимаркер-У» (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

### **3. Задачи**

- Изучение теоретических основ безопасности при работе с лазерным оборудованием.
- Расчет предельно допустимого уровня лазерного излучения.
- Определение границы лазерно-опасной зоны.
- Оценка лазерной безопасности и определение параметров защитных средств.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

#### **Воздействие лазерного излучения на человека**

При эксплуатации лазерных установок обслуживающий персонал может подвергаться воздействию большого числа опасных и вредных факторов. Все эти факторы подразделяются на основные и сопутствующие. К основным относятся собственно прямое, отраженное и рассеянное лазерное излучение. К сопутствующим – факторы, которые возникают на лазерных участках при эксплуатации лазеров и другого оборудования, такие как высокое электрическое напряжение, шум, вибрации, электромагнитные и ионизирующие излучения, а также наличие вредных веществ. Под влиянием этих факторов может происходить нарушение жизнедеятельности как отдельных органов человека, так и всего организма в целом.

Наибольшую опасность лазерное излучение представляет для органов зрения. На всех длинах волн оптического диапазона лазерное излучение свободно проникает внутрь глаза. Прежде чем достигнуть сетчатки глаза, излучение проходит последовательно

через несколько преломляющих сред: роговицу, хрусталик и, наконец, стекловидное тело. При рассмотрении воздействия лазерного излучения на орган зрения необходимо отдельно разбирать действие излучения в интервале длин волн 0,4–1,4 мкм и вне этого интервала, где оптические среды глаза являются непрозрачными. Облученность, создаваемая лазерным излучением на сетчатке, вследствие фокусирующего действия хрусталика (который имеет вид двояковыпуклой линзы), может быть в десятки и сотни тысяч раз выше, нежели облученность, создаваемая на роговице и других частях глаза. Как показывает анализ, ее величина будет определяться мощностью лазерного излучения, его апертурой и углом расходимости, а также диаметром зрачка. Длительное облучение сетчатки в видимом диапазоне на уровнях порядка порога ожога может вызывать в ней необратимые изменения. Повреждение сетчатки обязательно сопровождается нарушением функции зрения. Клетки сетчатки, как и клетки центральной нервной системы, после повреждения не восстанавливаются.

Первой линией защиты других органов человека от повреждения лазерным излучением является кожа, которая представляет собой важный физиологически активный орган, обширные повреждения которого могут привести к гибели организма. Степень повреждения кожи зависит от поглощенной энергии, а сами повреждения могут быть различными: от легкого покраснения (эритемы) до обугливания. Минимальное повреждение кожи образуется при воздействии лазерного излучения с энергетической экспозицией 0,1–1 Дж/см<sup>2</sup> (в зависимости от степени пигментации кожи и длительности воздействия). Наибольшее биологическое воздействие на кожу оказывает лазерное излучение с длинами волн 0,28–0,32 мкм.

Лазерное излучение дальней инфракрасной области спектра способно проникать через ткани тела и взаимодействовать с биологическими структурами на значительной глубине, поражая внутренние органы. Наибольшую опасность для внутренних органов представляет сфокусированное лазерное излучение. Однако следует учитывать, что и не сфокусированное излучение может фокусироваться в глубине тела человека. Кроме того, следует учитывать воздействие ударной волны, возникающей при работе мощных лазеров в импульсном режиме. Степень повреждения в значительной степени определяется энергетической облученностью и цветом окраски органа. Печень является одним из наиболее уязвимых органов.

### Расчёт предельно допустимых уровней лазерного излучения при воздействии на глаза и кожу

В соответствии с СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» устанавливаются предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения в диапазоне длин волн  $180-10^5$  нм при различных условиях воздействия на глаза и кожу человека. Время и частота воздействия определяют количество энергии, переданной биоткани. Поэтому ПДУ лазерного излучения устанавливаются по-разному для различных условий облучения:

- однократное либо хроническое воздействие;
- непрерывный либо импульсный режим работы лазера.

При нормировании ПДУ лазерного излучения также играют роль параметры источника излучения:

- коллимированное (параллельный пучок) или неколлимированное (рассеяное) излучение;
- точечный или протяженный источник.

Излучение различных диапазонов по-разному взаимодействует с биотканью. При оценке ПДУ рассматривают три диапазона длин волн лазерного излучения:

- диапазон I:  $180 < \lambda < 380$  нм;
- диапазон II:  $380 < \lambda < 1400$  нм;
- диапазон III:  $1400 < \lambda < 10^5$  нм.

ПДУ лазерного излучения определяется для таких типов биоткани, как глаза и кожа.

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются энергетическая экспозиция  $H$  и энергетическая освещенность  $E$ , а также связанные с ними энергия  $W$  и мощность  $P$  излучения. ПДУ этих параметров ( $H_{пду}$ ,  $E_{пду}$ ,  $W_{пду}$ ,  $P_{пду}$ ) могут использоваться независимо в соответствии с решаемой задачей. Данные энергетические параметры связаны соотношениями:

$$H = E * t; H = \frac{W}{\pi r^2}; E = \frac{P}{\pi r^2} \quad (1.1)$$

В случае неравномерного распределения интенсивности по случайному закону производится усреднение ПДУ этих параметров по ограничивающей апертуре. Апертура в данном случае это отверстие в защитном корпусе лазера или диафрагма, через которую проходит лазерное излучение. При воздействии лазерного излучения на кожу усреднение производится по ограничивающей апертуре



диаметром  $d_a = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м. При воздействии лазерного излучения на глаза в диапазонах I и III усреднение производится также по ограничивающей апертуре диаметром  $d_a = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м, а в диапазоне II – по апертуре диаметром  $d_a = 7 \cdot 10^{-3}$  м. Ограничимся в данном пособии определением условий безопасности для гауссовых и равномерных пучков.

Если на коже или роговице глаза пучок излучения имеет размер сечения, который равен или меньше диаметра ограничивающей апертуры  $d_a$ , то максимальное значение энергетической освещенности  $E$  и энергетической экспозиции  $H$  не должно превышать значений  $E_{пду}$  и  $H_{пду}$  для уже описанных случаев.

Если имеет место одновременное воздействие лазерного излучения нескольких различных источников, то ПДУ для каждого диапазона и условий облучения устанавливаются независимо.

### **Предельно допустимые уровни в диапазоне 380 – 1400 нм**

#### **ПДУ при однократном облучении глаз**

Соотношения для определения  $W_{пду}$  и  $P_{пду}$  коллимированного излучения при воздействии длительностью менее 1 с на глаза в диапазоне II ( $380 < \lambda \leq 1400$  нм) приведены соответственно в таблице 1.1 и 1.2.

ПДУ при воздействии на глаза серий импульсов коллимированного излучения в спектральном диапазоне II ( $380 < \lambda \leq 1400$  нм) установлены для случаев, когда длительность отдельного импульса в серии  $\tau_u$  не превышает 0,25 с, а частота следования импульсов  $\nu$  в серии больше 0,005 Гц (интервал между отдельными импульсами в серии меньше 200 с).

Если  $\nu > 0,005$  Гц, значение предельно допустимой энергии  $W_{пду}^c(t)$  серии импульсов излучения длительностью  $t$  при воздействии на глаза равно меньшему из двух значений энергии  $W_1$  и  $W_2$ , которые определяются формулами:

$$W_1 = W_{пду}^c(t); W_2 = W_{пду}(\tau_u) \sqrt[3]{N/\xi} \quad (1.2),$$

где  $W_{пду}(t)$  и  $W_{пду}(\tau_u)$  – предельно допустимые значения энергий одиночных импульсов длительностью  $t$  и  $\tau_u$ , соответственно;  $N$  – количество импульсов в серии;  $\xi$  – определяется отношением максимальной энергии отдельного импульса в рассматриваемой серии к среднему значению:

$$\xi = \frac{W^c(\tau_u)_{max}}{\bar{W}^c(\tau_u)} \quad (1.3).$$

В тех случаях, когда  $\xi$  неизвестно, следует считать  $\xi = 1$ .

Предельно допустимое среднее значение энергии одного импульса из серии  $N$  импульсов будет равно:

$$\bar{W}_{пду}^c(\tau_u) = \frac{W_{пду}^c(t)}{N} \quad (1.4).$$

Когда длительность серии импульсов превышает 1 с, целесообразно определять значение предельно допустимой средней мощности  $\bar{P}_{пду}^c(t)$ , которая равна меньшему из двух значений мощности  $P_1$  и  $P_2$ , определяемых формулами:

$$P_1 = P_{пду}(t); P_2 = \frac{W_{пду}(\tau_u)}{t} \sqrt[3]{N/\xi} \quad (1.5),$$

где  $P_{пду}(t)$  – значение предельно допустимой мощности импульса длительностью  $t$  для коллимированного излучения.

### **ПДУ при хроническом воздействии на глаза**

Для определения предельно допустимых значений  $W_{пду}$  и  $P_{пду}$  коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II при хроническом воздействии на глаза необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

### **ПДУ при однократном облучении кожи**

Соотношения для определения значений  $H_{пду}$  и  $E_{пду}$ , а также  $W_{пду}$  и  $P_{пду}$  при однократном воздействии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II приведены в таблице 1.3.

### **ПДУ при хроническом облучении кожи**

Для определения предельно допустимых значений  $H_{пду}$  и  $E_{пду}$ ,  $W_{пду}$  и  $P_{пду}$  при хроническом воздействии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

Таблица 1.1.  
Соотношения для определения  $W_{ПДУ}$  лазерного излучения при однократном воздействии на глаза в диапазоне II

Спектральный интервал $\lambda$ , нм	Длительность воздействия $t$ , с	$W_{ПДУ}$ , Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2.3 * 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.3 * 10^{-11} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$8 * 10^{-8}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$5.9 * 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6.5 * 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6.5 * 10^{-11} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$1.6 * 10^{-7}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$1.2 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2.5 * 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.5 * 10^{-10} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$4 * 10^{-7}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$3 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$10^{-6}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$7.4 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

Таблица 1.2.  
Соотношения для определения  $P_{ПДУ}$  лазерного излучения при однократном воздействии на глаза в диапазоне II

Спектральный интервал $\lambda$ , нм	Длительность воздействия $t$ , с	$P_{ПДУ}$ , Вт
$380 < \lambda \leq 500$	$1 < t \leq 5 * 10^{-2}$	$5.9 * 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$5 * 10^{-2} < t \leq 10^4$	$3.7 * 10^{-3} / t$
	$t > 10^4$	$3.7 * 10^{-7}$
$500 < \lambda \leq 600$	$1 < t \leq 2.2 * 10^3$	$5.9 * 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$2.2 * 10^3 < t \leq 10^4$	$10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	$10^{-6}$
$600 < \lambda \leq 700$	$1 < t \leq 2.2 * 10^3$	$1.2 * 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$2.2 * 10^3 < t \leq 10^4$	$2 * 10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	$2 * 10^{-6}$
$700 < \lambda \leq 750$	$1 < t \leq 10^4$	$1.2 * 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$5.5 * 10^{-6}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$1 < t \leq 10^4$	$3 * 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$1.4 * 10^{-5}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$1 < t \leq 10^4$	$7.4 * 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$3.5 * 10^{-5}$

Таблица 1.3.

Соотношения для определения ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии на кожу в спектральном диапазоне II

Спектральный интервал $\lambda$ , нм	Длительность воздействия $t$ , с	$H_{ПДУ}$ , Дж*м <sup>2</sup> ; $E_{ПДУ}$ , Вт*м <sup>2</sup>
380 < $\lambda$ ≤ 500	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{ПДУ} = 2.5 * 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{ПДУ} = 50 * 10^3 \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{ПДУ} = 5 * 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ПДУ} = 5 * 10^2$
500 < $\lambda$ ≤ 900	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{ПДУ} = 7 * 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 1$	$E_{ПДУ} = 5 * 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ПДУ} = 5 * 10^2$
900 < $\lambda$ ≤ 1400	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{ПДУ} = 2 * 10^4 \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{ПДУ} = 2 * 10^4 \sqrt[5]{t^4}$
	$t > 10^2$	$E_{ПДУ} = 5 * 10^2$
$W_{ПДУ} = H_{ПДУ} * 10^{-6}; P_{ПДУ} = E_{ПДУ} * 10^{-6}$		

### Границы лазерно-опасной зоны

Лазерно-опасная зона (ЛОЗ) - это часть пространства, в пределах которого уровень лазерного излучения превышает предельно допустимый. Значение уровней лазерного облучения и положение границ ЛОЗ можно установить измерением уровней излучения в пространстве, окружающем лазерную установку, или расчётным путем. Предварительный расчёт также полезен при экспериментальном определении границ ЛОЗ, что позволяет уменьшить количество измерений. ЛОЗ могут создаваться прямым, отражённым (зеркально или диффузно) излучением от различных поверхностей и материалов, а также излучением, рассеянным в атмосфере. Схематичный вид границ ЛОЗ для гауссова и равномерного пучков показан на рис. 1.1.

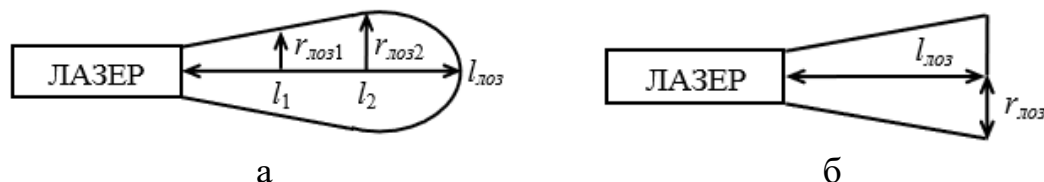


Рис. 1.1 Характер лазерно-опасной зоны:

а) гауссов пучок; б) пучок с равномерным распределением интенсивности

Энергетическая освещенность при облучении гауссовым пучком определяется по формуле (1.6):

$$E = -\frac{2P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2h^2}{r^2}\right) \quad (1.6),$$

где  $E$  – энергетическая освещенность в данной точке сечения пучка, Вт/м<sup>2</sup>;  $P$  – мощность непрерывного излучения, Вт;  $r$  – радиус сечения пучка при ограничении расходимости по уровню  $1/e^2$ , м;  $h$  – расстояние от оси пучка до данной точки, м.

С учётом ослабления в атмосфере и параметров оптической системы прибора наблюдения формула для расчёта энергетической освещенности приобретёт следующий вид:

$$E = -\frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2h^2}{r^2}\right) \quad (1.7),$$

где  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $\tau_{np}$  – коэффициент пропускания телескопической системы прибора наблюдения;  $\Gamma_{np}$  – увеличение этой системы. Для невооруженного глаза;  $\tau_{np} = 1$  и  $\Gamma_{np} = 1$ ,  $h$  – расстояние от оси пучка до данной точки, м.

Границы ЛОЗ определяются из условия:  $E = E_{ПДУ}$ . С учетом этого условия из выражения (1.8) определяется радиус лазерно-опасной зоны  $r_{лоз}$  по следующей формуле:

$$r_{лоз} = \frac{r}{\sqrt{2}} \sqrt{\ln \frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2 E_{ПДУ}}} \quad (1.8).$$

Можно сказать, что  $r_{лоз}$  это расстояние от оси пучка, на котором создается энергетическая освещенность, равная предельно допустимому уровню.

Радиус сечения пучка  $r$  пучка по мере распространения от выходного отверстия лазера изменяется согласно следующей формуле:

$$r = 0,5\theta\sqrt{d_n^2 + L^2} \quad (1.9),$$

где  $\theta$  – расходимость пучка при ограничении расходимости по уровню  $1/e^2$ , рад;  $2d_n$  – конфокальный параметр, м;  $L$  – расстояние от

мнимой перетяжки внутри резонатора лазера до данного сечения пучка, которое для простоты будем считать, как расстояние от центра излучателя до указанного сечения пучка, м.

### **Средства защиты от лазерного излучения**

Средства защиты должны снижать уровни лазерного излучения, действующего на человека, до величин ниже ПДУ. Средства защиты от лазерного излучения подразделяются на коллективные и индивидуальные. Выбор средств защиты в каждом конкретном случае осуществляется с учетом требований безопасности для данного процесса. Средства индивидуальной защиты от лазерного излучения включают в себя средства защиты глаз и лица (защитные очки, щитки, насадки), средства защиты рук, специальную одежду.

При выборе средств индивидуальной защиты необходимо учитывать:

- рабочую длину волны излучения;
- оптическую плотность светофильтра.

Оптическая плотность светофильтров, применяемых в защитных очках, щитках и насадках, для диапазонов лазерного излучения II должна удовлетворять требованиям:

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{W_{max}}{W_{пду}} \text{ или } D_{\lambda} \geq \lg \frac{P_{max}}{P_{пду}} \quad (1.10),$$

где  $H_{max}$  и  $E_{max}$ ,  $W_{max}$  и  $P_{max}$  – максимальные значения энергетических параметров лазерного излучения в рабочей зоне,  $H_{пду}$  и  $E_{пду}$ ,  $W_{пду}$  и  $P_{пду}$  – предельно допустимые уровни энергетических параметров при хроническом облучении.

### **5. Порядок выполнения работы**

- 1) Изучить теоретические основы оценки степени опасности лазерного излучения.
- 2) Оценить те характеристики воздействия лазерного излучения, с учётом которых определяются ПДУ нормируемых параметров:
  - а) действие лазерного излучения: однократное (время воздействия  $t < 3 \cdot 10^4$  с) либо хроническое ( $t > 3 \cdot 10^4$  с);
  - б) режим работы лазера: непрерывный (одионый импульс длительностью более  $10^{-6}$  с), либо импульсный (серия импульсов);

в) диапазон, к которому относится длина волны  $\lambda$  лазерного излучения:

-  $180 < \lambda \leq 380$  нм – диапазон I.

-  $380 < \lambda \leq 1400$  нм – диапазон II.

-  $1400 < \lambda \leq 10^5$  нм – диапазон III.

3) Определить ПДУ ( $W_{ПДУ}$  и  $P_{ПДУ}$ ) лазерного излучения при однократном воздействии на глаза (параметры лазерной установки приведены в Приложении А), используя Таблицы 1.1 – 1.2.

4) Определить ПДУ ( $W_{ПДУ}$  и  $P_{ПДУ}$ ) лазерного излучения при однократном воздействии на кожу (параметры лазерной установки приведены в Приложении А), используя Таблицу 1.3

5) Определить границы лазерно-опасной зоны ( $E$ ,  $r_{\text{лоз}}$ ,  $L$ ), используя формулы 1.7-1.9. Параметры атмосферы и условий наблюдения лазерного пучка:  $\tau_{a1} = \tau_{a2} = 1$ ;  $\tau_{on} = 1$ ;  $\tau_{np} = 1$ ;  $\Gamma_{\text{пр}} = 1$ ;  $\tau_{oc} = 1$ .

6) Определить величину минимально необходимой оптической плотности  $D_{\lambda}$  защитных светофильтров (формула 1.10).

## 6. Содержание отчёта

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Расчет ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии на глаза.
- Расчет ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии на кожу.
- Расчет границы лазерно-опасной зоны.
- Выводы.

## 7. Контрольные вопросы

- 1) Как рассчитать предельно допустимый уровень лазерного излучения при воздействии на глаза и кожу?
- 2) Какие параметры лазерного излучения называют нормируемыми?
- 3) Как рассчитать границы лазерно-опасной зоны?
- 4) Как выбрать средства защиты от лазерного излучения?

## **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Новиков Б.Ю., Колосов Ю.В. Проектирование и расчет систем и средств обеспечения безопасности труда. Учебное пособие / Под ред. Вейко В.П. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 74 с.
- 2) Безопасность жизнедеятельности. Лабораторный практикум / С.В. Ефремов и др. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. – 129 с.
- 3) Колосов Ю.В., Барановский В.В., Марковкина Н.Н. Безопасность жизнедеятельности. Методические указания по выполнению лабораторных работ. Учебное пособие. – СПб, СПбГУИТМО, 2004. – 67 с.



## **Лабораторная работа №2. Ознакомление с лазерным комплексом «Минимаркер-У»**

### **1. Цель работы**

Ознакомление с устройством и работой лазерного комплекса «Минимаркер-У» и определение его основных характеристик

### **2. Оборудование и материалы для исследований**

«Минимаркер-У», измеритель мощности, микроскоп, оптический фильтр, визуализатор лазерного излучения (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы нержавеющей стали.

### **3. Задачи**

- Изучение конструкции и принципов работы лазерного комплекса «Минимаркер-У».
- Измерение средней мощности лазерного излучения.
- Определение фокусного расстояния объектива.
- Определение формы профиля пучка лазерного излучения.
- Определение коэффициента перекрытия при различных режимах работы лазерного комплекса.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

#### **Параметры лазерного воздействия**

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.

Мощность ( $P$ ). 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 ( $P_{имп}$ ) и среднюю мощность ( $P_{ср}$ ), которая зависит от длительности и частоты следования импульсов:

$$P_{имп} = \frac{P_{ср}}{f \cdot \tau} \quad (2.1).$$

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

Длительность воздействия излучения ( $\tau$ ) определяет температуру нагреваемого объекта, темпы его нагревания и охлаждения, величину температурных градиентов и размер прогретого слоя в материале. При использовании импульсных лазеров длительность воздействия определяется длительностью импульса излучения  $\tau$ .

Частота следования импульсов ( $f$ ) определяет производительность обработки.

Направленность пучка излучения характеризуется углом расходимости пучка и пространственным распределением интенсивности по сечению пучка. Распределение интенсивности излучения на выходной апертуре лазера определяется модовым составом излучения, который, в первую очередь, зависит от типа используемого резонатора.

### **Параметры оптической системы**

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

При рассмотрении требований к оптической системе в части рабочего поля наиболее важные вопросы: как перекрыть полную рабочую зону посредством сканирующих оптико–механических

систем или проекционных оптических систем с приемлемой точностью, производительностью и самым простым путем.

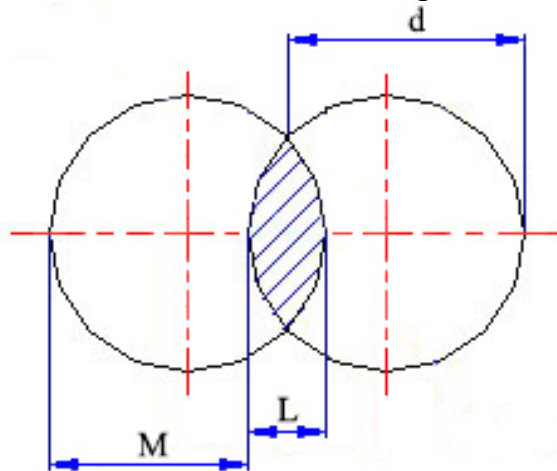


Рис. 2.1 Перекрытие лазерного излучения ( $L$ ) и шаг сканирования ( $M$ ), где  $V_{ск}$  – скорость сканирования;  $d$  – диаметр пятна на поверхности материала

Перекрытие лазерного излучения ( $L$ ) и шаг сканирования ( $M$ ) рассчитывается по формуле:

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{ск}}{f \cdot d}\right) \cdot 100\%, M_x = \frac{V_{ск}}{f} \quad (2.2),$$

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot d}\right) \cdot 100\%, M_y = \frac{1}{N} \quad (2.3),$$

где  $V_{ск}$  – скорость сканирования;  $d$  – диаметр пятна на поверхности материала,  $N$  - количество линий / мм

## 5. Порядок выполнения работы

### 1) Изучить конструкцию и принципы работы лазерного комплекса «Минимаркер-У»

- Общий вид установки.
- Блок питания и управления.
- Блок оптической транспортировки и перемещения луча.
- Основные технические характеристики оборудования.
- Программное обеспечение «SinMark».
- Основные и необходимые операции утилит ПО «SinMark».
- Дополнительное измерительное оборудование.

- Техническая документация.
- Техника безопасности.
- Получить допуск у преподавателя.

## 2) Измерение средней мощности лазерного излучения

**Задание:** измерить мощность лазерного пучка с помощью одноканального измерителя мощности Gentec-EO: Solo2 Laser Power Meter and Laser Energy Meter и детектора мощности UP19K-110F-H9.

- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Подключить детектор мощности к измерителю мощности и энергии, настроить длину волны лазерного источника и предел измерений, выполнить «сброс на ноль» (см. п. А2, Приложение А).
- Запустить на ПК утилиту «MARKER». Поднять сканирующую систему таким образом, чтобы на детекторе мощности, который необходимо предварительно поместить под сканаторы, попадало пятно визуализирующего излучения диаметром примерно 1 см, при этом не выходя за площадь поверхности измерителя (см. п. А1.6.2, Приложение А).
- Закрывать утилиту «MARKER».
- Запустить на ПК утилиту «TEST», ввести требуемую мощность и частоту следования импульсов из таблице 2.1 (см. п. А1.6.3, Приложение А).

Таблица 2.1.

Частота следования импульсов, кГц	Значение мощности на вкладке «Управление лазером» утилиты «TEST», % (20 В = 100%)					
	10	30	50	70	90	100
20						
40						
60						
80						
99						



Важно! При работе с мощностью свыше 10 Вт требуется включить вентилятор на детекторе мощности. Ни в коем случае не производить измерения в фокальной плоскости объектива (в плоскости перетяжки)

- Нажать кнопку «Открыть излучение», на измерителе мощности появится значение средней мощности лазерного излучения для заданных параметров. Перейти в раздел «STATISTIC» измерителя мощности, провести измерения в течении 30 с, внести измеренное значение в таблицу 2.1.
- Выключить излучение.
- Повторить аналогично для других значений мощности и частоты следования импульсов.
- По окончании работы убедиться, что излучение перекрыто, вернуть сканирующую систему в исходное положение (опустить вниз), закрыть программы на компьютере, выключить измеритель мощности.
- По измеренным значениям из таблицы построить график зависимости мощности от частоты следования импульсов  $P(f)$ , на графике указать погрешность измерений.



Обработку результатов рекомендуется производить с использованием ПО «Origin»

### 3) Определение фокусного расстояния объектива

**Задание:** определить фокусное расстояние объектива по визуальной яркости плазменного факела и сравнить его с паспортными данными.

- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Запустить утилиту TEST (см. п. А1.6.3, Приложение А).
- Задать мощность (14 Вт) лазерного излучения и частоту следования импульсов (40 кГц).
- Положить исследуемый образец на рабочий стол.



При работе с лазерным комплексом необходимо использовать защитные очки

- Нажать кнопку «Открыть излучение».
- Найти фокус оптической системы, наблюдая за яркостью искры на металлической пластинке, за счет движения блока перемещения луча по кронштейну вдоль оси Z: утилита MARKER

(см. п. А1.6.2, Приложение А). Максимальная яркость соответствует точке фокуса.

- По окончании работы убедиться, что излучение перекрыто.
- Измерить фокусное расстояние между объективом и металлической пластиной.
- Сравнить найденное фокусное расстояние с размером приспособления для определения фокальной плоскости и с паспортными данными.

#### 4) Определение распределения интенсивности по сечению лазерного пучка

**Задание:** определить распределение интенсивности по сечению пучка с помощью ПЗС-камеры VeamageCCD23.

- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А3, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Подключить ПЗС-камеру VeamageCCD23 к ПК.
- Запустить на ПК утилиту EDITOR.
- Написать код программы, благодаря которому сканатор будет опускаться на минимальную высоту, а затем перемещаться относительно этой точки на заданное расстояние (300 мм).



```
reset  
move 300,0
```

- Переслать код программы в утилиту MARKER (см. п. А1.6.3, Приложение А) и запустить выполнение программы.
- Запустить утилиту TEST (см. п. А1.6.4, Приложение А).
- Задать минимальную мощность (0,2 Вт) лазерного излучения и частоту следования импульсов (20 кГц).
- Установить ослабляющий фильтр №1 над ПЗС-камерой.
- Расположить ПЗС-камеру так, чтобы на неё попадало пятно визуализирующего излучения диаметром примерно 1 см.
- Запустить программу Gentec v7.1H24P.



**Важно!** Открывать излучение только при установленных фильтрах на датчике. Ни в коем случае не производить измерения в фокальной плоскости объектива (в плоскости перетяжки).

- Нажать кнопку «Открыть излучение» в утилите TEST.
- Двигая камеру получить изображение распределения энергии в поперечном сечении излучения в программе Gentec.
- Сохранить данные распределения энергии в поперечном сечении излучения (для этого нажать на график правой кнопкой мыши и выбрать из контекстного меню «Export to Excel»).
- Закрыть излучение в утилите TEST.



Обработку результатов рекомендуется производить с использованием ПО «Origin».

## 5) Определение коэффициента перекрытия при различных режимах работы лазера

**Задание:** провести облучение поверхности материала с различными перекрытиями.

- Рассчитать по формулам 2.2 и 2.3 параметры режимов лазерной обработки (мощность лазерного излучения, частоту следования импульсов, скорость сканирования, количество линий / мм) для облучения поверхности без перекрытия по осям x и y.
- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У». Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Запустить утилиту EDITOR.
- Создать новый файл и написать следующий код:



Power \* // мощность (%)  
Speed \*\* // скорость (мм/с)  
Freq \*\*\* // частота (кГц)



**Важно!** Мощность лазерного излучения меняется в диапазоне от 20 до 100 % (100% соответствует 20 Вт), скорость сканирования от 1 до 8700 мм/с, частота следования импульсов от 20 до 99 кГц.

- Импортировать растровое изображение (см. п. А1.6.1, Приложение А), удобно использовать изображение в виде черного квадрата.

- Проверить правильность написания кода, выполнив его в режиме предварительного просмотра.
- Отправить код программы в утилиту MARKER.
- Расположить изделие на рабочем столе в устойчивом неподвижном положении.
- Выставить фокусное расстояние (в соответствии с предыдущей работой).
- Открыть излучение в утилите MARKER.
- Исследовать поверхность образца с помощью оптического микроскопа.
- Проанализировать достигнута ли поставленная задача (получение импульсов без перекрытия).

## **6. Содержание отчёта**

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- По п. «Измерение средней мощности лазерного излучения»: заполнить таблицу 1, на основании которой построить график зависимости мощности от частоты следования импульсов  $P(f)$ , на графике указать погрешность измерений.
- По п. «Определение фокусного расстояния объектива»: измерить фокусное расстояние между объективом и металлической пластиной и сравнить найденное значение с размером приспособления для поиска фокальной плоскости и с паспортными данными.
- По п. «Определение формы профиля пучка лазерного излучения»: постройте график распределения энергии в поперечном сечении излучения.
- По п. «Определение коэффициента перекрытия при различных режимах работы лазера»: сравнить результаты, полученные расчетным и экспериментальным путем.
- Выводы должны включать основные результаты по каждому пункту.

## **7. Контрольные вопросы**

- 1) Какие основные узлы включает в себя установка «МиниМаркер-У»?



- 2) Для чего служит блок управления сканаторами?
- 3) Опишите принцип работы блока оптической транспортировки и перемещения луча.
- 4) Опишите принцип действия отклоняющей системы.
- 5) Какие существуют способы для измерения средней мощности лазерного излучения?
- 6) Как измерять фокусное расстояние объектива?
- 7) Как определять вид распределения энергии в поперечном сечении излучения?

## **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. - 50 с.
- 2) Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. - 67 с.
- 3) Вейко В.П., Петров А.А. Введение в лазерные технологии. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. - 143 с.

## **Лабораторная работа №3. Лазерная очистка материалов от краски**

### **1. Цель работы**

Ознакомление с процессом лазерной очистки материалов.

### **2. Оборудование и материалы для исследований**

«Минимаркер-У», микроскоп ЛОМО МСП-1 (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы алюминия и картона.

### **3. Задачи**

- Изучить основные физические процессы при лазерной очистке материалов.
- Рассчитать плотность мощности лазерного излучения, необходимую для удаления краски с поверхности без повреждения материала, и значения перекрытий по осям X и Y, обеспечивающие равномерность очистки.
- Произвести очистку материала при рассчитанных режимах обработки.
- Выбрать режим с наилучшим качеством очистки.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

Как известно, пучок лазера является универсальным технологическим инструментом, обладающим уникально высокими удельными энергетическими характеристиками для обработки поверхности материалов. Обеспечивая плотности мощности в зоне воздействия более чем  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, излучение лазера открывает возможность испарения любых загрязнений с поверхности при длительности воздействия порядка наносекунд и менее. При столь кратковременном воздействии зона термического влияния пренебрежимо мала, и образования новых химических элементов на очищенной поверхности практически не происходит.

#### **Физические основы лазерной очистки поверхности**

Физические процессы, происходящие при лазерной очистке поверхности, отличаются большим разнообразием и зависят от

плотности мощности лазерного излучения на поверхности. На рис. 3.1 приведена общая схема процессов воздействия лазерного излучения на материалы применительно к очистке поверхности.

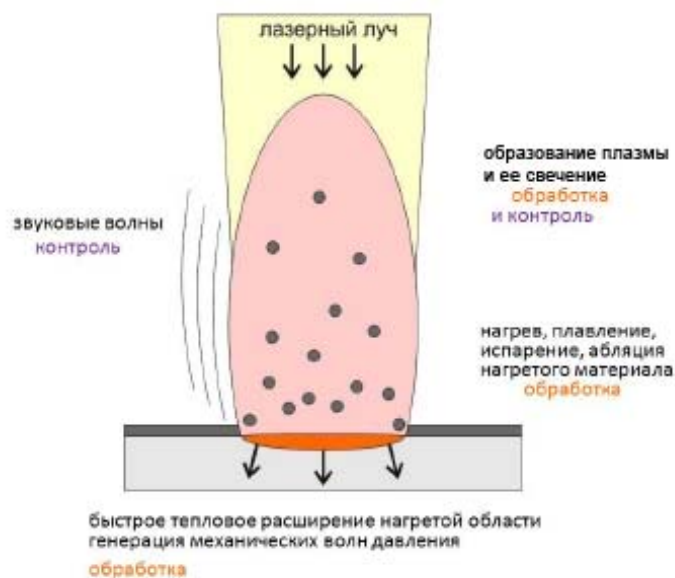


Рис. 3.1 Общая схема процессов воздействия мощного лазерного излучения на материалы применительно к лазерной очистке поверхности

Процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн лежат в основе механизмов лазерной очистки, в то время как свечение плазмы и акустический сигнал в воздухе могут быть использованы для контроля режимов и степени очистки.

Исторически для лазерной очистки поверхности первоначально использовались преимущественно испарительные механизмы, когда плотность мощности излучения превышает значение, при котором начинается испарение загрязняющих веществ с поверхности. В этом случае, в основе физики процесса лазерного удаления поверхностных слоев (ржавчины, окалины, окислов, загрязнений, лаков, красок, жиров и т.д.) лежит эффект испарения, то есть перевода материала из твердой фазы в паро-газовую, при этом желательно минимизировать образование жидкой фазы.

Для качественного описания испарительного механизма лазерной очистки (поверхности металлов от неметаллических загрязнений) будем считать, что лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение

практически без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала (рис. 3.2, а).

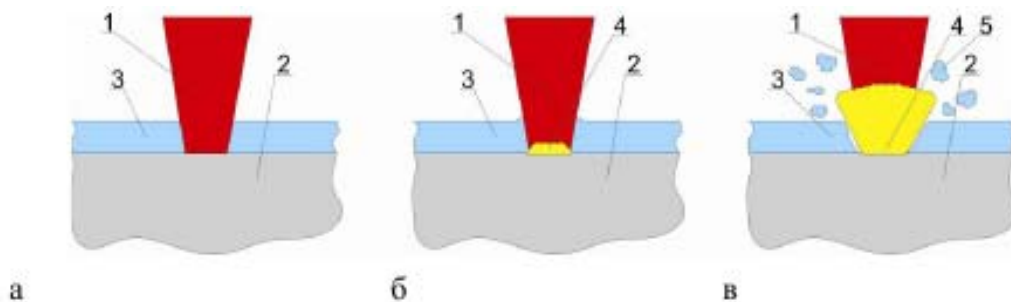


Рис. 3.2 Испарительный механизм лазерной очистки. 1 – лазерный пучок, 2 – загрязненный материал, 3 – загрязнение, 4 – облако испаренного вещества, 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала

В случае, когда плотность мощности лазерного излучения достаточно для того чтобы разогреть материал (металл) до температуры кипения на границе раздела загрязнение – основной материал, начинается испарение материала (рис. 3.2, б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 3.2, в). Кроме того, во многих случаях давление разогретого пара разрушает слой загрязнения не только в зоне области прямого лазерного воздействия, но и в близлежащей области, что повышает производительность лазерной очистки.

Для обеспечения минимального порога испарения вещества основного металла, а также для уменьшения количества образующегося расплава и пара и предотвращения повреждения основного вещества применяют импульсное лазерное излучение с короткой длительностью импульса (несколько десятков наносекунд) и высокой пиковой мощностью, обеспечивающей плотность мощности в зоне обработки  $10^7$ – $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера  $\approx 0,5$  мм, с энергией в импульсе несколько мДж и частотой следования импульсов более 20 кГц. Схема лазерной очистки поверхности сканированием пучка показана на рис. 3.3.

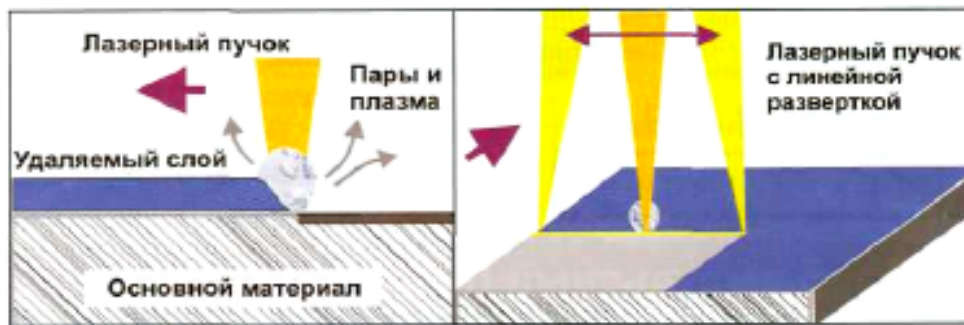


Рис. 3.3 Схема процесса лазерной очистки поверхности со сканированием

Таким образом, большинство испарительных режимов промышленной лазерной очистки требует достаточно высоких температур, и часть тепла переходит в приповерхностный слой основного (очищаемого) материала. Это может вызвать его повреждения различного характера: поверхностное плавление или испарение, инициирование химических процессов в приповерхностном слое (в частности, окисление металла, разложение термочувствительных материалов и т.п.), механическое повреждение (например, образование трещин или сколов). Кроме того, при высоких температурах может происходить вжигание вещества загрязняющих пленок и частиц в поверхностный слой основного материала, после чего очистка становится возможной только при совместном удалении с приповерхностным слоем основного материала. Испарительные режимы лазерной очистки возможны при использовании как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения, когда речь идет о черновых процессах, требующих высокой производительности.

Также существует группа термомеханических механизмов лазерной очистки. Среди них особо стоит выделить термомеханический метод, основанный на сверхбыстром тепловом расширении частиц – ударная очистка. Для реализации упомянутого механизма необходимо использовать импульсные лазерные системы с длительностями импульсов меньше нескольких микросекунд. Во время действия импульса частицы загрязнения нагреваются за счет поглощения лазерного излучения. Нагрев сопровождается расширением частиц. Поскольку частицы сосредоточены на подложке, их центр массы в процессе расширения приобретает вектор скорости, направленный в сторону от подложки. При прекращении действия лазерного импульса частицы за счет сил

инерции стремятся сохранить свою скорость, что, в свою очередь, создает силу, достаточную для их отрыва от подложки.

### Расчет порогового значения плотности мощности излучения

Специфика лазерного нагрева 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:

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{k_2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \psi [\exp(\psi^{-2}) \operatorname{erfc}(\psi^{-1})] \right\} + T_H \quad (3.1),$$

где  $q_0$  — плотность мощности падающего излучения,  $A$  — поглощательная способность,  $\rho$  — 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 интеграл вероятности, индекс «1» относится к пленке, «2» — к подложке.

Комплекс  $\psi$  определяет интенсивность теплоотвода из пленки в подложку.

$$\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 t}} \quad (3.2).$$

Его физический смысл заключается в том, что он характеризует отношение количества тепла в пленке к количеству тепла, запасенного в прогретом слое подложки. При  $\psi \gg 1$  пленка нагревается как адиабатически изолированная, и выражение (3.1) приводится к виду:

$$T_1 = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 c_1 h} + T_H \quad (3.3).$$

При  $\psi \ll 1$  (нагрев пленки в основном определяется теплопроводностью подложки, а оптические характеристики пленки влияют лишь на количество поглощенной энергии):

$$T_1 = \frac{2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{k_2 \sqrt{\pi}} + T_H \quad (3.4).$$

Для расчета плотности мощности, необходимой для удаления краски, мы будем использовать формулу для непрозрачной пленки.

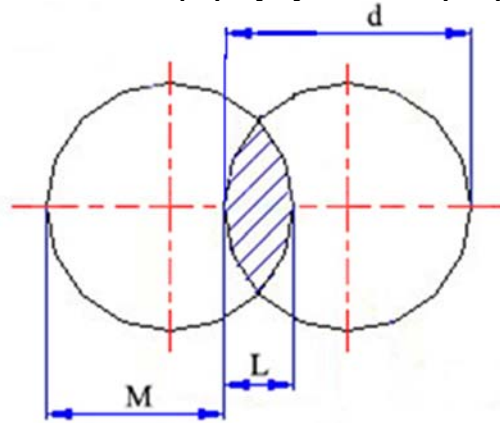


Рис. 3.4 Перекрытие лазерного излучения ( $L$ ) и шаг сканирования ( $M$ ), где  $V_{ск}$  – скорость сканирования;  $d$  – диаметр пятна на поверхности материала

Перекрытия лазерного излучения по осям  $x$  ( $L_x$ ) и  $y$  ( $L_y$ ):

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{ск}}{f \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (3.5),$$

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (3.6).$$

Температуропроводность материалов рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (3.7).$$

Плотность мощность лазерного излучения:

$$q = \frac{P_{имп}}{S} = \frac{P_{ср}}{f \cdot \tau \cdot S} \quad (3.8).$$

$q$  – плотность мощности лазерного излучения;

$\tau$  – длительность импульса;

$R$  – коэффициент отражения поверхности материала;

- $a$  – температуропроводность основного материала;  
 $k$  – теплопроводность основного материала;  
 $T_n$  – начальная температура;  
 $P_{\text{имп}}$  – импульсная мощность;  
 $\delta$  – глубина проникновения света в загрязняющее вещество;  
 $N$  – количество линий / мм.

## 5. Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретические основы процесса лазерной очистки материалов и принципы работы лазерного комплекса «Минимаркер-У».
- 2) Получить допуск у преподавателя.
- 3) Рассчитать плотность мощности лазерного излучения, необходимую для удаления краски с поверхности без повреждения материала по ф-ле 3.4 и значения перекрытий по осям  $x$  и  $y$  для равномерной очистки по ф-лам 3.5, 3.6.
- 4) Рассчитать плотности мощности лазерного излучения, необходимые для удаления краски с поверхности бумаги и алюминия по формулам 3.2-3.4.
- 5) Подобрать параметр перекрытия так, чтобы  $0 < L_x < d$ ,  $0 < L_y < d$  (см. формулы (3.5-3.6)).
- 6) Результаты расчетов занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Материал	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$L_x$ , %	$L_y$ , %	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм
Алюминий							
Картон							

- 7) Провести очистку материал при рассчитанных режимах обработки.
  - Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
  - Запустить утилиту EDITOR (см. п. А1.6.1, Приложение А).
  - Импортировать растровое изображение (удобно использовать изображение в виде черного квадрата).
  - Определить фокусное расстояние.



- В коде программы прописать рассчитанные режимы лазерной обработки. Задать мощность лазерного излучения и частоту следования импульсов.
  - Варьируя значениями  $P$ , добиться наилучшего качества очистки поверхности алюминия и бумаги от краски.
- 8) Полученные данные занести в таблицу 3.2 вместе с микрофотографиями поверхности полученных образцов.

Таблица 3.2.

Материал	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм	Микрофотография образца
Алюминий					
Картон					

- 9) Сделать «визитную карточку» на алюминии и картоне, используя режимы, обеспечивающие наилучшее качество очистки.

Пример «визитной карточки»:



## 6. Содержание отчёта

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Теоретическая часть.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Расчёт плотности мощности лазерного излучения, необходимой для удаления краски с поверхности бумаги и алюминия, и значения перекрытий по осям  $X$  и  $Y$  для равномерной очистки.
- Заполненные таблицы 3.1 и 3.2.

- Визитка (или фотография визитки).
- Выводы.

### **7. Контрольные вопросы**

- 1) В чем заключается процесс лазерной очистки?
- 2) Где применяется лазерная очистка?
- 3) Перечислите основные физические процессы при воздействии мощного лазерного излучения на материалы.
- 4) Какие из процессов (вопрос 1) могут быть использованы для контроля лазерной очистки?
- 5) Чему соответствует значение плотности мощности излучения в случае действия испарительных механизмов лазерной очистки?
- 6) Для чего необходимо уменьшать длительность воздействия?
- 7) Какие повреждения и почему могут возникать у очищаемого материала в процессе лазерной очистки?

### **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. – Л., Машиностроение, 1973. –191 с.
- 2) Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л., Машиностроение, 1986. –247 с.
- 3) Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. – СПб, НИУ ИТМО, 2013. –103 с.

## **Лабораторная работа №4. Лазерная резка тонколистовых материалов**

### **1. Цель работы**

Ознакомление с процессом лазерной резки материалов.

### **2. Оборудование и материалы для исследований**

«Минимаркер-У», микроскоп ЛОМО МСП-1(характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы алюминия и картона.

### **3. Задачи**

- Изучить основные физические процессы при лазерной резке материалов.
- Рассчитать плотность мощности лазерного излучения и значения перекрытий по осям X и Y, необходимые для испарения картона и алюминия.
- Провести резку материалов при рассчитанных режимах обработки.
- Выбрать режимы с наилучшим качеством реза.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

#### **Лазерная резка материалов**

Резка является одной из наиболее часто применяемых на практике технологических операций с использованием лазеров, на её долю приходится около 30-35% всех промышленных применений лазеров. Лазерная резка применяется практически во всех отраслях промышленности -от аэрокосмической, судо- и автомобилестроения до прецизионного приборостроения и медицины. Она одинаково успешно используется как для резки габаритных изделий (деталей кузовов, строительных конструкций, узлов летательных аппаратов и т. д.), так и для изготовления миниатюрных изделий с микронной точностью (фильтры, прокладки, медицинские имплантаты и т.д.).

По сравнению с традиционными методами лазерная резка как металлических, так и неметаллических материалов имеет ряд существенных преимуществ. Среди них – широкий диапазон обрабатываемых изделий; возможность получения тонких резов

благодаря острой фокусировке лазерного луча; малая зона термического влияния; минимальное механическое воздействие, оказываемое на материал; возможность быстрого включения и выключения процесса; химическая чистота; возможность автоматизации и высокая производительность метода; возможность резки по сложному профилю в двух и даже трех измерениях.

В задачах резки многие годы традиционно использовали непрерывные CO<sub>2</sub>-лазеры, которые находят применения при резке металлов, стекла и керамики, органических и синтетических материалов, полимеров, кожи, ткани, древесины, бумаги, картона и других материалов на основе целлюлозы. В настоящее время для резки и микрообработки материалов широко применяют также волоконные импульсно-периодические Nd:YAG и Nd:YVO<sub>4</sub> лазеры, которые используются, в основном, для резки тонких металлических листов, а также полупроводников и металлических пленок в электронной промышленности.

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 оптимизации процессов резки применяют устройства поддува-отсоса продуктов разрушения из зоны резания или поддув активного газа (обычно кислорода) в зону резания (газолазерная резка).

### **Характеристики качества лазерной резки**

В общем случае качество лазерной резки может быть определено следующими основными параметрами (рис. 4.1):

- ширина реза на передней  $b_n$  и на задней  $b_z$  сторонах, а также  $\Delta b$ ,
- неровность краев  $R_z$ ,
- ширина зоны теплового воздействия  $\Delta r_h$ ,
- радиус плавления передней стороны  $R$ ,
- количество отходов (грата)  $m$ ,
- микрогеометрия внутренней поверхности реза (бороздки)  $S$ ,
- лаг реза (отставание реза на задней поверхности относительно передней)  $j$ .

Как должно быть ясно, некоторые дефекты, такие как  $m$  и  $S$ , непосредственно зависят от количества жидкой фазы, которая

остается на краях и стенках реза. Другие, такие как  $\Delta b$ ,  $\Delta r_h$ ,  $R$ , больше зависят от длительности воздействия. Неровность реза на поверхности определяется формой светового пятна, перекрытием пятен и (или) частотой повторения импульсов  $f$ .

Специфическим дефектом при резке является образование бороздок (рис. 4.1) В общем случае, чтобы снизить вероятность их образования необходимо: 1) увеличить перекрытие отверстий (увеличением частоты повторения импульсов  $f$  или уменьшением скорости движения  $u_0$  и т. д.) и, 2) ограничить количество жидкой фазы (уменьшением длительности импульса  $\tau$ , и т. д.).

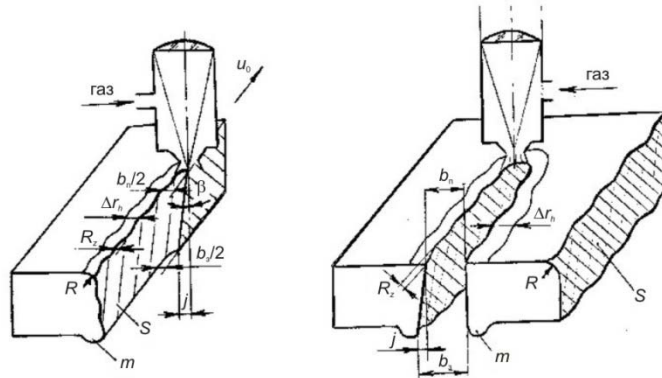


Рис. 4.1 Характеристики качества лазерной резки:  $m$  — отходы,  $S$  — бороздки,  $\Delta r_h$  — размер зоны теплового воздействия,  $R$  — радиус плавления,  $R_z$  — неровность края реза,  $b_1$  и  $b_2$  — ширина реза на передней ( $b_1$ ) и на задней ( $b_2$ ) стороне,  $\beta$  — угол задержки реза и отклонения бороздок (разрез (а) и полный (б) вид)

Если лазер работает в импульсном режиме, генерируя серию импульсов длительностью  $\tau$  при частоте их следования  $f_{и}$ , то при длительности импульса  $\tau < 0,1r_0/V_{ск}$  импульсный источник можно рассматривать как неподвижный (что верно во всех представляющих интерес случаях при  $V_{ск} < 1$  см/с и  $r_0 > 10$  мкм).

### Пороговая плотность мощности лазерного излучения

Нагревание тела лазерным излучением описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при сильном поглощении излучения, когда глубина проникновения света в материал  $\delta = 1/\alpha$  ( $\alpha$  — показатель поглощения света) много меньше толщины прогретого слоя  $at$  ( $a$  — температуропроводность материала,  $t$  — 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<sup>-1</sup>) имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.1),$$

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

Граничное условие на поверхности задает действие поверхностного источника:

$$-k \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{z=0} = q(x, y, t) \quad (4.2),$$

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 ( $l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a\tau}$ ), его можно считать полубесконечной средой:

$$T|_{x \pm \infty} = T|_{y \pm \infty} = T|_{z \pm \infty} = T_n \quad (4.3),$$

где  $T_n$  — начальная температура  $T|_{t=0} = T_n$ .

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 (4.1, 4.2, 4.3) для случая постоянной во времени и по площади облученной зоны плотности мощности излучения  $q$ :

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_n \quad (4.4).$$

Выражение (4.4) имеет два непосредственно следующих из него частных случая (см. таб. 4.1).

На практике, при определении основных параметров процесса 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 формулами (1.4–1.6).

Для облучения в режиме объемного поглощения:

$$T = \frac{q_0(1 - R)\tau}{\rho c \delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) - \frac{r_0^2}{4a\tau} Ei\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) \right\} + T_H \quad (4.7),$$

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

Выражение (4.7) имеет два частных случая (см. таблицу 4.1)

Таблица 4.1.

	При сильном поглощении излучения (на поверхности)	В режиме объемного поглощения
	$\frac{1}{\alpha} \ll \sqrt{at}$	$\frac{1}{\alpha} \gg \sqrt{at}$
$r_0 \gg \sqrt{at}$	$T = \frac{2q_0 A \sqrt{at}}{k\sqrt{\pi}} + T_H, (4.5)$	$T = \frac{q_0 A t}{\rho c \delta} + T_H, (4.8)$
$r_0 \ll \sqrt{at}$	$T = \frac{q_0 A r_0}{k} + T_H, (4.6)$	$T = \frac{q_0 A r_0^2}{4k\delta} \ln(19.4 \frac{at}{r_0^2}) + T_H, (4.9)$

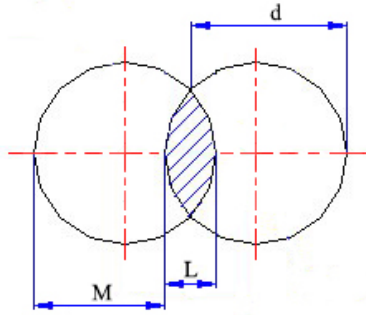


Рис. 4.2 Перекрытие лазерного излучения ( $L$ ) и шаг сканирования ( $M$ ), где  $V_{ск}$  – скорость сканирования;  $d_0$  – диаметр пятна на поверхности материала

Перекрытие лазерного излучения по осям  $x$  ( $L_x$ ) и  $y$  ( $L_y$ ):

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{ск}}{f \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (4.10),$$

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (4.11).$$

Температуропроводность материалов рассчитывает по следующей формуле:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (4.12).$$

Плотность мощности лазерного излучения:

$$q = \frac{P_{имп}}{S} = \frac{P_{ср}}{f \cdot \tau \cdot S} \quad (4.13),$$

$q$  – плотность мощности лазерного излучения;

$\tau$  – длительность импульса;

$R$  – коэффициент отражения поверхности материала;

$a$  – температуропроводность основного материала;

$k$  – теплопроводность основного материала;

$T_n$  – начальная температура;

$P_{имп}$  – импульсная мощность;

$\delta$  – глубина проникновения света в загрязняющее вещество;

$N$  – количество линий / мм.



## 5. Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретические основы процесса лазерной резки материалов и принципы работы лазерного комплекса «Минимаркер-У».
- 2) Получить допуск у преподавателя.
- 3) Рассчитать плотность мощности лазерного излучения, необходимую для резки картона по формуле 4.8.
- 4) Рассчитать плотность мощности лазерного излучения для испарения алюминия по формуле 4.5.
- 5) Подобрать параметр перекрытия так, чтобы  $0 < L_x < d$ , где  $L_x$  - перекрытие лазерного излучения по оси X (см. формулу (4.10),  $d$  - диаметр пятна лазера в плоскости материала.
- 6) Результаты расчетов занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2.

Материал	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$L_x$ , %	$L_y$ , %	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм
Алюминий							
Картон							

- 7) Провести резку материала при рассчитанных режимах обработки.
  - Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
  - Запустить утилиту EDITOR (см. п. А1.6.1, Приложение А).
  - Импортировать растровое изображение (удобно использовать изображение в виде черного квадрата).
  - Определить фокусное расстояние (см. п. А1.6.2, Приложение А).
  - В коде программы прописать рассчитанные режимы лазерной обработки.
  - Варьируя значениями  $P$ , добиться наилучшего качества резки алюминия и картона.
- 8) Полученные данные занести в таблицу 4.3 вместе с микрофотографиями полученного реза.

Таблица 4.3.

Материал	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий на мм	Микрофотография образца

Al					
Картон					

10) Сделать «визитную карточку» на алюминии и картоне, используя режимы, обеспечивающие наилучшее качество резки.

Пример «визитной карточки»:



## 6. Содержание отчёта

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Расчет плотности мощности лазерного излучения, необходимого для резки картона и алюминия.
- Заполненные таблицы 4.2 и 4.3.
- «Визитные карточки» на картоне и алюминии или их фотографии.
- Выводы.

## 7. Контрольные вопросы

- 1) Где применяется лазерная резка?
- 2) Каковы преимущества лазерной резки по сравнению с традиционными методами?
- 3) Какие типы лазерных источников, в основном, применяются для резки?
- 4) На каких физических процессах может быть основана лазерная резка?
- 5) Какая основная сложность при получении глубокого реза испарением?

6) По каким основным параметрам определяется качество лазерной резки?

### **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Вейко В.П. Лазерная микрообработка. – СПб, СПб ГУ ИТМО, 2007. –111 с.
- 2) Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
- 3) Вейко В.П., Петров А.А. Введение в лазерные технологии. – СПб, СПб ГУ ИТМО, 2009. –143 с.

## **Лабораторная работа №5. Цветная лазерная маркировка металлов**

### **1. Цель работы**

Ознакомление с процессом цветной лазерной маркировки металлов.

### **2. Оборудование и материалы для исследований**

«Минимаркер–У» (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы нержавеющей стали и титана.

### **3. Задачи**

- Изучить физические основы процесса цветной маркировки металлов.
- Рассчитать режимы лазерной обработки для окисления поверхности титана.
- Ознакомиться со справкой по операторам move, reset, vpr, vpa, delay, power, speed, freq.
- Написать программу для создания цветовой палитры (в два ряда).
- Получить цветовую палитру на металлической пластинке.
- Используя палитру, создать цветной логотип на металлической пластинке.
- Сделать «визитную карточку» с разработанной палитрой и логотипом.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

Хорошо известно, что при нагревании металла на воздухе, он окисляется. При этом можно наблюдать образование спектра цветов, так называемого «спектра цветов побежалости», возникающего вследствие интерференции белого света в тонких плёнках на отражающей поверхности. При этом по мере роста толщины плёнки последовательно возникают условия гашения лучей с той или иной длиной волны. Различие в цвете объясняется различной толщиной оксидной плёнки, которая, в свою очередь, зависит от температуры нагрева поверхности металла.

Для изменения оптических свойств поверхности металла за счет его окисления применяются волоконные, твердотельные и эксимерные лазеры.

Технология цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) позволяет получать цветное изображение высокого разрешения при бесконтактном воздействии на материал. На рис. 5.1 представлен пример использования технологии ЦЛМ в качестве защиты продукции от фальсификации. На перочинный нож нанесен логотип компании, в котором присутствуют идентификационные знаки микроскопического размера «Ц» и «ITMO». Воспроизвести такой логотип в «кустарных» условиях практически невозможно, так как требуется специальная дорогостоящая техника и точная информация о режимах маркировки идентификационного знака.

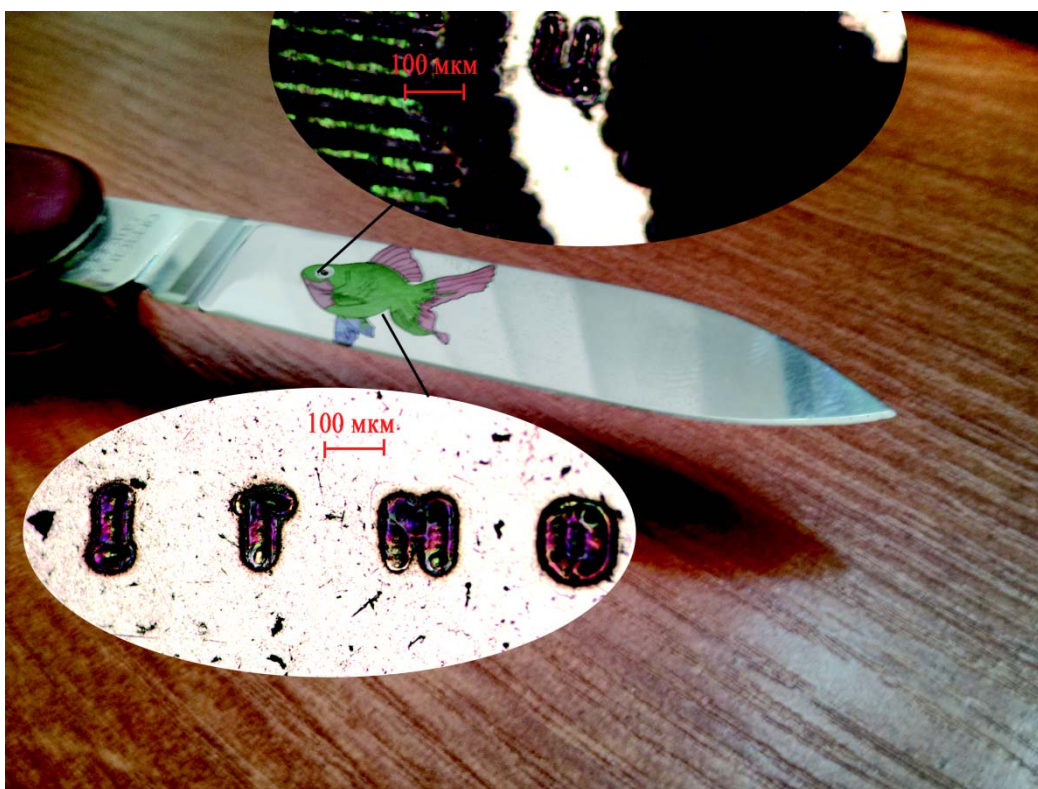


Рис. 5.1 Фотография поверхности лезвия перочинного ножа с логотипом, нанесенным с помощью технологии ЦЛМ, в котором присутствуют идентификационные знаки микроскопического размера «Ц» и «ITMO»

Другое возможное применение технологии ЦЛМ – увеличение объема кодируемой информации за счет создания третьей информационной оси в двухмерном классическом штрих-коде. Объем передаваемой информации также может быть увеличен за

счет большего количества кодирующих элементов. Например, на рис. 5.2а представлен 2D QR-код, сгенерированный с помощью программы «Microsoft Tag». Кодирование информации осуществляется как за счет координат расположения треугольников, так и за счет варьирования их цвета.

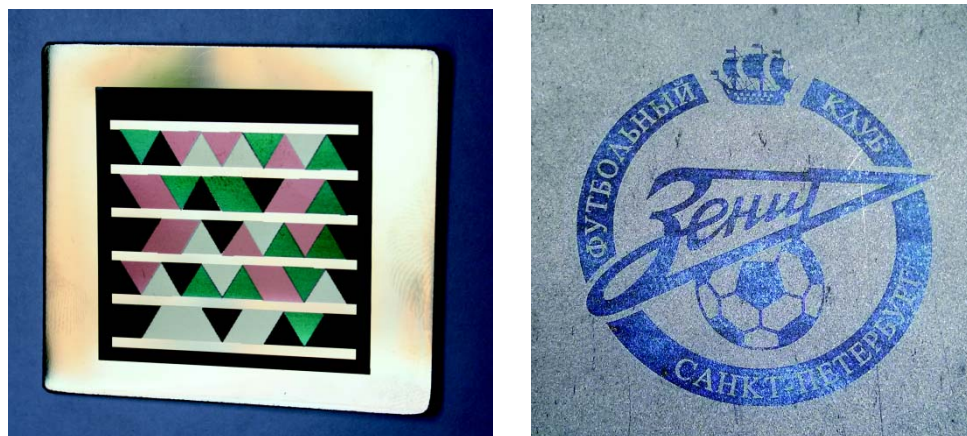


Рис. 5.2 а) QR-код, сгенерированный программой «Microsoft Tag», нанесенный на поверхность нержавеющей стали 10X18Н10Т по технологии ЦЛМ; б) пример изображения, нанесенного на поверхность технического титана ВТ1-0 по технологии ЦЛМ

Заметим также, что оксидная пленка на поверхности некоторых металлов (Al, Cr и др.) создает защитный эффект, который можно многократно увеличить благодаря дополнительному лазерному окислению. Таким образом, технология ЦЛМ позволяет получить не только различные цвета на металлических поверхностях, но и прозрачные защитные покрытия (рис. 5.2б).

Лазерное окрашивание металла может быть получено при построчном сканировании его поверхности последовательностью лазерных импульсов с диаметром сфокусированного пятна  $d$  при заданных плотности мощности излучения ( $q$ ), перекрытиях по осям X ( $L_x$ ) и Y ( $L_y$ ) (рис. 5.3).

Параметры воздействия  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>,  $L_x$ , %,  $L_y$ , %, рассчитываются по формулам 5.1, 5.2, 5.3 соответственно:

$$q = \frac{P_{\text{ср}}}{f \cdot \tau \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (5.1),$$

$P_{\text{ср}}$  - средняя мощность, Вт;

$f$  – частота следования импульсов, Гц;

$\tau$  – длительность импульсов, с;

$r$  – радиус пятна в фокусе, м.

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{ck}}{f \cdot d_0}\right) \cdot 100\%, \quad (5.2),$$

$V_{ck}$  – скорость сканирования, м/с;

$d_0$  – диаметр пятна в фокусе, м.

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot d_0}\right) \cdot 100\%, \quad (5.3),$$

$N$  – количество линий / мм.

Стоит отметить, что один и тот же цвет поверхности может быть получен при различных комбинациях вышеупомянутых параметров.

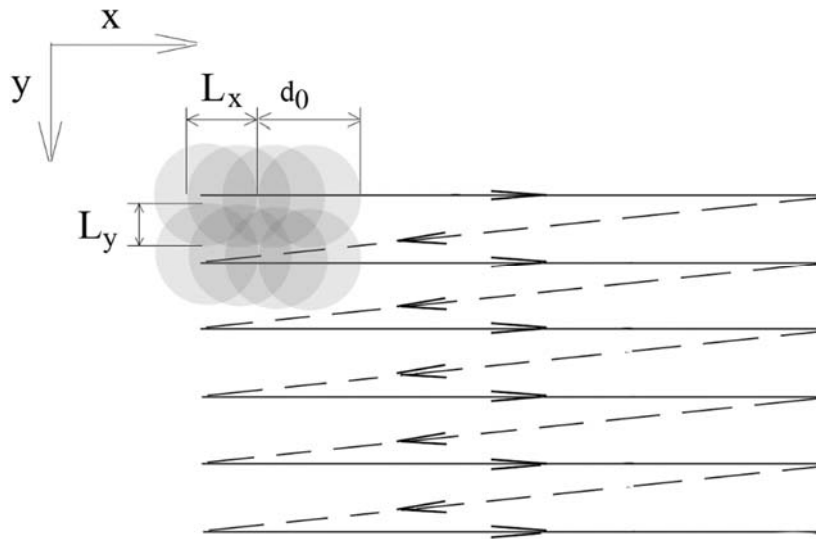
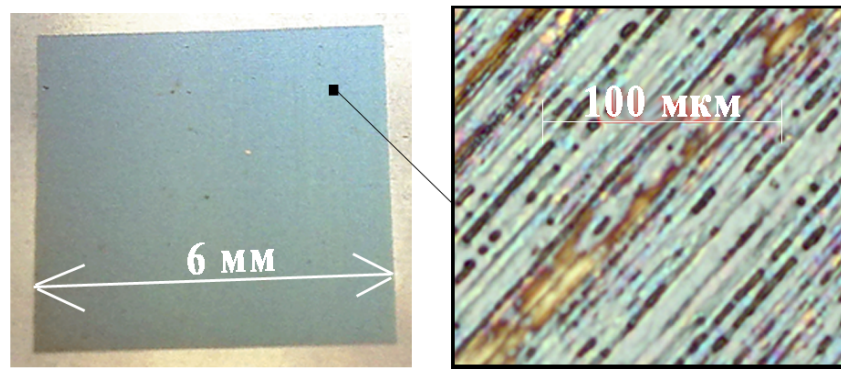
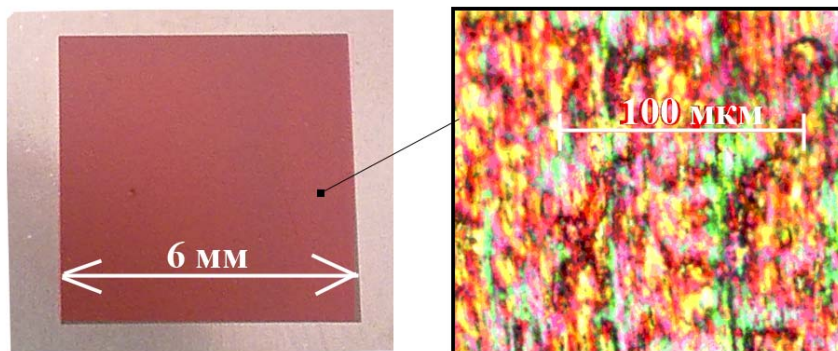


Рис. 5.3 Принцип последовательного сканирования лазерного пучка диаметром  $d_0$  и схематичное изображение перекрытия по осям X ( $L_x$ ) и Y ( $L_y$ ). Штриховая линия – холостой ход (в этот момент генерация лазера отсутствует)

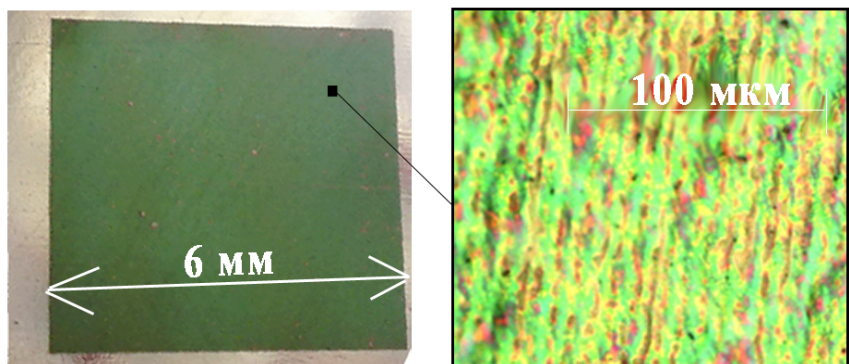
Как было сказано ранее, цвет поверхности, который виден невооруженным глазом, является «интегральным» цветом нескольких отдельных микроскопических областей (рис. 5.4).



а



б



в

Рис. 5.4 Микро- и макрофотографии поверхности образцов после воздействия излучения волоконного лазера при следующих параметрах:  $q=2,91 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $L_y=89\%$ , а)  $L_x=91\%$ , б)  $L_x=97\%$ , в)  $L_x=98\%$

Контролируя число голубых, зеленых и красных «пикселей», можно получать различные цвета поверхности. Для обеспечения наибольшей равномерности нагрева используются режимы с достаточно большим перекрытием как по оси X, так и по оси Y (от 80 до 100 %). Выбранные значения плотности мощности



( $q \sim 2,91 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> для стали и  $q \sim 1,70 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> для титана) обеспечивают максимально возможную производительность процесса в предложенном режиме. Экспериментально показано, что при облучении с большими плотностями мощности происходит разрушение и выгорание материала.

### Состав полученных оксидных пленок

При импульсном лазерном воздействии ( $T_{\max} = 1237$  К) на поверхность стали 12Х18Н10Т в атмосфере образуется двухслойная оксидная структура. Причем двойной оксид  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  нижнего слоя имеет значительно больший показатель ослабления (меньшую прозрачность и серый оттенок), чем оксид железа (III) в верхнем слое. Таким образом, на интегральный цвет поверхности влияют как интерференционные эффекты, так и цвет нижнего оксида  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . При лазерном импульсном нагревании поверхности титана в атмосфере до максимальной температуры 987 К на его поверхности образуется многокомпонентная пленка, нижний слой которой состоит из оксидов:  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}$  с примесями титана и карбида титана, а тонкий верхний слой - из прозрачного оксида титана (IV). Интегральный цвет поверхности определяется как цветом нижнего оксида, так и интерференционными эффектами в тонком верхнем слое прозрачного оксида.

## 5. Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретические основы процесса цветной маркировки металлов.
- 2) Рассчитать режимы лазерной обработки для окисления поверхности титана  $P_{\text{ср}}$ ,  $V_{\text{ск}}$ ,  $N$  для следующего случая -  $L_x = 99,6$  %,  $L_y = 83,3$  %,  $q = 1,7 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f = 60$  кГц.
- 3) Ознакомиться с работой лазерного комплекса «Минимаркер-У» (см. п. А, Приложение А).
- 4) Ознакомиться со справкой по операторам `move`, `reset`, `vpr`, `vpa`, `delay`, `power`, `speed`, `freq` (в утилите EDITOR справка / по скриптам).
- 5) Получить допуск у преподавателя.
- 6) Написать программу для создания палитры, нанести палитру на поверхность металла.
  - Запустить компьютер.
  - Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У». Время прогрева установки составляет 5 минут (см. п. А1.2, Приложение А).
  - Запустить утилиту EDITOR (см. п. А1.6.2, Приложение А).

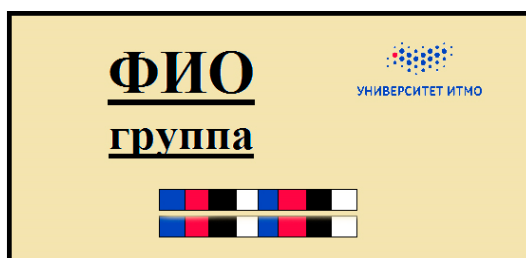
- Опустить блок перемещения луча вдоль оси  $Z$  на минимальное значение с помощью оператора `reset`.
- Поднять блок перемещения луча вдоль оси  $Z$  от минимального значения на расстояние 1,2 мм с помощью оператора `move`.
- Прописать в коде программы  $P_{cp}$ ,  $f$ ,  $V_{ck}$ , с помощью операторов `power`, `speed`, `freq`.
- Импортировать растровое изображение и задать масштаб изображения (квадрат.bmp, 3\*3 мм), прописать рассчитанное значение количества линий / мм.
- С помощью операторов `vpr`, `vra` получить два ряда квадратов по 8 штук, расстояние между рядами 5 мм при этом скорость сканирования между квадратами должна отличаться на 2 мм/с, между всеми квадратами необходимо прописать задержку 3 мс (оператор `DELAY`).
- Для того, чтобы вся поверхность была в фокусе оптической системы, необходимо обеспечить равномерное прижатие образца к столу.
- Используя написанный программный код, получить цветную палитру на поверхности титана.

7) Нанести цветной логотип.

- Выбрать из цветовой палитры цвета, которые необходимы для получения логотипа ИТМО, вписать режимы для их получения в таблицу.
- Создать новый проект в утилите `EDITOR`, загрузить файлы логотипа по цветам и для каждого прописать режимы для его получения.
- Нанести цветное изображение логотипа на поверхность металлов.
- Написать ФИО и номер группы с помощью оператора `text`.

8) Сделать «визитную карточку» на металлической поверхности с цветной лазерной маркировкой.

Пример «визитной карточки»:



9) Результаты расчетов занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1.

Материал	Цвет	$f$ , кГц	$P_{cp}$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм
Титан / сталь					

## 6. Содержание отчёта

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Расчет режима лазерной обработки для окисления поверхности титана.
- Заполненная таблица 5.1.
- «Визитные карточки» или их фотографии с разработанной палитрой и логотипом.
- Выводы.

## 7. Контрольные вопросы

- 1) Опишите технологию цветной лазерной маркировки.
- 2) Где используется цветная маркировка металлов?
- 3) Какие типы лазерных источников, в основном, применяются для маркировки?
- 4) На каких физических процессах может быть основана лазерная цветная маркировка?
- 5) Чем объясняется различные цвета маркировки?
- 6) Каким образом происходит окрашивание металла?

## 8. Список рекомендуемой литературы

- 1) Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. Лазерная маркировка и гравировка: методическое пособие / В.А. Парфенов. Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. – С.35—44.
- 2) Горный С., Вейко В., Одинцова Г., Горбунова Е., Логинов А., Карлагина Ю., Скуратова А., Агеев Э. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов // Научно технический журнал Фотоника. 2013. — № 6 .— С.34—44.

- 3) Slobodov A.A., Veiko V.P., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Phys. 2013. – V.23. –P.066001.
- 4) Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Yu., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // Optics Express. 2014. — V. 22. — I.20. — P.24342-24347.

## Лабораторная работа №6. Лазерное микроструктурирование поверхности металлов

### 1. Цель работы

Ознакомление с процессом создания рельефа на поверхности материалов.

### 2. Оборудование и материалы для исследований

«Минимаркер-У», микроскоп МСП-1 (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы нержавеющей стали и титана.

### 3. Задачи

- Изучить основные физические процессы при лазерном микроструктурировании поверхности стали и титана.
- Рассчитать плотность мощности испарения металлов.
- Провести структурирование материалов при рассчитанных режимах обработки.
- Выбрать режим с наилучшим качеством структурирования.

### 4. Теоретическая подготовка к работе

При воздействии сфокусированного лазерного излучения на материал происходит интенсивный нагрев, плавление и испарение части материала из зоны воздействия, сопровождающиеся образованием области с измененной морфологией и физико-химическими свойствами, что приводит к появлению следа (отпечатка) в зоне воздействия лазерного пучка.

В зависимости от плотности мощности падающего излучения существует три основных режима воздействия лазерного излучения на металлическую поверхность.

Первый режим:  $q_{ок} < q_{пор} < q_{пл}$ . При лазерном нагреве в этом режиме формируется тонкая пленка окислов на границе “металл-среда”. Далее такая пленка может расти (или не расти) как вглубь металла, так и в радиальном направлении. Для стали  $T_{ок} \sim 750^\circ\text{C}$ ,  $T_{пл} \sim 1400^\circ\text{C}$ .

Во втором режиме воздействия ( $q_{пл} < q_{пор} < q_{исп}$ ) происходит плавление и рекристаллизация поверхностного слоя металла с

изменением его морфологии. По мере расплавления и дальнейшего нагревания, граница между жидкой и твердой фазами постепенно перемещается вглубь материала. Окисные пленки становятся более ярко выраженными, частично материал уже в этом режиме начинает испаряться.

При плотностях мощности выше пороговой плотности мощности испарения наблюдается абляция материала. На краях зоны образуется валик и другие следы застывшего расплава, что приводит к появлению специфической шероховатости поверхности. Именно режим испарения-абляции является оптимальным для формирования заданной микрогеометрии поверхности металлов.

Необходимо отметить, что давление паров, гидродинамическая неустойчивость и неоднородность поверхностного натяжения при лазерной абляции могут изменить форму поверхности ванны расплава, что приведёт к появлению поверхностных структур различной формы. Все эти явления можно также использовать для изменения топологии поверхности. Например, в фирме IBM, США широко использовали эти возможности для создания магнитных дисков со специальной наноструктурой «зоны торможения» магнитных головок (до 10000 «лазерных бампов»).

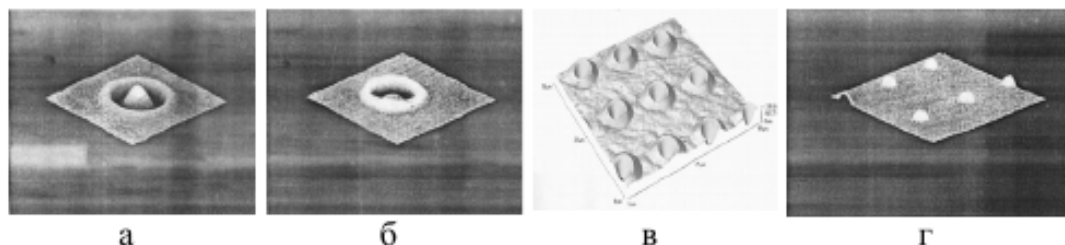


Рис. 6.1 Фотографии, сделанные на атомно-силовом микроскопе, показывающие разнообразные формы нанобампов» на аморфном никель–фосфорном металлическом диске (а, б, в) и стеклянной подложке (г)

Похожие на колонны структуры могут быть получены на поверхности твердого тела (монокристаллах Si и Ge, поликристаллическом Ti) при многократном воздействии лазера на парах меди (наносекундные импульсы). Такая структурированная поверхность имеет широкий спектр возможных применений. Например, «черный» кремний может быть использован при изготовлении солнечных батарей вместо антиотражающих слоев.

Лазерное структурирование твердого тела ведет к заметному росту его удельной поверхности, что представляет потенциальный

интерес для катализа и при создании сенсоров. Структурированная лазером поверхность биосовместимого металлического сплава может быть полезна в медицине и биологии.

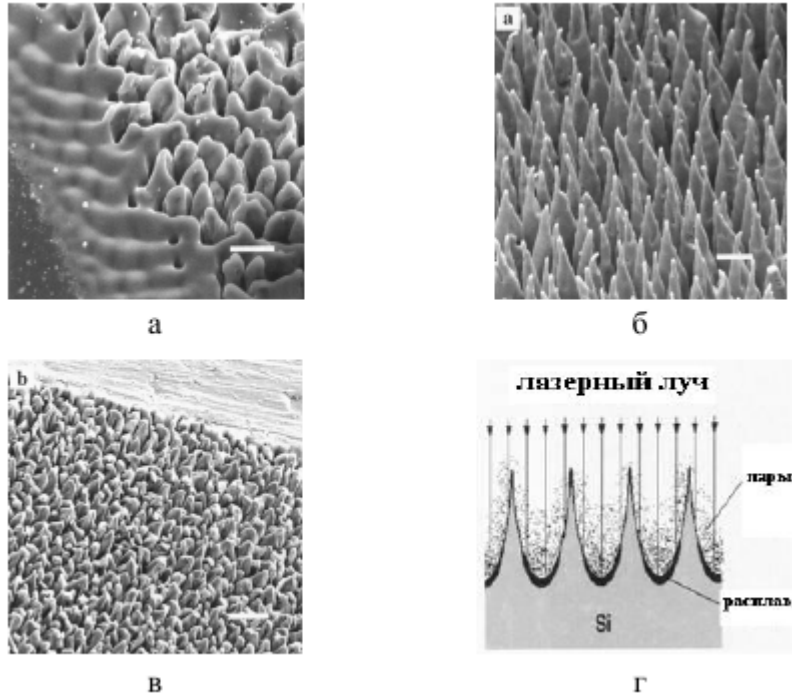


Рис. 6.2 Структуры, полученные при многократном воздействии импульсов лазера на парах меди на поверхность: кремния (а); монокристалла Ge (б); поликристалла Ti (в); схема развития конической структуры в течение лазерного испарения, темные области указывают на расплавленный материал, образующийся в течение лазерного импульса, в то время как конусы остаются твердыми (г)

Перекрытие лазерного излучения по осям X ( $L_x$ ) и Y ( $L_y$ ):

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{\text{ск}}}{f \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (6.1),$$

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot d}\right) \cdot 100\% \quad (6.2).$$

Температуропроводность материалов рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (6.3).$$

Плотность мощность лазерного излучения:

$$q = \frac{P_{\text{имп}}}{S} = \frac{P_{\text{ср}}}{f \cdot \tau \cdot S} \quad (6.4),$$

$q$  – плотность мощности лазерного излучения;

$\tau$  – длительность импульса;

$R$  – коэффициент отражения поверхности материала;

$a$  – температуропроводность материала;

$k$  – теплопроводность материала;

$T_n$  – начальная температура;

$P_{\text{имп}}$  – импульсная мощность;

$\delta$  – глубина проникновения света в вещество;

$N$  – количество линий / мм.

## 5. Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретические основы процесса создания рельефа на металле.
- 2) Ознакомиться с работой лазерного комплекса (см. Приложение А).
- 3) Получить допуск у преподавателя.
- 4) Рассчитать плотность мощности испарения металлов.
- 5) Подобрать значение перекрытия так, чтобы получить структуру аналогичную рис. 6.1  $L_x \approx d$ ,  $L_y \approx d$ , где  $L_x$ ,  $L_y$  – перекрытие лазерного излучения по осям X и Y,  $d$  – диаметр пятна лазера в фокальной плоскости).

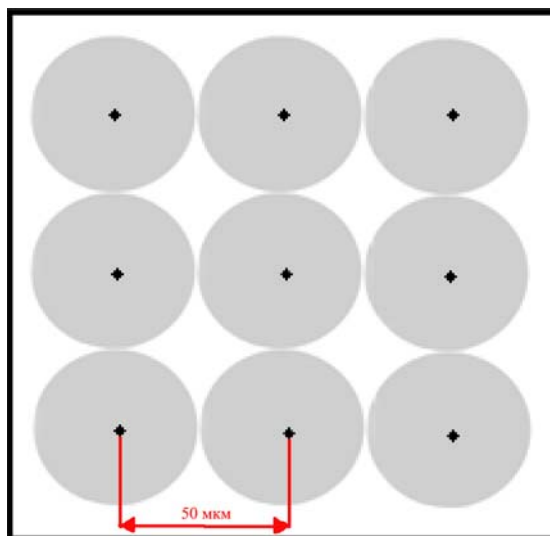


Рис. 6.1 Схема сканирования лазерным излучением



6) Рассчитать режимы лазерной обработки: среднюю мощность, скорость сканирования, частоту следования импульсов, количество линий / мм ( $P$ ,  $V_{ск}$ ,  $f$ ,  $N$ ), результаты расчетов занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1.

Материал	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм
Сталь					
Титан					

7) Получить рельеф на поверхности стали и титана аналогично рис. 6.1.

- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Запустить утилиту EDITOR (см. п. А1.6.1, Приложение А).
- Импортировать растровое изображение, удобно использовать изображение в виде черного квадрата
- Варьируя значениями  $P$ , добиться наилучшего качества рельефа на поверхности металла без перекрытия.

8) Полученные данные и микрофотографии полученных образцов занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2.

Материал	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм	Микрофотография образца
Сталь					
Титан					

## 6. Содержание отчёта

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Расчёты плотности мощности испарения металлов.
- Заполненные таблицы 6.1 и 6.2.
- Выводы.

## **7. Контрольные вопросы**

- 1) Где применяется микроструктурирование материалов?
- 2) Какие типы лазерных источников, в основном, применяются для структурирования металлов?
- 3) На каких физических процессах основано структурирование металлов?
- 4) По каким главным параметрам определяется качество структурирования металлов?

## **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Вейко В.П., Петров А.А. Введение в лазерные технологии. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. – 143 с.
- 2) Вейко В.П. Лазерная микрообработка. – СПб, СПбГУ ИТМО, 2007. – 111 с.

## **Лабораторная работа №7. Гибка тонких металлических пластин**

### **1. Цель работы**

Ознакомление с процессом лазерной гибки тонколистовых пластин.

### **2. Оборудование и материалы для исследований**

«Минимаркер–У» (характеристики оборудования и порядок работы с ним см. Приложение А).

Образцы нержавеющей стали и титана.

### **3. Задачи**

- Ознакомиться с физическими основами процесса гибки металлических пластин.
- Рассчитать режимы лазерной обработки для гибки пластин из стали и титана.
- Подобрать оптимальный режим для гибки пластин стали и титана.
- Проанализировать полученные результаты/зависимости.
- Создать собственную деталь.

### **4. Теоретическая подготовка к работе**

Бесконтактное изменение формы детали, вызванное лазерным воздействием, может быть использовано для решения различных задач в приборо- и машиностроении. В частности, при формовке деталей различной формы лазерные технологии позволяют в некоторых случаях заменить процесс штамповки и получать необходимую форму детали непосредственно с помощью лазерного облучения. При разработке юстировочных узлов для регулировки положения микрооптических, волоконных, микромеханических и других деталей использование лазера может существенно упростить конструкцию и автоматизировать процесс юстировки. Управляемое деформирование под действием лазерного излучения может быть использовано также при создании микродвигателей для микромеханических систем и решении ряда других задач. Основными достоинствами лазерного формообразования являются бесконтактность, локальность и возможность автоматизации

процесса. Лазерный изгиб может быть использован как для твердых, так и для хрупких материалов.

Рассмотрим кратко механизм возникновения деформаций (пластического формообразования) под действием температурных напряжений. При локальном нагревании некоторой области материала в результате неравномерного теплового расширения в нем возникают термоупругие механические напряжения. Если напряжения достигают предела текучести, то они приводят к появлению пластических деформаций. По окончании импульса, при остывании среды, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в сжатом (по сравнению с исходным) состоянии. На рис. 7.1 представлены основные виды деформации, вызванные локальным лазерным нагревом.



Рис. 7.1 Основные виды деформаций, которые могут быть получены при лазерном нагреве

В зависимости от глубины прогреваемого слоя деформирование материала протекает по-разному. При локальном нагреве поверхностного слоя, когда температура поверхности детали много больше температуры обратной стороны,  $T_o \gg T_u$ , тепловое поле приводит к неравномерному тепловому расширению и деформированию преимущественно поверхностных слоев. Этот механизм изгиба получил название поверхностной усадки.

Если во время действия лазерного излучения деталь прогревается равномерно по толщине ( $T_o \approx T_u$ ), тепловое расширение и последующая деформация происходят по всему поперечному сечению детали. В этом случае результатом лазерного воздействия является уменьшение линейных размеров (см. рис. 7.1) или равномерная усадка. При аналогичном распределении температуры

деформирование более тонких пластин происходит по механизму выгибания.

Среди наиболее актуальных задач, которые решаются с помощью лазерной гибки, можно выделить гибку труб и создание микроактюаторов – микроприводов специального назначения на новых физических принципах.

Рассмотрим принцип действия одного из таких актюаторов (рис. 7.2). При локальном нагревании некоторой области-полосы на рис. 7.2 под действием возникших в результате неравномерного нагрева напряжений сжатия среда деформируется и пластинка, изгибаясь, приходит в движение и может перемещать находящуюся на ней деталь (например, зеркало и т.п.).

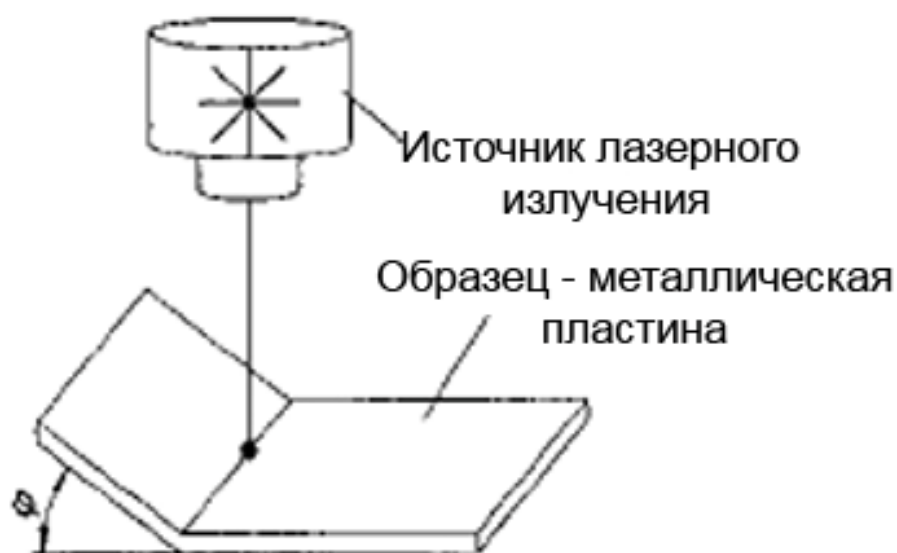


Рис. 7.2 Принцип действия актюатора

## 5. Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретические основы процесса гибки тонколистовых пластин.
- 2) Рассчитать режимы лазерной обработки для гибки поверхности стали и титана:  $P_{\text{ср}}$ ,  $V_{\text{ск}}$  для следующего случая -  $L_x=98\%$ ,  $q=10 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f=99$  кГц. Рассчитанные значения занести в таблице 7.1.
- 3) Ознакомиться с работой лазерного комплекса «Минимаркер-У» (см. п. А1, Приложение А).
- 4) Получить допуск у преподавателя.



Опасно! Мощное излучение. Обязательно использовать защитные очки!

5) Произвести лазерную гибку материала при рассчитанных режимах обработки.

- Включить лазерный комплекс «Минимаркер-У» (см. п. А1.2, Приложение А). Время прогрева установки составляет 5 минут.
- Запустить утилиту A4-Laser Tuning (см. п. А1.6.4, Приложение А).
- Задать длительность воздействия  $\tau=100$  нс.
- Запустить утилиту EDITOR (см. п. А1.6.1, Приложение А).
- Задать линию, ширина которой должна быть в 1,5 раза больше ширины пластины с помощью операторов vpr, vaa.
- Передать код программы в утилиту MARKER (см. п. А1.6.2, Приложение А).
- Определить фокусное расстояние.
- Используя функцию «Мультипроход», прописать рассчитанные режимы облучения и количество проходов равное 100.



Важно, чтобы край пластины висел в воздухе!

- Варьируя количеством проходов (от 100 до 1000), добиться сгибания металлической пластинки (сталь, титан).

6) Полученные режимы лазерного воздействия занести в таблицу 7.2.

7) Построить график зависимости угла сгибания пластины от количества проходов лазерного излучения для стали и титана.

Таблица 7.1.

Материал	$f$ , кГц	$P_{\text{ср}}$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм
Сталь				
Титан				

Таблица 7.2.

Материал	$f$ , кГц	$P$ , Вт	$V$ , м/с	$N$ , линий / мм	Микрофотография образца
Сталь					
Титан					

8) Придумать собственную фигуру/деталь и создать ее, используя технику гибки тонких металлических пластин.

## **6. Содержание отчёта**

- Название и номер работы.
- ФИО выполнявших работу.
- Формулы, использованные при расчётах.
- Заполненные таблицы 7.1 и 7.2.
- Расчет режимов лазерной обработки для гибки поверхности стали и титана.
- Выводы.

## **7. Контрольные вопросы**

- 1) Описание технологии гибки металлических пластин.
- 2) Где применяется гибка металлических пластин?
- 3) Какие типы лазерных источников, в основном, применяются для гибки металлических пластин?
- 4) На каких физических процессах может быть основана гибка металлических пластин?

## **8. Список рекомендуемой литературы**

- 1) Вейко В. П., Петров А. А. Лазерная юстировка положения микродеталей в пространстве // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). – 2001. – №. 4. – С. 113-118.
- 2) Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С. Обзор разработок микроактюаторов на основе лазерных технологий и предложения по перспективам их развития // Микросистемная техника. – 2004. – №. 1. – С. 12-16.
- 3) Кочетов А. Д., Петров А. А. Лазерная гибка тонколистовых деталей импульсным излучением // Известия высших учебных заведений. – 2011. – Т. 54. – №. 2.

## Приложение А. Оборудование

### А1. Лабораторная установка «Минимаркер-У»

#### А1.1 Общий вид установки

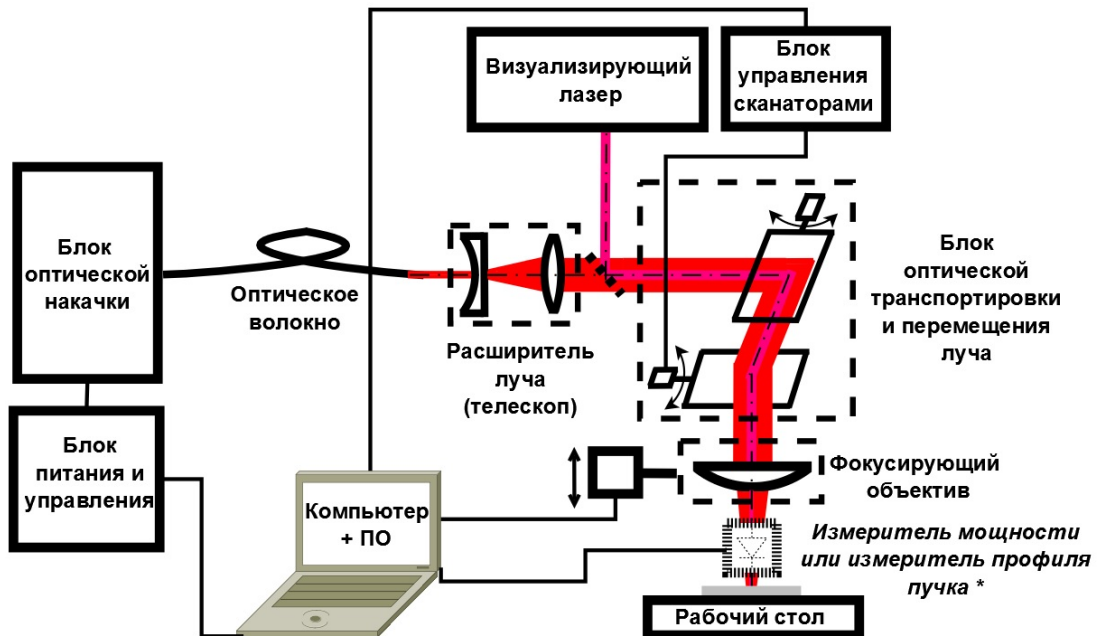


Рис. А1 Блок-схема установки «Минимаркер-У»



Рис. А2 Общий вид установки «Минимаркер-У»



Основные элементы установки «Минимаркер-У»: блок питания и управления, блок оптической транспортировки и перемещения луча, координатный стол с кронштейном, компьютер + ПО (рис. А1, рис. А2).

## А1.2 Блок питания и управления

Блок питания лазера вырабатывает электрическое напряжение (и ток), необходимые для возбуждения полупроводниковых лазеров, которые осуществляют оптическую накачку оптоволоконна, легированного иттербием (Yb), являющегося активной средой данного волоконного лазера. На выходе получается лазерный пучок с равномерным (квазигауссовым) распределением мощности. Важной составной частью блока питания лазера является акустооптический затвор, с помощью которого осуществляется модуляция добротности и управление частотой следования импульсов лазерного излучения.

Блок управления лазера производит контроль и управление системами лазерной установки при помощи команд с компьютера и специального программного обеспечения (рис. А3). На передней панели размещены: тумблер включения / выключения питания системы (1) и кнопка экстренного выключения питания системы (2). На задней панели размещены: сетевой разъем ~220 В (3); разъем для подключения к педали (4); вывод кабеля USB (5); кнопка включения /выключения питания лазера (6); разъемы для подключения кабелей сканаторов (7, 8); разъем для подключения вращателя (9); вывод оптоволоконного лазера (10).

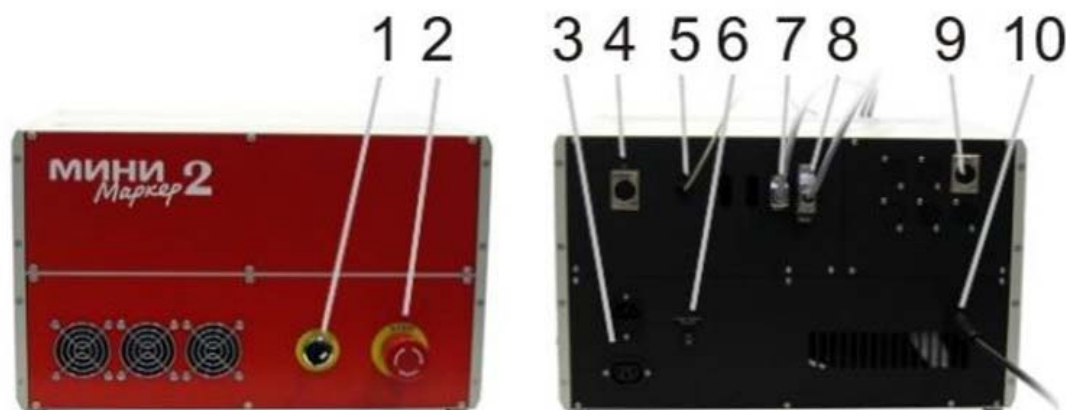


Рис. А3 Блок питания и управления установки «Минимаркер-У»: вид спереди и вид сзади

#### А1.4 Блок оптической транспортировки и перемещения луча

Блок оптической транспортировки и перемещения луча (Рис. А4) представляет собой сборную конструкцию с элементами крепления составляющих его элементов. Лазерное излучение заводится в систему через оптоволокну (5), соединенное специальным образом с расширителем луча (3). Далее расширенный лазерный пучок последовательно попадает на зеркало сканатора Y (2) и сканатора X (1), после чего выводится из системы через фокусирующий объектив (4).

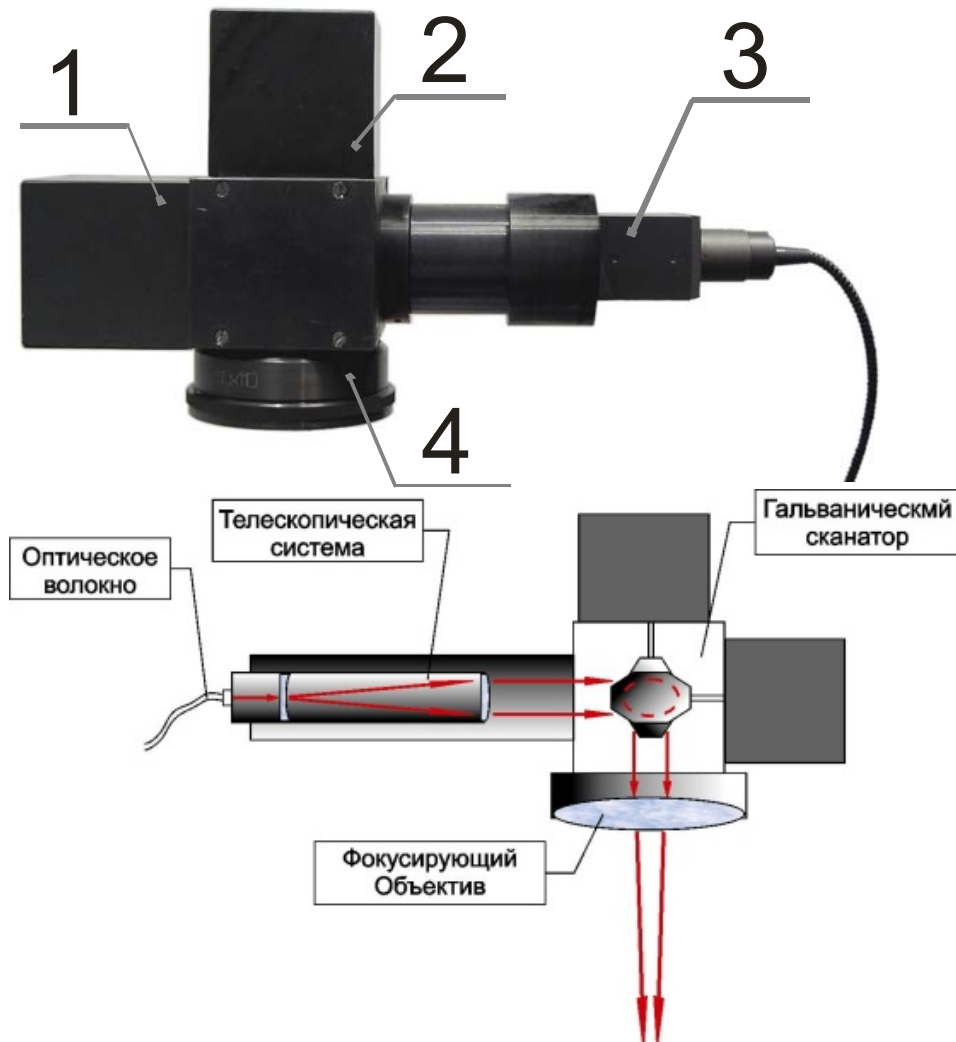


Рис. А4 Блок оптической транспортировки и перемещения луча:  
1- Сканатор X, 2 - Сканатор Y, 3 - Расширитель луча (телескоп),  
4 - Фокусирующий объектив, 5 - Оптическое волокно

Оптоволокно (5) представляет из себя одновременно элемент лазерного излучателя и элемент транспортировки лазерного излучения потребителю (система отклонения и фокусировки).

Расширитель луча (3) представляет собой телескоп, предназначен для увеличения диаметра поперечного сечения луча лазерного излучения.

Фокусирующая система (4) представляет собой объектив, «просветленный» на длину волны основного лазерного излучения, предназначена для фокусировки лазерного излучения в фокальной плоскости (плоскости маркировки) в пятно минимальных размеров с целью достижения высокой плотности мощности в зоне обработки.

Отклоняющая система (Рис. А5) выполнена на основе двух устройств - гальванометрических сканаторов, преобразующих электрический сигнал управления в отклонение вала двигателя сканатора, и закрепленного на нем зеркала.

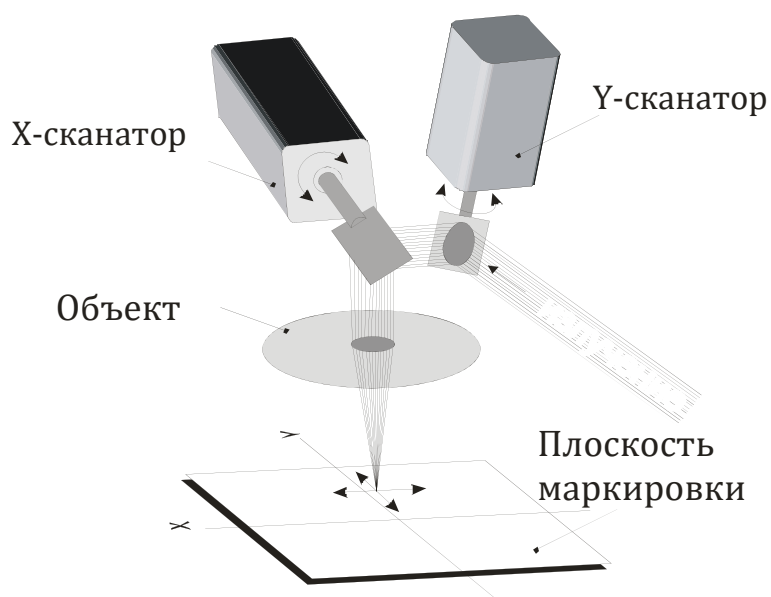


Рис. А5 Отклоняющая система

Принцип действия такой системы заключается в следующем: луч направляется на поворотное зеркало, закрепленное на валу Y-сканатора, и отклоняется по оси Y. Отклоненный таким образом луч попадает на зеркало X-сканатора, установленное под углом 90 градусов по отношению к первому. X-сканатор осуществляет развертку луча по оси X. Таким образом, отклоняющая система производит развертку луча по двум взаимно перпендикулярным осям

в плоскости обработки. Плоскость, в которой происходит фокусирование лазерного луча, носит название фокальная плоскость (плоскость обработки или рабочая зона установки. Область, в которой качество обработки (ширина линии и пр. параметры) остаются неизменными, носит название зоны перетяжки.

### **A1.5 Основные технические характеристики установки**

Основные технические характеристики установки «Минимаркер-У» приведены в таблице А1.

Таблица А1.

Основные технические характеристики установки «Минимаркер-У»

Параметр	Ед. измер.	Значение
Лазерный источник - иттербиевый импульсный волоконный		
Тип накачки	Полупроводниковая	
Длина волны, $\lambda$	мкм	1.064
Частота следования импульсов, $f$	кГц	20-99 (регулируемая)
Средняя мощность излучения, $P$	Вт	1-20 Вт (регулируемая)
Длительность импульсов, $\tau$	нс	4,8,14,20,30,50,100,200
Система перемещения луча для сканирующей системы с объективом 100x100 мм)		
Диаметр пятна лазера в фокальной плоскости, $d$	мкм	50
Глубина фокусировки (длина каустики) луча	мм	до 3
Тип сканаторов	2-ух осевой гальванометрический	
Скорость сканирования, $V_{ск}$	мм/с	1-8750
Точность позиционирования	мкм	до 5

### **A1.6 Программное обеспечение SinMark**

Программное обеспечение SinMark включает в себя 4 основные утилиты:

**A1.6.1 Утилита EDITOR (Рис. А6) предназначена для подготовки кода программы**

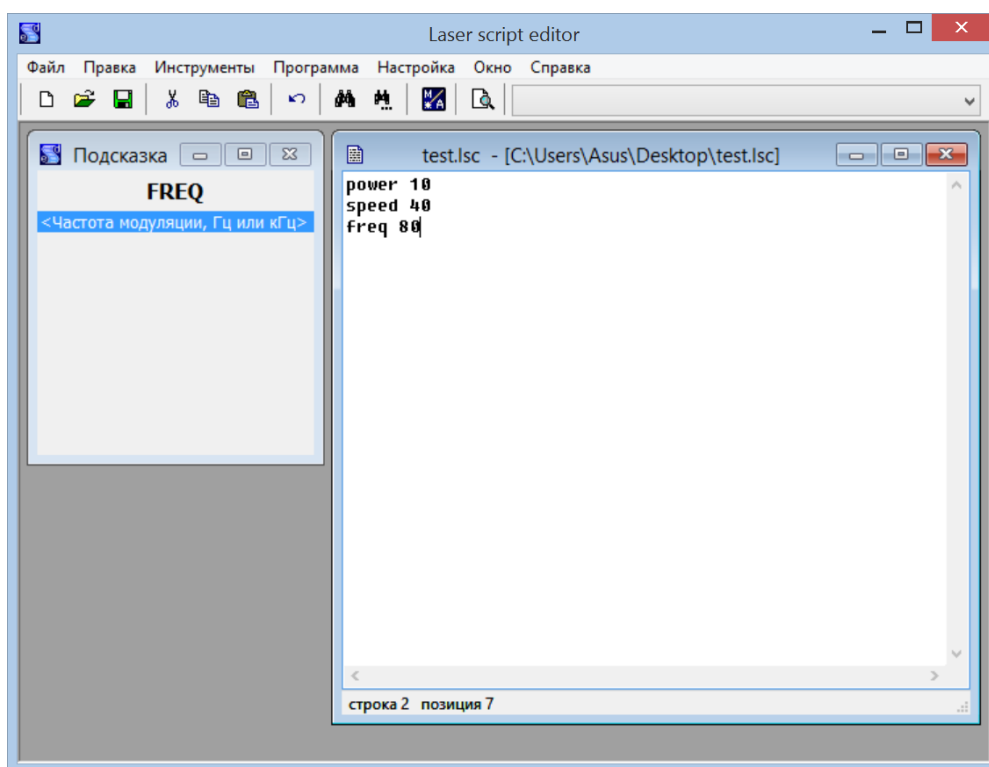


Рис. А6 Общий вид утилиты EDITOR

**Основные и необходимые операции:**

- Создать новый файл:  
выбрать в строжке главного меню «Файл» / «Создать».
- Открыть существующий файл:  
выбрать в строжке главного меню «Файл» / «Открыть».
- Сохранить файл:  
выбрать в строжке главного меню «Файл» / «Сохранить как».
- Написание кода программы (скрипта):  
код программы пишется в окне справа. Подсказка по синтаксису операторов появляется в окне «ПОДСКАЗКА».
- Импортировать растровое изображение:  
выбрать в строжке главного меню «Инструменты» / «Мастер импорта растровой графики». Прописать масштаб изображения (ширину, высоту) и количество линий / мм (20 линий / мм – режим без перекрытия по оси у). Нажать ОК, сохранить файл с разрешением \*.вес. В рабочем поле программы прописется, что данный файл добавлен.



INCLUDE "Namefile.vec".

- Просмотр результата выполнения кода программы: выбрать в строике главного меню «Программа» / «Просмотреть».
- Послать код программы в утилиту MARKER: выбрать в строике главного меню «Программа» / «Маркировать».

**A1.6.2 Утилита MARKER** (Рис. А7) предназначена для запуска лазера по траектории в соответствии с написанной программой

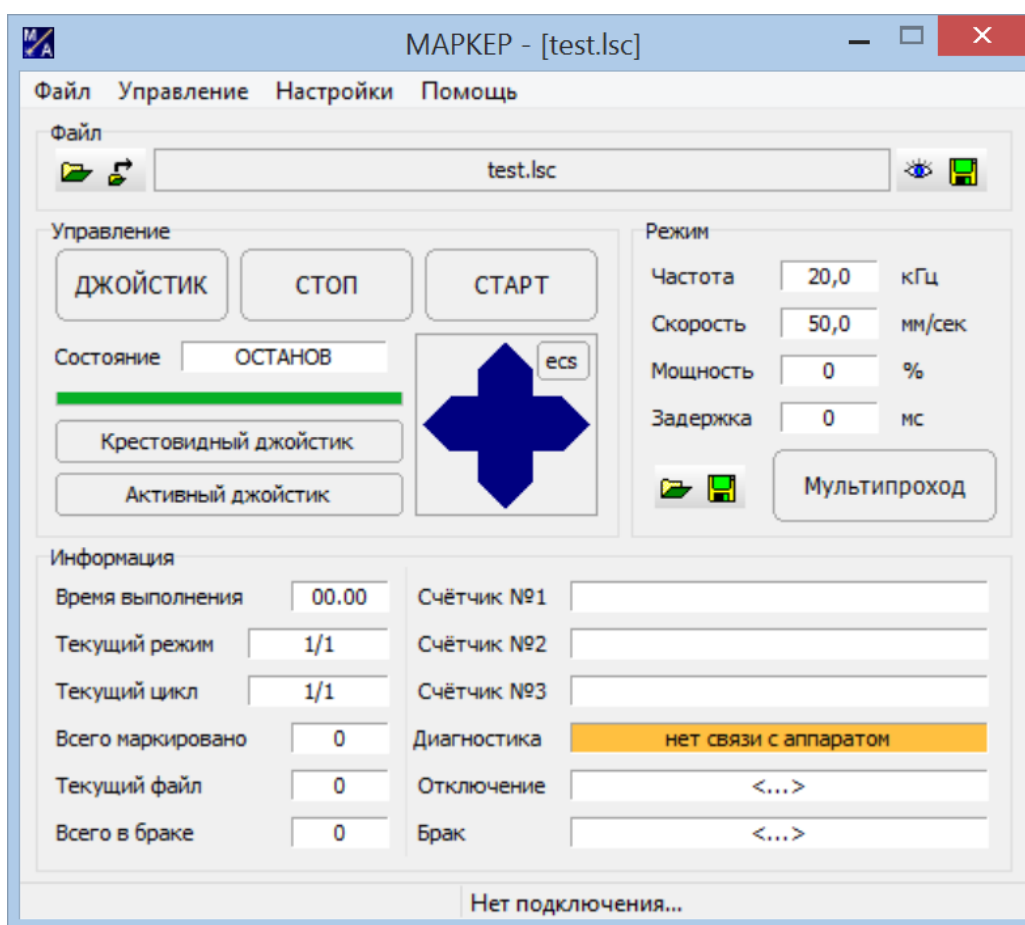


Рис. А7 Общий вид утилиты MARKER

**Основные и необходимые операции:**

- Движение блока перемещения луча по кронштейну вдоль оси z: нажмите на «ecs», после окрашивания кнопки в желтый цвет удерживайте сочетание клавиш «ctrl+up» для движения вверх, «ctrl+down» для движения вниз.
- Определить фокусное расстояние:

для нахождения фокусного расстояния в комплекте с лазерным комплексом поставляется специальная оснастка в виде пластикового шаблона. Приспособление для поиска фокальной плоскости подвесить на объектив и подъемом или опусканием блока перемещения луча добиться того, чтобы нижняя часть приспособления коснулась исследуемого образца. Пластиковый шаблон заводится на объектив сбоку.

- Открыть излучение:  
нажмите кнопку «СТАРТ».
- Закрыть излучение:  
нажмите кнопку «СТОП».
- Мультипроход:  
в меню Утилита MARKER выбрать настройки / свойства мультипрохода (рис. А8).

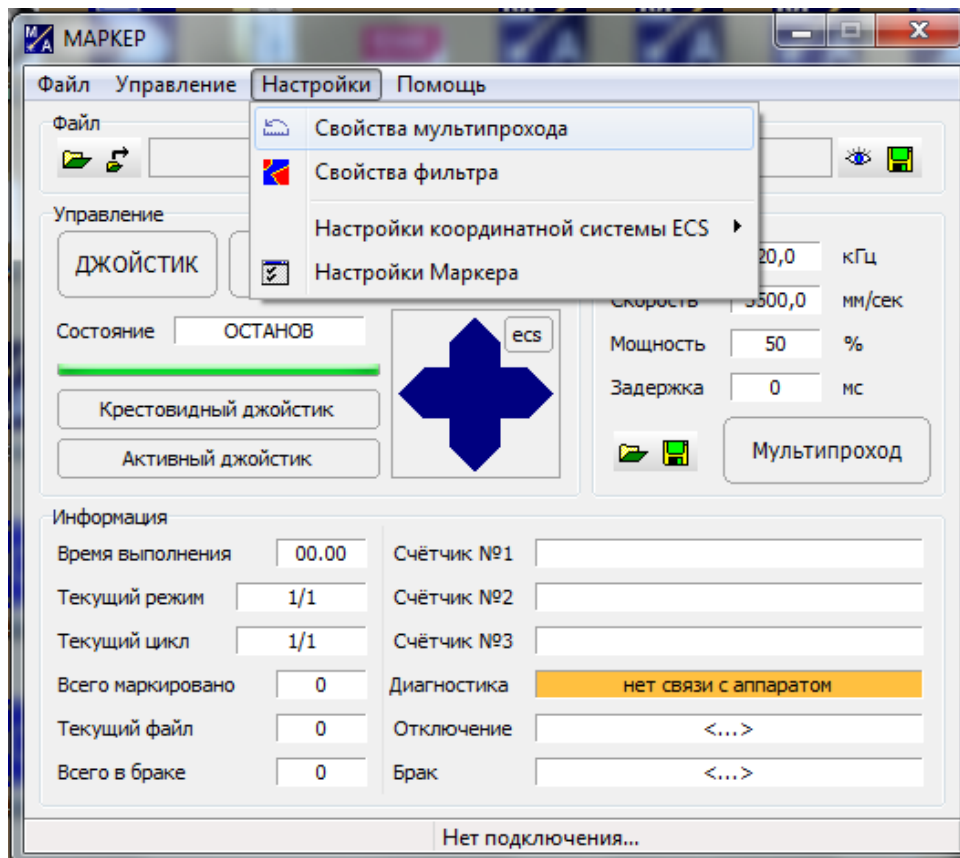


Рис. А8 Режим «Мультипроход» в утилите MARKER

В свойствах мультипрохода прописываем: частоту (кГц), скорость (мм/с), мощность (%), количество проходов (рис. А9).

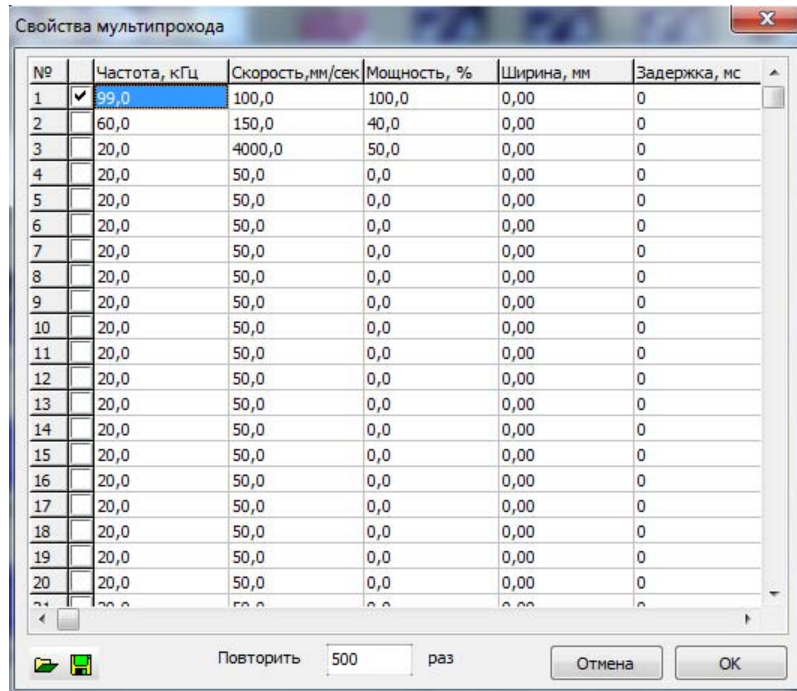


Рис. А9 Свойства мультипрохода в утилите MARKER

Для использования мультипрохода в Утилите MARKER нажмите кнопку МУЛЬТИПРОХОД (она должна гореть желтым цветом).

**А1.6.3 Утилита TEST (Рис. А10) предназначена для управления лазером (включение излучения без сканирования)**

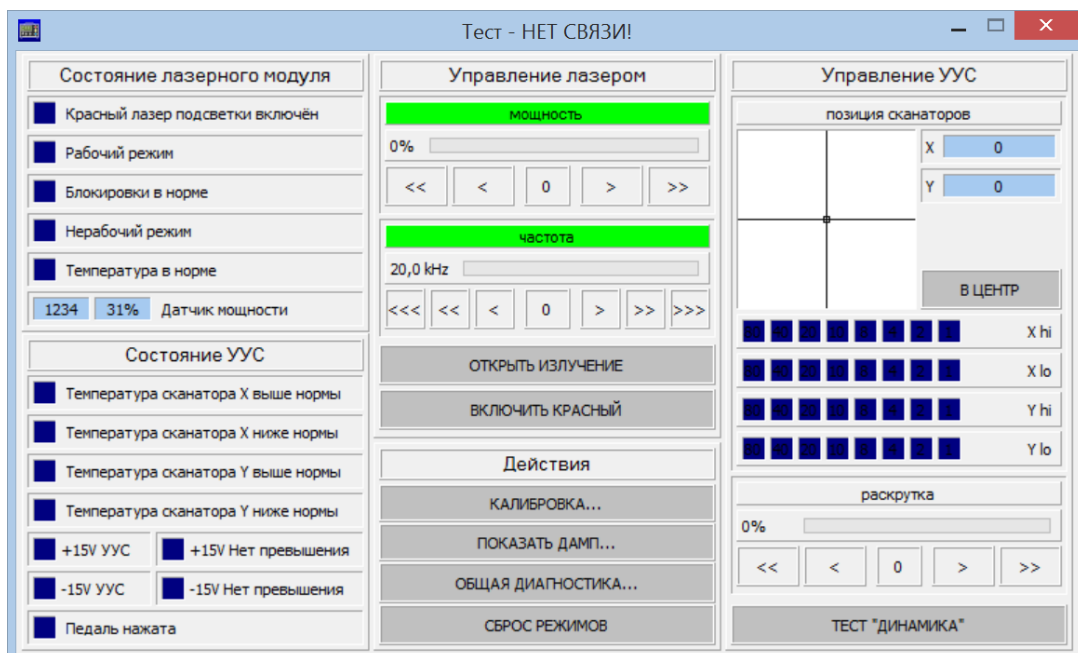


Рис. А10 Общий вид утилиты TEST



### Основные и необходимые операции:

- Задать мощность лазерного излучения и частоту следования импульсов:

нажать кнопку «МОЩНОСТЬ» («ЧАСТОТА»), после окрашивания кнопки в зеленый цвет установить необходимое значение.

- Открыть излучение:

нажать кнопку «ОТКРЫТЬ ИЗЛУЧЕНИЕ» (при открытом излучении кнопка окрасится в желтый цвет).

- Закрыть излучение:

нажать кнопку «ОТКРЫТЬ ИЗЛУЧЕНИЕ» (при закрытом излучении кнопка окрасится в серый цвет).

**A1.6.4 Утилита A4-Laser Tuning** (Рис. A11) предназначена для изменения длительности импульсов лазерного излучения.

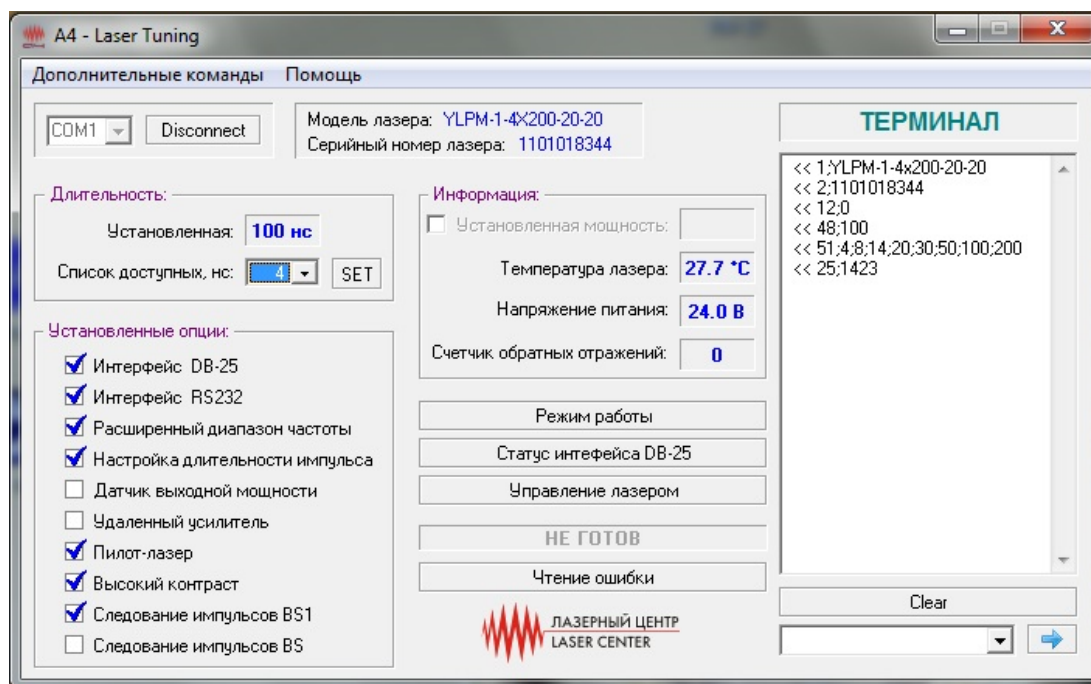


Рис. A11 Общий вид утилиты A4-Laser Tuning

### Основные и необходимые операции:

- Подключение программы к лазеру:

из выпадающего списка выбрать имя COM-порта и нажать кнопку «Connect».

- Изменить длительность импульсов:

выбрать значение из выпадающего списка, подтвердить значение нажав кнопку SET.

### **A1.7 Порядок работы с установкой**

- Для подготовки к работе необходимо произвести внешний осмотр установки и убедиться в том, что составные части установки надежно соединены, установка выключена и обесточена, а защитная крышка объектива снята.
- Включить установку: тумблер 1, рис. А3.
- Открыть утилиту EDITOR.
- Подготовить код рабочей программы.
- Проверить правильность написания кода, отправив его на предпросмотр.
- Отправить код управляющей программы в утилиту MARKER.
- Расположить изделие на рабочем столе в устойчивом неподвижном положении.
- Совместить фокус оптической системы и плоскость обработки за счет движения блока перемещения луча по кронштейну вдоль оси z: утилита MARKER.
- Открыть излучение: утилита MARKER.
- Выключить установку: тумблер 1, рис. А3.

## **A2. Одноканальный измеритель мощности Gentec-EO с детектором мощности UP19K-110F-H9**

Измеритель мощности в комплекте с детектором мощности предназначен для измерений средней мощности непрерывного и импульсно-модулированного лазерного излучения (рис. А12). Соответствует рангу рабочего средства измерений средней мощности согласно поверочной схеме ГОСТ 8.275-91. Область применения - измерение и контроль мощности пучков лазерного излучения в различных областях науки и техники. Характеристики прибора см. в инструкции по эксплуатации измерителя мощности.



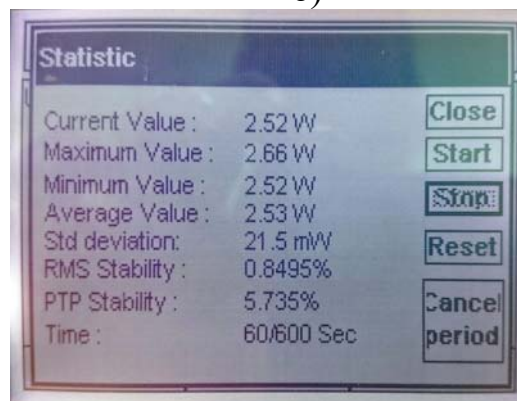
а)



б)



в)



г)

Рис. А12 а, в) Общий вид одноканального измерителя мощности Gentec-EO; б) Общий вид детектора мощности UP19K-110F-H9; г) Окно STATISTIC

### **Основные и необходимые операции:**

- **Установление предела измерения:**  
если на дисплее измерителя появляется надпись Out, то следует изменить предел измерений. Нажать на кнопку «Menu», с помощью джойстика выбрать «Scale», нажать на значение «Avto».



**Важно!** При работе с мощностью свыше 10 W требуется включить вентилятор на детекторе мощности. Ни в коем случае не производить измерения в фокальной плоскости объектива (в плоскости перетяжки)

- **Выбор длины волны измерения:**  
перед началом измерений необходимо убедиться, что измеритель настроен на нужную длину волны, нажать на кнопку «Menu», с помощью джойстика выбрать «Setting», выбрать вкладку «Wavelength», после выбрать «Wavelength».
- **«Сброс на ноль» измерителя мощности:**  
Нажать на кнопку «Menu», с помощью джойстика выбрать «Ctrl», выбрать вкладку «Zero offset», выбрать «ReZero». Проводить данную процедуру рекомендуется перед началом измерений при выключенном (или заблокированном) лазерном излучении.
- **Проведение измерений в режиме «STATISTIC»:**  
Нажать на кнопку «Menu», с помощью джойстика выбрать вкладку «Statistic». Для начала измерений нажать кнопку «Start» на измерителе мощности, по истечении времени измерений нажать кнопку «Stop» и записать значения Average Value (среднее значение) и Standard Deviation (стандартное отклонение). Перед началом следующего измерения нажать кнопку «Reset», чтобы обнулить предыдущие результаты.

**Приложение Б. Основные теплофизические и оптические параметры некоторых материалов**

Таблица Б1.  
Параметры металлов

Параметры / Металл	Железо	Титан	Алюминий
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7900	4540	2700
Теплоемкость, $c$ , Дж/кг*К	450	570	920
Теплопроводность, $k$ , Вт/м*К	50,0	21,9	233,0
Температура плавления, $T_{пл}$ , °С	1800	1668	660
Температура кипения, $T_{кип}$ , °С	3145	3280	2447
Коэффициент отражения, $R$ , ( $\lambda=1.06$ мкм)	0,75	0,70	0,93

Таблица Б2.  
Ориентировочные значения параметров для картона

Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, $k$ , Вт/м*К	Теплоемкость, $c$ , Дж/кг*К	Температура разрушения, $T_p$ , °С	Показатель поглощения, $\alpha$ , м <sup>-1</sup>	Поглощательная способность, $A$
				( $\lambda=10.6$ мкм)	
700	0,25	1500	600	100	0.55

Таблица Б3.  
Ориентировочные значения параметров краски

Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, $k$ , Вт/м*К	Теплоемкость, $c$ , Дж/кг*К	Температура плавления, $T_{пл}$ , °С	Температура кипения, $T_{кип}$ , °С	Коэффициент отражения $R$ , ( $\lambda=1.06$ мкм)
1600 – 3100	0,18– 0,40	650– 2000	0,07	120– 130	0,85

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ**

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые в середине прошлого века лазеры сегодня широко проникли в промышленность, связь, строительство, транспорт, медицину, биологию, экологию, искусство, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, оптические диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей и т.д. Входят в жизнь лазерные аддитивные технологии, когда детали и устройства создаются за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом за счет его «добавления» - послойного наращивания.

На повестке дня сегодня разработка лазерного управляемого термоядерного синтеза, лазерных реактивных двигателей, и многое другое.

### **История кафедры Лазерных технологий и систем**

Кафедра Лазерных технологий и систем образована в 2016 году путем объединения трех кафедр – Лазерной техники и биомедицинской оптики (ЛТБМО), Лазерных технологий и экологического приборостроения (ЛТиЭП) и Оптике лазеров (ОЛ). История кафедры начинается в 1963 году, когда, всего через три года после создания первого лазера, К.И. Крыловым была создана кафедра квантовой радиоэлектроники, впоследствии получившая название «Кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики».

Кафедра первой в России начала подготовку и выпуск специалистов по новому направлению в науке и технике – квантовой электронике, лазерной физике и технике. С самого начала создания кафедры серьёзное внимание было уделено фундаментальной подготовке в области математики и физики, физическому эксперименту, учебно–исследовательской работе студентов. В кратчайшие сроки была создана проблемная научно–исследовательская лаборатория, а затем и отраслевая лаборатория, что значительно расширило круг проводимых научных исследований и обеспечило их высокий научный уровень. Основными научными направлениями кафедры стали оптика лазеров, силовая и нелинейная оптика, радиооптика, неразрушающий контроль материалов и изделий, биомедицинская оптика.

В 1965 г. В.П.Вейко (учеником К.И. Крылова по кафедре спецфизики в ЛЭТИ) в ИТМО была организована лаборатория лазерных технологий (совместно с ЛКТБ «Светлана»), которая в 1975-76 гг. была преобразована в отраслевую (двух министерств – Высшего образования и Электронной промышленности), а в дальнейшем - в 1980 г. на базе лаборатории была создана кафедра, которая впоследствии получила название кафедры «Лазерных технологий и экологического приборостроения». В 1976 г. научные работы отраслевой лаборатории по «Физическим основам лазерной обработки тонких пленок» удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники». В 1983 и 1984 гг. – работы кафедры ЛТиЭП удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу, а в 1986 г. совместно с рядом других организаций - Государственной Премии СССР в области науки и техники за «Разработку и широкое внедрение в промышленность процессов лазерной обработки тонких пленок».

В 1994 г. кафедры ЛТБМО и ЛТиЭП выступили инициаторами организации новой специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», по которой в настоящее время ведут подготовку и систематический выпуск специалистов 11 вузов России.

С 2000 г. лаборатория и кафедра ЛТиЭП признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микро- и нанотехнологий», этот статус ежегодно подтверждается вплоть до 2015 г. В 2010 г. работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Премии Правительства России в области образования за «Создание

инновационной системы подготовки специалистов по лазерной обработке материалов».

За время существования кафедр ЛТБМО и ЛТиЭП подготовлено более двух тысяч специалистов в области лазерной техники и лазерных технологий, свыше 80 выпускников и сотрудников кафедр защитили кандидатские и докторские диссертации и более 20 имеют учёное звание профессора. По результатам работ кафедр издано более 15 монографий. Результаты исследований сотрудников изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах.

В настоящее время при кафедре действуют Международные Научные Лаборатории «Лазерных систем» под руководством проф Е.А. Викторова и «Лазерных микро– и нано технологий и систем» под руководством проф В..П. Вейко.



Эдуард Игоревич Агеев,  
Вадим Павлович Вейко,  
Сергей Георгиевич Горный,  
Галина Викторовна Одинцова,  
Андрей Анатольевич Петров

**Лабораторный практикум по лазерным  
микротехнологиям. Часть I. Лазерная обработка  
конструкционных материалов**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49**