### Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию

## Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики



### В.П.Вейко

### Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий»

## ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА



Санкт–Петербург 2007 Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физикотехнические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка. Изд. 2–е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 111 с.

Для студентов специальности «Лазерная техника и лазерные технологии», бакалавров и магистров направления «Техническая физика».

Курс также может быть полезен инженерам, ученым, маркетологам, менеджерам, которые применяют лазеры в микротехнологиях, для понимания преимуществ и ограничений использования лазеров в этой области, для повышения знаний в области процессов лазерной обработки и для их будущей работы.

Рекомендовано УМО по оптическому образованию в качестве учебного пособия для обучения студентов по специальности 072300 «Лазерная техника и лазерные технологии»



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

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

## -з-АННОТАЦИЯ

Опорный конспект содержит анализ и синтез проблем качества лазерной микрообработки.

Анализ включает рассмотрение следующих вопросов:

- какой режим, непрерывный или импульсный лучше для лазерной обработки?
- роль временной структуры импульса;
- роль жидкой фазы;
- роль пространственной структуры лазерного пучка;
- роль дополнительных факторов, влияющих на лазерную обработку: струя жидкости,

струя газа и т.д.

Синтез включает решение следующих задач:

– как выбирать оптимальный лазерный источник и как определить его важнейшие параметры: мощность, длительность импульса, форму импульса, частоту следования импульсов и т.д.;

- как выбрать оптимальную оптическую систему лазерной обработки;

как обеспечить необходимое поперечное и продольное распределение энергии в зоне обработки;

– как выбрать лучшие алгоритмы управления лазерной обработкой.

# СОДЕРЖАНИЕ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

- 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ (ЛМ)
- 3. ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ЛМ
- 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛМ
- 5. КАК УЛУЧШИТЬ КАЧЕСТВО ЛМ?
- 6. ВАЖНЕЙШИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ РАЗДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ

## -5-**1. ВВЕДЕНИЕ**

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ СОСТОИТ В ТОМ, ЧТОБЫ ОТВЕТИТЬ НА ВОПРОС:

## КАК УЛУЧШИТЬ КАЧЕСТВО И ТОЧНОСТЬ ЛМ В ПРОЦЕССАХ – ПРЕЦИЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ – ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ И МАРКИРОВКИ – УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ – СВЕРЛЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ

НА ПРИМЕРАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРОВ, МИКРОСИСТЕМНОЙ (MEMS) И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ, МЕХАНИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА И Т.Д.

## ОБЩАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

-6-



Рис. 1. 1 – лазер, 2 – блок питания, 3 – излучение, 4 – оптическая головка, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – координатный стол, 7 – система визуального контроля, 8 – система контроля параметров лазера, 9 – система контроля технологического процесса, 10 – микропроцессор.

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

### ИСПАРЕНИЕ

### — ДЛЯ ЛЮБЫХ МАТЕРИАЛОВ

### АБЛЯЦИЯ

НАГРЕВАНИЕ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ В НАГРЕТОМ СОСТОЯНИИ (СМ. ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ПО КУРСУ В.П.ВЕЙКО «ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ», ИЗД. СПБГУИТМО, 2008)

ЛАЗЕРНОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ И ДРУГИЕ ПРОЦЕССЫ, ТИПИЧНЫЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (СМ. В.П.ВЕЙКО, С.М.МЕТЕВ «ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ», ИЗД. БАН, СОФИЯ, 1991)

ПОСЛОЙНОЕ (3-X МЕРНОЕ) ЛАЗЕРНОЕ НАРАЩИВАНИЕ (СИНТЕЗ) – ИЗ БУМАГИ (LOM), ФОТОПОЛИМЕРОВ (СТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ) ИЛИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ (SLS) (СМ. ПЕРЕВОД КНИГИ В.СТИН «ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ»)

## ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



Рис.2. Общий вид произведенных лазером разрезов в стали: a) – с фронтальной, б) – с обратной стороны, а) плохое качество, б) хорошее качество в), г) – продольные сечения разрез, в) плохое качество, г) хорошее качество

## ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

## ЧТО ДОЛЖНО БЫТЬ РАССМОТРЕНО?

I. Параметры лазерного луча как инструмента микроформообразования

- Временные и энергетические характеристики –зависят от параметров лазера
- Пространственно геометрические характеристики –зависят главным образом от параметров оптической системы

II. Процессы взаимодействия лазерного излучения с материалами, в частности нагревание, испарение, появление жидкой фазы, реактивное давление отдачи паров и другие.

III. Дополнительные и сопутствующие факторы, влияющие на результат лазерной обработки: поддув газа и жидкости, пред– и постобработка, и так далее.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

## ОБЩАЯ СХЕМА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛМ Поглощение

лазерного излучения по закону  $q(x) = q_0(1-R)e^{-\alpha x}$ 

на глубине проникновения  $\delta = \frac{1}{\alpha} \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  см (для металлов)

## Нагрев

материалов до точки плавления Тпл

## Плавление

после поглощения скрытой теплоты плавления L<sub>пп</sub>

### Нагрев

до температуры испарения (кипения)  $T_{\mu} = T_{\kappa}|_{P=P_{orm}}$ 

### Испарение

после поглощения скрытой теплоты испарения L<sub>и</sub>

### Движение фронта испарения

внутрь материала со скоростью V<sub>0</sub>

Требуемая энергия Е (пренебрегая теплопроводностью) равна

Ε

$$= \Omega \left[ \rho c T_{nn} + L_{nn} + \rho c \left( T_{\mu} - T_{nn} \right) + L_{\mu} \right]$$
(2.1)

где  $\Omega = hS$  — объем зоны нагрева

### - 11 -ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ ЛМ (1)

Для плотности мощности  $q = \frac{F}{St}$  (S — площадь светового пятна на поверхности материала,

*t* — длительность воздействия) уравнение (1) преобразовывается в :

$$q = \frac{h}{t} \left( \rho c T_{\mu} + L_{\mu \mu} + L_{\mu} \right)$$
(2.2)

где обычно  $\rho c T_{\mu} \approx 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>,  $L_{nn} \leq 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>,  $L_{\mu} \geq 10^4$  Дж/см<sup>3</sup>

Скорость проникновения фронта испарения  $V_0$  вглубь материала (в предположении, что поглощенная энергия потрачена только на испарение (пренебрегая  $\rho c T_{\mu}$ ,  $L_{nn} << L_{\mu}$ ) равна:

$$V_0 = \frac{q}{L_{\mu}}$$
(2.3)

С другой стороны, скорость V может быть выражена через температуру поверхности *T*<sub>0</sub> (согласно модели твердого тела) формулой Френкеля:

$$V_0 \approx C_{_{3B}} \exp\left(-\frac{T^*}{T_0}\right)$$
(2.4)

где  $C_{_{3B}}$  — скорость звука в твердых телах,  $T^* = \frac{L_{_{M}}}{K}$ , (k — постоянная Больцмана,  $T^*$  — температура испарения,  $L_{_{M}}^*$  — это  $L_{_{M}}$ , рассчитанная на атом).

## - 12 - ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ (2)

Вычисленные по формулам (2) и (3) величины T<sub>0</sub>, V<sub>0</sub> приведены в таблице 1.

Таблица 1

NN	<i>q</i> , Вт/см <sup>2</sup>	<i>Т</i> <sub>0</sub> , К	<i>V</i> <sub>0</sub> , см/с	<i>h</i> , см
1	10 <sup>6</sup>	4050	14.3	$2.5 \cdot 10^{-2}$
2	$5\cdot 10^6$	4800	70.0	$5.2 \cdot 10^{-3}$
3	10 <sup>7</sup>	5100	$1.42\cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
4	$5\cdot 10^7$	6400	$6.8\cdot10^2$	5.3 · 10 <sup>-4</sup>
5	10 <sup>8</sup>	7000	$1.32\cdot 10^3$	2.7 · 10 <sup>-4</sup>

h — глубина отверстия в одномерной модели испарения

## - 13 -ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ (3)

– Глубина отверстия h увеличивается линейно с длительностью импульса  $\tau$ , со скоростью  $V_0$ :

$$h = V_0 \tau = \frac{q}{L_{\mu}} \tau$$
 (2.5)

– Диаметр отверстия не увеличивается:  $d = d_0 = \text{const}$ 

– Отсутствует жидкая фаза – только испарение

– Высокая точность

- Высокое качество



мерной модели микроформобразования.

Но одномерная модель не работает после  $t > t_0$ , когда  $h > d_0$ . Почему?

## - 14 -ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (1)





Рис. 2.3. Общий вид «лазерных» отверстий в стали. Длительность импульса: a) ~ ms, b) ~  $\mu$ s, c) ~ ns, d) ~ fs

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (2)



Рис. 2.4. Поведение жидкой фазы в течении (а) и после (б, в) лазерной обработки.

### - 16 -ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (1)

Одномерная модель не может применяться для описания кинетики изменения отверстия, как только глубина отверстия *h* становится сопоставимой с размером светового пятна *r*<sub>0</sub>, т.к. кинетикой его формирования дальше пренебрегать нельзя.

Увеличение глубины *h* может быть описано, как прежде, моделью испарения, но определение диаметра отверстия *d* более сложно из–за взаимодействия многих факторов, влияющих на нагревание и разрушение стенок.

Прежде всего надо учитывать появление жидкой фазы из–за плавления материала между изотермами испарения поверхности *Т*<sub>и</sub> и плавления *T*<sub>пп</sub> (под поверхностью).

Другие важные факторы, которые влияют на процесс формирования отверстия (рис. 2.2, 2.3): – конденсация пара,

- прямое поглощение света стенками из-за расфокусировки луча,
- рассеяние света паром,
- радиационный и конвективный теплообмен между струей пара и стенками,
- теплопроводность.

К этим явлениям следует добавить:

- реактивное давление отдачи паров, которое должно удалять расплавленный материал из отверстия,

- эффекты экранирования лазерного излучения продуктами испарения-плазмой.

## \_ 17 \_ ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (2)





Рис. 2.5. Схематическая диаграмма двумерного микроформообразования

Рис. 2.6. Диаграмма временного изменения глубины отверстия h и диаметра d = 2r при условии совпадения фокальной плоскости линзы с поверхностью.  $\gamma$  — половина угла светового конуса,  $tg\gamma = (D_0 - \alpha I)/2F$ ,  $D_0$  — диаметр источника излучения, I — это расстояние между лазером и передним фокусом линзы с фокусным расстоянием F,  $r_0$  — начальный радиус отверстия (равен радиусу светового пятна),  $\alpha$  — угол расходимости луча.

### - 18 -ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (3)

При описании реальных процессов формирования отверстия будем предполагать, что материал со дна отверстия только испаряется, в то время как со стенок удаляется в виде расплава под действием давления паров. Кроме того, температурной зависимостью полной теплоты испарения (*L*(*T*<sub>0</sub>) ≈ *L*<sub>N</sub>) и экранированием поверхности испарения продуктами разрушения будем пренебрегать. Уравнение энергетического баланса в отверстии в любой момент времени может тогда быть записано как:

$$P(t)dt = L_{\mu}\pi r^{2}(t)dh + L_{\mu}2\pi r(t)h(t)dr \qquad (2.6)$$

где P(t) — текущее значение поглощенной лучистой мощности, и  $L_{nn}$  — скрытая теплота плавления.

Следующее условие мы можем получить, используя экспериментальные данные (скоростную киносъемку), в соответствии, с которыми в большинстве случаев текущий радиус отверстия r(t) и глубина h(t) связаны уравнением светового конуса для крайних лучей с углом раствора 2 $\gamma$  (рис. 2.6):

$$r(t) = r_0 + \operatorname{tg} \gamma h(t) \tag{2.7}$$

Решение системы уравнений (2.6) и (2.7) для P(t) = const дает следующие результаты:

### – 19 – ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (4)

при  $h(t) < r_0$ 

$$h(t) \approx \frac{Pt}{\pi r_0^2 L_{\mu}} \quad (2.8), \qquad r(t) \approx r_0 + Pt \frac{\mathrm{tg} \gamma}{\pi (r_0 L_{\mu})} \quad (2.9)$$
  
при  $h(t) \gg r_0$   
$$h(t) \approx \left[\frac{3Pt}{\pi \mathrm{tg}^2(\gamma)(L_{\mu} + 2L_{\mu}))}\right]^{1/3} \quad (2.10), \qquad r(t) \approx \mathrm{tg} \gamma h(t) = \left[\frac{3Pt \mathrm{tg} \gamma}{\pi L_{\mu} + 2L_{\mu}}\right]^{1/3} \quad (2.11)$$

На начальных стадиях формирования отверстия его диаметр изменяется незначительно, в то время как его глубина растет линейно со временем вследствие испарения материала по всей площади светового пятна (как в одномерной модели испарения). Позже, комбинация интенсивного плавления стенок отверстия и выброс жидкой фазы ведет к замедлению скорости увеличения глубины; в предельном случае ( $t \to \infty$ ) глубина и радиус растут пропорционально  $t^{\frac{1}{3}}$ , то есть форма отверстия не изменяется.

Данная модель может использоваться для вычисления конечных размеров отверстия в металлах к концу лазерного воздействия (для простоты предполагаем, что  $L_{\mu} >> L_{nn}$  и  $W_i = P_i \tau$  — полная энергия импульса,  $P_i$  — импульсная мощность).

## КАКИЕ ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ОГРАНИЧИВАЮТ КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ? (1)

Теперь мы можем заключить, что практически в любом реальном процессе формирования отверстий и резки существенная доля жидкой фазы остается на стенках после окончания лазерного импульса.

Формирование большого количества жидкой фазы и ее неполное удаление из отверстия — это наиболее неблагоприятный и трудноуправляемый фактор, который ведет к значительному уменьшению эффективности и ухудшению качества сверления отверстий.

Перераспределение жидкой фазы до кристаллизации оказывает решающее влияние на окончательную форму отверстия. В результате ее перераспределения, форма отверстия в момент отвердевания может существенно отличаться от формы, определенной геометрией луча, кинетикой испарения и гидродинамикой выброса жидкой фазы в конце лазерного импульса.

## КАКИЕ ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ОГРАНИЧИВАЮТ КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ? (2)

Основные причины увеличения количества жидкой фазы:

- уменьшение плотности светового потока из-за постепенной расфокусировки луча с ростом глубины отверстия;
- медленный спад мощности в конце импульса, что способствует увеличению объема остатка жидкой фазы в отверстии после окончания импульса;
- длительность действия.

•

Чем дольше время воздействия, тем больше объем жидкой фазы и, поэтому, больше разброс размеров отверстия и реза.

Кроме того, большое время воздействия вызывает увеличение глубины зоны теплового влияния (прогретого слоя), где происходят окисление и структурные изменения, и появление дефектов на поверхности отверстия.

Другие источники погрешности в лазерном формировании отверстия:

- неоднородность распределения по сечению интенсивности луча из-за модового характера лазерного излучения;
- размывание светового пятна при обработке в фокальной плоскости из-за отсутствия его резких границ.

- 22 -

## ВЫВОДЫ ИЗ РАССМОТРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛМ

1. Главный фактор, ограничивающий качество лазерной микрообработки — появление жид-кой фазы и ее неполное удаление в процессе обработки.

2. Главная причина появления жидкой фазы — плавление материала на глубину, приблизительно оцениваемую как:

$$x_{nn} \sim \sqrt{a\tau}$$
 (2.12)

3. Главная причина удаления жидкой фазы в отсутствие внешних факторов — действие давления паров отдачи Р<sub>отд</sub>, которое приблизительно оценивается как:

$$P_{\text{otd}} \approx \frac{F_{\text{otd}}}{S} = \frac{mW}{S\tau} \sim \frac{W}{\tau} \sim \frac{q}{\tau}$$
(2.13)

4. Чтобы обеспечить условия для минимизации жидкой фазы необходимо оптимизировать параметры лазерного луча как инструмента микрообработки, а именно:

- энергетические и временные характеристики, которые зависят от параметров лазерного источника
- пространственные характеристики, которые зависят от параметров оптической системы и лазерного пучка
- характеристики взаимодействия лазерного пучка с материалом

## 3. ЛАЗЕРЫ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ

## НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ

- Вид воздействия непрерывный или импульсный
- Мощность излучения, Р
- Длина волны, λ
- Длительность импульса, τ
- Частота следования импульсов, f
- Пространственные характеристики модовой структуры иизлучения TEM<sub>mn</sub>
- Расходимость пучка, α

## КАКОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЛУЧШЕ — НЕПРЕРЫВНЫЙ ИЛИ ИМПУЛЬСНЫЙ?

Для непрерывного излучения пороговая плотность мощности испарения определяется как:

$$q_{\rm H} = \frac{kT_{\rm u}}{Ar_{\rm o}} \tag{3.1}$$

для стали (A — коэффициент поглощения (A = 1 - R), при  $T_{\mu} = 3000$  K, A = 0.5 ( $\lambda = 1.06$  мкм), k — коэффициент теплопроводности, k = 0.32 Вт/см · К,  $r_0$  — радиус поперечного сечения луча в фокальной плоскости, ( $r_0 = 10$  мкм) получаем:  $q_{\mu} = 1.9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Соответствующая мощность лазера равна:

$$P_{\rm H} = qS \tag{3.2}$$

где S – площадь лазерного пятна, и таким образом  $P_{\mu} \approx 6.0$  Вт.

Для импульсного лазерного источника с теми же параметрами и соответствующим тепловым режимом пороговая плотность мощности может быть выражена как:

$$q_{\mu} = \frac{kT_{\mu}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}}$$
(3.3)

(*a* — коэффициент теплопроводности,  $a = 3.45 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с для стали), что дает величину  $q_{\mu} \approx 0.9 \cdot 10^{6}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Кроме того, можно вычислить импульсную мощность,  $P_{\mu}$ , согласно (5) и среднюю мощность  $\overline{P}_{\mu}$ :

$$\overline{P}_{\mu} = P_{\mu}f\tau = W_{\mu}f \tag{3.4}$$

(*f* — частота повторения (следования) импульсов),  $P_{\mu} \approx 2.8$  Вт and  $\overline{P}_{\mu} = 7 \cdot 10^{-2}$  Вт при  $\tau = 10^{-4}$  с, *f* = 50 Гц.

Итак, из (3.1, 3.2) и (3.3, 3.4) мы можем заключить в общем случае следующее:

$$\frac{\overline{P}_{\mu}}{P_{\mu}} = f\tau \frac{r_0}{\sqrt{a\tau}}$$
(3.5)

при выше приведенных параметрах 
$$\frac{r_0}{\sqrt{a\tau}} \approx 1$$
 и  $\frac{\overline{P_{\mu}}}{P_{\mu}} \sim f\tau$ : для  $f = 250$  Гц и  $\tau = 10^{-4}$  с  $\frac{\overline{P_{\mu}}}{P_{\mu}} = 10^{-2}$   
для  $f = 1$  кГц и  $\tau = 10^{-3}$  с  $\frac{\overline{P_{\mu}}}{P_{\mu}} = 10^{-6}$ 

Теперь мы можем сделать первый важный вывод: с энергетической точки зрения импульсный режим работы лазера для микрообработки намного лучше, чем непрерывный.

Заметим далее, что физические процессы при импульсной периодической резке во многом совпадают с таковыми при сверлении отверстий, так как рез образуется как совокупность отдельных отверстий.

## КАКОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРА ЛУЧШЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КАЧЕСТВА МИКРООБРАБОТКИ— НЕПРЕРЫВНЫЙ ИЛИ ИМПУЛЬСНЫЙ?

Для качественной микрообработки необходимо обеспечить следующие условия:

**1. Минимальное количество образующейся жидкой фазы.** Количество жидкой фазы оценочно пропорционально √*а*τ (формула 2.12)

2. Максимальное количество жидкой фазы удаляемой из зоны обработки (отверстия, разреза и так далее) в ходе процесса за счет давления паров.

Давление пара отдачи приблизительно пропорционально  $\frac{1}{\tau}$  (формула 2.13)

Оба фактора указывают на то, что ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ (ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА) ДОЛЖНО БЫТЬ НАСТОЛЬКО КОРОТКИМ (В ПРЕДЕЛАХ РАЗУМНОГО (?)) НАСКОЛЬКО ВОЗМОЖНО.

## - 27 -ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (1)

#### 1. Мощность излучения лазера

должна обеспечить нагревание поверхности до  $T_{\mu} \leq 10000$  К (например, для вольфрама  $T_{\mu} = 5600$  К). Для этой температуры можно вычислить необходимую плотность мощности в соответствии с формулой (6). Для стали, например, при  $\tau \sim 10^{-4}$  с мы получим  $q_{\pi} \sim 3 \cdot 10^{6}$  BT/cm<sup>2</sup>. Принимая во внимание потери в оптической системе и т. д., примем необходимую плотность мощности  $q_{\pi} = 10^{7}$  BT/cm<sup>2</sup>. В фокальном пятне диаметром  $d_{0} \sim 100$  мкм мы будем иметь мощность лазера  $P = q_{\pi} \cdot S \approx 10^{3}$  BT.

## Итак, мощность лазера *P* ≈ 1 кВт — это и есть типичная необходимая импульсная (или непрерывная) мощность для микрообработки.

В этом случае режим генерации (непрерывный, сканирующий или импульсно-частотный, подвижным или неподвижным пучком) определяет только тип операции, как то сверление, разрезание, гравировка и так далее, но не величину мощности.

#### 2. Длина волны λ

должна лежать в области большой поглотительной способности материала (в видимой для металлов и других конструктивных материалов, ИК–области для стекла, ультрафиолетовой для полимеров) зависящей от оптических характеристик материала (*R*, *A* = 1-*R*,  $\delta = \frac{1}{\alpha}$ ).

## ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (2)

3. Длительность импульса τ (1).

#### Определяет следующие характеристики процесса:

пороговую плотность мощности,

- глубину проплавленного слоя  $x_{nn} \sim \sqrt{a\tau}$  (формула 3.6),
- величину давления отдачи паров  $P_{\mu} \sim \frac{W_{\mu}}{\tau}$  (формула 3.7),
- величину термомеханических напряжений *F* ~ √τ (приблизительно),
- эффект экранирования падающего излучения парами,
- стабильность размеров облучаемой площадки (нестабильность ~  $\sqrt{ au}$  ),
- стабильность пороговой плотности мощности (зависит также от размера облучаемой зоны)

По всем этим причинам чем меньше длительность импульса, тем лучше (по крайней мере в пределах справедливости тепловой модели, до  $\tau = 10^{-9} - 10^{-12}$  с).

### Комментарии:

- эффективное время воздействия для лазеров непрерывного режима τ = d<sub>0</sub>/V<sub>ск</sub> (3.8), где d<sub>0</sub> — фокальный диаметр пятна, V<sub>ск</sub> — скорость сканирования.
- в любом случае нужно проверить условие (3.3) используя (3.8).
- также надо принять во внимание, что *h*<sub>μ</sub> ~ *V*<sub>0</sub>τ, и чем меньше τ, тем меньше глубина отверстия *h*, проделанная за один импульс.

## - 29 -ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (3)

### 3. Длительность импульса (2)

Так или иначе мы имеем следующие варианты реализации различного времени воздействия

Длительность воз- действия, с	Тип лазера
10 <sup>-3</sup>	Nd–YAG–лазер — режим свободной генерации, импульсный CO <sub>2</sub> –лазер, сканирующий CO <sub>2</sub> –лазер, сканирующий Nd–YAG–лазер, сканирующий Ar– ion–лазер
10 <sup>-6</sup>	Nd–YAG–лазер: акусто–оптическая модуляция, электрооптическая моду- ляция, диодная накачка. Импульсный СО <sub>2</sub> –лазер
10 <sup>-9</sup>	Азотный лазер, лазер на парах меди, эксимерные лазеры
10 <sup>-12</sup>	Nd–YAG–лазер: режим самосинхронизации импульсов, эксимерные лазе- ры
10 <sup>-15</sup>	Ті–сапфир–лазер: режим самосинхронизации импульсов, эксимерные ла- зеры
10 <sup>-18</sup>	Ті–сапфир–лазер

## - 30 -ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (4)

### 4. Частота следования импульсов f

влияет на температуру материала, которая меняется после окончания каждого импульса и средняя температура может понижаться, но если частота следования больше  $f_{\rm kp} = \frac{a}{30r_0^2}$ , то изменения T не будет наблюдаться, и, таким образом, результат воздействия будет зависеть только от мощности и энергии отдельных импульсов. Например, если  $f = 10^2 < \frac{a}{30r_0^2} = 1.0 \cdot 10^3$ 

для стали ( $a = 3.45 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ ) при  $r_0 = 10$  мкм  $f_{\text{кр}} = \frac{3.45 \cdot 10^{-2}}{30 \cdot 10^{-6}} \approx 10^3$ .

Другое заключение, полученное из оценок, доказанных выше — это то, что лазерная резка в импульсном режиме сводится к сверлению отверстий в импульсном режиме по многим параметрам, потому что разрез формируется из отдельных отверстий.

Также от f может зависеть экранирующий эффект падающего излучения если  $f > \frac{V_{ck}}{d_{o}}$ 

Таким образом, наиболее важная роль частоты следования импульсов *f* состоит в:

- прямом влиянии на производительность микрообработки,
- выборе типичных технологических операций,
- экранировке зоны воздействия (при многоимпульсных или высокочастотных процесах).

## - 31 -ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (5)

5. Пространственные характеристики модовой структуры (ТЕМ<sub>mn</sub>) лазерного пучка



## - 32 -ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (6)

6. Расходимость пучка

$$\alpha = A_{\mu} \frac{\lambda}{b_{\mu}}$$
(3.9)

где α — полный угол расходимости пучка, λ — длина волны, *b*<sub>д</sub> — характерный размер выходного окна лазера, ответственного за дифракцию, *A*<sub>д</sub> — коэффициент, отвечающий за распределение интенсивности в поперечном сечении пучка.

Величины *b*<sub>д</sub> и *A*<sub>д</sub>, и α для разных лазерных пучков приведены в таблице 2.

Таблица	2
---------	---

Тип лазерного пучка	b <sub>д</sub>	A <sub>d</sub>	Полный	Комментарии
			угол	
Одномодовый (Гауссово рас-	2w <sub>0</sub>	3	$1.26\frac{\lambda}{-}$	$D \approx 2w_0$ , $w_0$ — радиус перетяжки Га-
пределение)			D	уссова пучка
Многомодовый	D/	1.26	$1.26^{\lambda}$ /M	N <sub>b</sub> — число отдельных пучков в по-
	/ √N		$1.20 - \sqrt{D} \sqrt{N}$	перечном сечении
Дифракционно ограниченный	D	2.44	$244^{\lambda}$	
			2.44 <u></u> D	

#### - 33 -

## ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (1)

Основные импульсные твердотельные лазеры

Таблица 3

Тип лазера	Длина волны λ, мкм	Энергия импульса. Дж	Продолжительность импульса τ, с	Частота повторения импульсов <i>f</i> , Гц	Расходимость луча α, мрад	Эффективность η, %	Примечания
Nd–YAG, свободная генерация	1.060	1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>2</sup>	1–10	1–3	
Nd–YAG, акусто– оптическая моду- ляция добротности	1.060	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>4</sup>	1	≤1	
Nd–YAG, электро- оптическая модуля- ция добротности	1.060	1(10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup> )	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-8</sup> )	10 <sup>2</sup> (10 <sup>5</sup> )	1	≤1	
Nd–YAG, диодная накачка Nd–Волоконный	1.060	10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup> 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>4</sup> 10 <sup>4</sup>	1–10 1–10	10 больше 20	
Ті–сапфир	0.6– 1.1.	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>8</sup>	0.5	<1	Будущее применение (перспективен для повыше- ния качества)
Полупроводниковые линейки	0.75– 0.98	Средня	яя мощность до 100 Вт	г и более	250x150	>10	Будущее применение (эффективен для снижения стоимости

- 34 -

## ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (2)

Основные импульсные газовые лазеры

Таблица 4

Си–пары	0.510– 0.570	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>4</sup>	1	1	
		Экс	имеры				
XeCl	0.308	0.1	4.0				Размер луча 10x30 mm
KrF	0.249	0.1-	10-   1	10–500	1x3	1	Средняя мощность
ArF	0.193	100	00				до150 Вт
CO <sub>2</sub> –RF с радиочастотной накачкой	10.6	5 · 10 <sup>−</sup> 2	10 <sup>-4</sup>	100– 2500	4	≤10	
	10.6	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>2</sup>	2.5	≤10	Накоммориориий
$CO_2 - I EA$	10.0	20	10 <sup>-6</sup>	200	10	≤10	пекоммерческий

– 35 –

## ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ (3)

Основные лазеры непрерывного режима Таб							
Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Мощность <i>Р</i> , Вт	Расходимость луча $\alpha$ , мрад	Эффективность η, %	Примечания		
Nd–YAG, ламповая накачка	1.06	10–2000	1–10	3	Возможна бо́льшая мощ- ность		
Nd–YAG, диодная накачка	1.06	20	1–10	10	До 10 кВт в исследовании		
Nd–YAG волоконный — диодная накачка	1.06	50	1	больше 20	До 10 кВт (2004 г.)		
СО <sub>2</sub> , с медленной осевой прокачкой	10.6	100–1000	1	10			
СО <sub>2</sub> , мощный	10.6	200					
С медленной осевой про- качкой, диффузионно– охлаждаемый, многопучко- вый							
С быстрой осевой прокачкой и конвективным охлаждени- ем		Обычно не для точного мик- роформообразования					
С поперечной прокачкой и конвективным охлаждением							
Газодинамический с конвек- тивным охлаждением		Б					
Аr–ион	0.50	20					

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

- Высокая однородность и стабильность параметров излучения
  - Эффективность (кпд)
  - Высокие эксплуатационные характеристики

Достаточный ресурс и надежность Минимальный вес и размер Простая конструкция

• Экономическая эффективность
– 37 –

# 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Любая оптическая система для ЛМ должна обеспечить три основные группы требований:

#### Энергетические :

- плотность мощности излучения, достаточную для выполнения заданного типа поверхностной обработки,
- максимальное использование энергии лазера, с учетом потерь на диафрагмах (виньетирование) и на оптических компонентах (Френелевское отражение и остаточное поглощение)

#### К точностным параметрам относятся:

- необходимость формирования зоны обработки заданной и строго очерченной формы,
- необходимость формирования изображения зоны воздействия с минимальной неровностью края

#### При рассмотрении требований к ОС 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

## – <sup>38</sup>– ФОКУСИРУЮЩАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ЛМ

Основные пространственно–геометрические модели лазерных источников Гауссова модель лазерного источника (одномодовый режим)



**Телецентрическая модель лазерного источника (многомодовый режим)** (оси всех пучков || оптической оси, все направления внутри α равноценны)



фокальное пятно  $d_0 = \alpha F$ , глубина резкости  $I = 2d_0 F/D$ теоретические пределы:  $d_0 = \lambda F/D \approx \lambda$ ;  $L \approx 2d_0^2/\lambda \approx 2d_0$ Пример: при  $\alpha = 10^{-3}$  рад, F = 1 см,  $d_0 = 10$  мкм,  $I_0 = 20$  мкм

#### - 39 -

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Таблица 6

	Теоретически	<u>.</u>			
Тип лазерного пучка (по-	Полный угол	Фокальный			
перечного распределе-	расходимости	расходимости диаметр пят- Фока		Примечания	
ния интенсивности)	луча	на	пределение пятна		
	$\alpha = 2\theta$	$d_0 = \alpha F$			
Гауссовый — одномодо-	λ	λ	I Ithr	вся энергия в	
вый	$1.26\frac{\pi}{D}$	$1.26\frac{\pi}{D}F$		фокальном	
	D	D	do (e-2)	пятне	
Супергауссовый — мно-	λ —	λ	Ithr	вся энергия в	
супертауссовый — мно-	$1.26\frac{\pi}{D}\sqrt{N}$	$1.26\frac{n}{D}\sqrt{NF}$		фокальном	
Томодовый	D	D	$d_0(e^{-2}) = d_0(0.86)$	пятне	
	<u>^</u>		$-\frac{1}{1}$ Ithr	в центральном	
Однородный — дифрак-	$2.44 \frac{\lambda}{-}$	2.44 - F		максимуме	
ционно ограниченный	D	D	do(0.84)	84% энергии	
Теоретические (дальне-	$\sim \frac{\lambda}{\lambda}$	~ )			
польные) пределы	D				

Но что такое *d*<sub>0</sub> — минимальный размер воздействия?

Что будет если интенсивность воздействия на материал внутри  $d_0$  будет на уровне  $q > q_n$ ?

Ответ смотри далее

- 40 -

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

Фокусирующая техника характеризуется простотой, полным использованием лазерной энергии и оптическим разрешением (размером светового пятна), определяемым расходимостью пучка и фокусным расстоянием линзы.

Дальнейшее уменьшение размера пятна может быть достигнуто размерщением перед объективом телескопического расширителя пучка с увеличением  $\Gamma$  (сокращение расхождениия в  $\Gamma$  раз). При этом можно либо уменьшать  $d_0$ , либо увеличивать фокусное расстояние объектива *f* без изменения  $d_0$  ( $d_0 = \alpha_n f/\Gamma$ ).

Использование расширителя пучка в рабочей станции «КВАНТ–3» приводит к получению пятна диаметром 5 мкм с рабочим отрезком объектива объектива 70 мм. Такая большая величина рабочего отрезка обеспечивает размещение (если необходимо) образца с различными зондами, контактных измерительных и других устройств.

Главные недостатки фокусирующей техники:

- неоднородное распределение интенсивности в фокальном пятне и отсутствие постоянного размера зоны воздействия, который зависит от порога чувствительности материала,
- сложность обеспечения достаточной точности краев зоны воздействия при сканировании



-41-СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛМ (1)

А-тип: поверхность обработки расположена в фокальной плоскости линзы (сканирование с прямоугольной разверткой) a) б) 2-х мерное сканирование 3-х мерное сканирование (координатный стол) («летающая» оптика для послойного лазерного синтеза) в) г) 5- координатная ( $x, y, z, \phi, \psi$ ) роботизиро-(**}**-)<sub>V₀</sub> ванная микрообработка (волоконно-2-х мерная развертка (офсетная печать) оптический кабель в «руке» робота)

## - 42 -ТОЧНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ А-ТИПА

Важное замечание: очевидно, что для стабильных условий микрообработки (стабильного качества) необходимо обеспечить постоянство плотности потока мощности *q*. Из условий (2.2) и (3.8) видно, что требуемая величина *q* для сканирующих систем равна:

$$q = \frac{hV_{c\kappa}}{d_0}L_{\mu}$$
(4.1)

или относительно мощности лазера Р из (3.2) то же условие выражается как:

$$\frac{P}{V_{c\kappa}} = hd_0 L_{\mu} = \text{const} = B$$
(4.2)

Это означает, что стабильные условия подразумевают постоянство мощности лазера *P* и скорости сканирования пучка  $V_{c\kappa}$ . Это особенно важно для обработки образцов сложной формы с высокой скоростью. В этом случае невозможно поддерживать одинаковую скорость на прямых линиях и на крутых поворотах. Если  $V_{c\kappa}$  не константа, а изменяется в соответствии с некоторым законом  $V_{c\kappa}(t)$ , невозможно удовлетворить условию (4.2)  $P = BV_{c\kappa}(t)$  при никаком контроле мощности непрерывного лазера.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ТОЛЬКО ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ МОГУТ ОБЕСПЕЧИТЬ УСЛОВИЕ (4.2), Т.Е. ПОСТОЯННУЮ ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА МОЩНОСТИ В ОБРАБАТЫВАМОЙ ЗОНЕ И СТАБИЛЬНОЕ КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ. - 43 -СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛМ (2)

Б–тип: только центральная точка обрабатываемой поверхности находится в фокальной плоскости линзы (сканирующие системы с угловым отклонением пучка)







одномерное угловое отклонение 2-х мерная сканирующая система с внешней линзой

2-х мерная система типа линзы с "плоским полем"

## ТОЧНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ Б–ТИПА, КАК ФУНКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ (*L*, *f*) И ЛАЗЕРНЫХ (*D*, Ω) ПАРАМЕТРОВ



Инвариант Лагранжа–Гельмгольца Ј

$$J = D\Omega_0 = \text{const}$$
(4.3)

$$\Delta = \frac{d' - d}{d} \tag{4.4}$$

$$\Delta = \left( \frac{Z'}{Z'_0} \right)^2 / 2 + \left( \frac{y'}{f'_0} \right) / 2$$
 (4.5)

$$\Delta = \left(\frac{LI}{4Dd}\right)^2 \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{LI}{4Dd}\right)^2 \left(\frac{D}{d}\right)^2\right] \quad (4.6)$$

$$\Delta = \left[1 + 0.5\omega_0^2 \left(D/d\right)^2\right]$$
(4.7)

Из (4.5–4.7) ясно, что требования увеличения поля обработки *L* и разрешающей способности 1/*d* (уменьшения диаметра фокального пятна *d*) противоречат требованию снижения погрешности.





$$\beta_{\text{ocb}} = \frac{D_{\text{ofp}}}{D_{\text{m}}} = \Gamma_{\text{T}} \quad (4.8)$$

$$\beta_{\text{np}} = \frac{D_{\text{ofp}}}{D_{\text{m}}} = \frac{I_{\text{ofp}}}{I_{\text{ofp}}} = \frac{I_{\text{ofp}}}{I_{\text{ofp}}} \quad (4.9)$$

Из  $\beta_{ocb}$  и  $\beta_{np}$  возможно определить  $D_{M}$ ,  $d_{M}$ ,  $I_{M}$  и  $I_{obp}$  — все главные параметры схемы.

#### Энергетический расчет (Q — плотность энергии)

Пример: если дано  $D_{obp} = 1$  мм,  $d_{obp} = 5$  мкм,  $D_n = 1$  см,  $d_M = 100$  мкм, тогда из (4.5)  $\beta_{np} = 1/20$ ,  $D_M = 2$  см, из (4.4)  $\beta_{ocb} = 2$ , если  $F_M = 5$  см,  $I_M = 1$  м.

– 46 – КОНТАКТНАЯ (ТЕНЕВАЯ) ТЕХНИКА



$$egin{aligned} \beta_{np} = 1, \ Q_{_{\!M}} = Q_{_{\!M}} = Q_{_{\!O}\!Op} \ Q_{_{\!M}}^{nop} > Q_{_{\!O}\!Op}^{nop} \end{aligned}$$

## - 47 -АКТИВНАЯ ПРОЕКЦИОННАЯ ТЕХНИКА



Рис. 4.9 Принципиальная схема активного проекционного метода



Рис.4.10.Энергетическая эффективность  $\eta$ , а) и плотность мощности k, б) активной и пассивной проекционной системы как функция относительного размера прозрачного окна в маске: 1 —  $b = \infty$ , 2 — b = 4, 3 — b = 0, 4 — пассивная микропроекционная система

## – 48 – ПРОЕКЦИОННО–СКАНИРУЮЩАЯ ТЕХНИКА



Рис. 4.11. Принципиальная схема контурно-проекционного метода.



#### Достоинства:

• энергетические потери составляют всего:

$$\eta = \frac{2r^2}{\pi r^2} \approx \frac{2}{3}$$

• нет противоречий между разрешающей способностью  $d_{\text{обр}}$  и полем изображения  $D_{\text{обр}}$ 

## ВОЛОКОННО–ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ВОС) ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Применяются ДЛЯ доставки и распределения лазерного излучения по рабоместам. ВОС чим могут улучшать качество пучка и обеспечить передачу достаточно больших мощностей до 1 кВт одномодовому ПО волокну и до 50 кВт многомодовому ПО оптическому кабелю.

Выходная апертура волокна — 0.22, требуется ее согласование с лазером (ввод) и объектом (фокусировка).

Рис. 4.12. Структура ВОС доставки.

## ТАКТИЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА "HIGH-YAG" ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА (рис. 4.13)

- 50 -



Оптический кабель

Обрабатываемая деталь

## 5. КАК УЛУЧШИТЬ КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ ?

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ, ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ (1)

#### Длительность импульса

Микрообработка лазерным импульсом налагает противоречивые требования на длительность импульса. Формирование глубоких отверстий и разрезов требует увеличения длительности воздействия, т.к. другой способ повышения плотности потока выше 5 · 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> нецелесообразно из–за поглощения излучения в факеле. Однако, получение глубоких отверстий посредством только увеличения длительности воздействия неизбежно ведет к образованию большого количества жидкой фазы, что недопустимо в прецизионной микрообработке.

Решение состоит в выборе коротких импульсов и высокой частоты их следования и плотности потока достаточно большой, чтобы обеспечить минимальное количество жидкой фазы и в то же время достаточно малой, чтобы избежать сильного поглощения света в факеле. Тогда требуемая глубина обработки достигается за несколько сотен импульсов.

## - 52 -КРУТИЗНА ФРОНТОВ ИМПУЛЬСА (2)

![](_page_51_Figure_1.jpeg)

Рис. 5.1. Пичковыи режим генерации лазера — наиболее популярный для сверления отверстий и резки

- увеличение длины переднего фронта  $t_1$  ведет к росту диаметра входного конуса  $\Delta r_h \sim \sqrt{at_1}$ ,
- увеличение длины заднего фронта ведет к понижению температуры в конце импульса и образованию большого количества жидкой фазы, а также к снижению давления отдачи паров P<sub>n</sub>, которого недостаточно для удаления расплава из отверстия (разреза)

Изучение влияния формы импульса на процесс удаления материала показывает, что не только крутизна переднего и заднего фронта импульса, но также огибающая в целом, очень важны при точной микрообработке. Крутизна переднего края воздействует главным образом на время  $t_{\mu}$  нагрева материала до температуры испарения. Чем меньше крутизна, тем больше  $t_{\mu}$  и размер зоны теплового воздействия и, поэтому, больше диаметр входного конуса. Полезно чтобы передний край импульса  $t_1$  был не длиннее чем  $0.1 r_0^2/a$ ; так при радиусе зоны облучения  $r_0 = 10.75$  и коэффициенте температуропроводности  $a \approx 3.45 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с —  $t_1 \leq 0.3$  мкс.

Требования к заднему фронту импульса для точной обработки: необходимо резко прервать процесс испарения при достижении желаемой глубины и формы. Это уменьшит до минимума формирование и перераспределение расплава и снизит вероятность плавления стенок. Поэтому, длительность заднего фронта импульса не должна превышать длительности переднего фронта. Лазерные импульсы с требуемыми параметрами могут быть получены разными путями — выбором соответствующих лазеров, использованием модуляции излучения или с помощью источников накачки с профилированным электрическим (и световым) импульсами накачки.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ, ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ (3)

Внутренняя структура импульса существенна при лазерной обработке в режиме пичковой генерации твердотельных лазеров (при общей длительности импульсов ~ 1 мс).

Пичковый режим генерации благоприятен для микрообработки. Его эффективность реализуется при использовании для удаления материала энергией каждого пичка при их высокой мощности и малой длительности (≈ 1 мкс), что заметно снижает потери на теплопроводность, нагрев и плавление.

Высокая точность обработки легко достигается в случае регулярного пичкового режима, т.е. когда все пички имеют одинаковую форму, длительность  $\tau_0$  и энергию, следуют с постоянными интервалами  $\tau_i$ , и обладают однородным пространственным распределением интенсивности. В результате, обработка осуществляется импульсами (пичками) с параметрами ( $\tau_0$ ,  $\tau_i$ , q) которые выбираются так, чтобы каждый импульс испарял материал с минимальным количеством расплава. Это может быть выполнено, если режим одномерного испарения устанавливается в течение действия каждого импульса. Если, кроме того, в течении интервала между пичками  $\tau_i$  испаряемая поверхность остынет до точки кристаллизации, то минимальное количество жидкости будет удалено со дна кратера. Время  $\tau_i$  должно быть достаточным для вылета паров из отверстия, что зависит от текущей глубины  $h_i$  отверстия и от скорости паров W. При  $W \sim 1$  км/с и  $h_i \approx 1$  мм,

должно выполняться условие:  $\tau_i > \frac{h_i}{W} = \frac{0.1 \text{ см}}{10^5 \text{ см/c}} = 10^{-6} \text{ c} = 1 \text{ мкс.}$ 

## ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ИМПУЛЬСА (4)

- 54 -

Разработаны многочисленные методы получения импульсов с регулярной временной структурой. Наиболее важные из них приведены в таблице 7. Таблица 7

N	Метод, тип лазера, генерация	Фотография ос- циллограммы им- пульсов	Как настраивать, управлять	Параметры пичков		
				Длительность <sub>т<sub>п</sub> , С</sub>	Частота сле- дования <i>f</i> <sub>п</sub> , Гц	вания импульсов генерации <i>f</i> <sub>и</sub> , Гц
1	Одновременная генерация в связан- ных (2х; 3х) резонаторах (сферический резонатор или линзовый резонатор (лазер на стекле с Nd))		Изменение радиуса зеркал (линз) и их взаимность располо- жения	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>5</sup>	1–10
2	Установка вращающегося диска с ма- лыми прорезями <i>d</i> ≤ <i>d</i> ₀ в фокальной		Изменение скорости вращения диаметра и размеров щели диска	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>5</sup>	100–500
	плоскости телескопа, помещенного в резонатор (Nd–стекло, Nd–YAG лазе- ры)					
3	Ультразвуковые колебания (УЗ) 100% отражающих зеркал с f ~ 30 kHz (ру- биновый лазер)		Изменение частоты УЗ–колебаний	10 <sup>-6</sup>	$3\cdot 10^3$	1–10
4	Электрооптический затвор на ячейке Поккельса (Nd–YAG laser)		Установка ячейки Покекельса в резона- тор	3 · 10 <sup>-8</sup>	5 · 10⁵	100–500
5	Акусто–оптический затвор (АОЗ) лазе- ра с непрерывной накачкой (Nd–YAG laser)		Установка АОЗ в ре- зонатор	10 <sup>-7</sup>	$1-5\cdot 10^4$	10000–50000
6	Лазеры с самоограниченными верхни- ми переходами на парах Cu, эксимер- ные		Источником питания	10 <sup>-8</sup>	-	до 50000
7	Пикосекундные (Nd–YAG) и фемтосе- кундные (Ті–сапфир) лазеры		Оптика лазеров	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-15</sup>	10 <sup>6</sup>	~ 1–10

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ, ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ (5)

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

![](_page_54_Picture_2.jpeg)

Рис. 5.2. Отверстия в дюралюминии, меди и феррите (ø 200 мкм) сделанные импульсом с регулярной временной структурой (можно видеть минимальное количество жидкой фазы).

## – <sup>56</sup> – ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (1)

#### Фокусирующая сканирующая техника с расположением рабочей поверхности в фокальной плоскости (тип А)

Для высокого качества обработки требования точности имеют наибольшую важность, такие как ограничения неровности края, обеспечение однородного облучения зоны и т.д. В этом случае резка сфокусированным лазерным пучком не выгодна по следующим причинам: 1) распределение энергии в пятне неоднородно, так что строго определенных размеров зоны воздействия нет, и 2) получение разреза с гладким краем путем наложения отверстий требует высокой степени перекрытия, что снижает производительность метода (рис. 5.3). Используя луч с прямоугольным поперечным сечением можно уменьшить неровность края и увеличить скорость резки. При заданном  $r_0$  и перемещении пятна  $b = u_0/f$  (f — частота следования импульсов), неровность  $\delta$  растет с увеличением  $u_0$  и уменьшением  $r_0$ :

$$\delta = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{u_0}{2r_0 f}\right)^2} \tag{5.1}$$

Т.о.  $u_{0\phi \kappa}$  ограниченно данным  $\delta$ . В то же время  $u_{0np}$  для прямоугольного пучка не зависит от  $\delta$ . Например для  $\delta = 0.05r_0 - u_{0np}/u_{0\phi \kappa} \approx 10$  и для  $\delta = 0.01r_0 - u_{0np}/u_{0\phi \kappa} \approx 20$ .

Однако, фокусирующая техника приемлема при высокой частоте следования импульсов (*f* = 10 – 100 кГц), особенно отмечается простота оптической установки.

![](_page_55_Figure_6.jpeg)

Рис. 5.3. Схематическая диаграмма лазерной резки пучком с круглым и прямоугольным поперечным сечением.

## – <sup>57</sup> – ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (2)

#### Проекционно-сканирующий метод (1)

Этот метод состоит, по существу, в формировании изображения в результате последовательного освещения образца по заданному контуру световым лучом со специальной перекрестной секцией, представляющей микропроекцию простого элемента (такого как квадрата).

Наиболее важные достоинства метода: 1) высокое оптическое качество обработанного зонального образца, обеспеченного квадратной формой изображения (образа), формирующего элемент и возможностью создания однородного распределения энергии (в отличие от обработки в фокусе оптической системы, где распределение энергии Гауссово), и 2) достаточно малые потери энергии на маске.

Контурно–проекционный метод имеет значительные преимущества для вырезки квадратной формой луча перед обработкой в фокальной плоскости оптической системы. Фокусирующие системы должны работать с колоколообразным поперечным распределением интенсивности луча. Плотность мощности на периферии светового пятна недостаточна для испарения и поэтому большая доля энергии импульса тратится на расплавление. Расплавленный материал удаляется из центра отверстия под действием давления отдачи пара в центре освещаемой зоны и, впоследствии, отверстие приобретает коническую форму, особенно на передней поверхности.

Напротив, диафрагма (маска) предотвращает облучение периферийной частью светового пучка, где плотность мощности недостаточна для испарения. В результате, освещенная зона становится точно определенной, и размер конуса на входе отверстия (реза) резко уменьшается особенно при малой длительности импульса  $\tau$ .

## – <sup>58</sup>– ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (3)

#### Проекционно-сканирующий метод (2)

Теплофизическая задача для Гауссова и однородного распределений интенсивности импульса в обрабатываемой плоскости дает отношения между тепловой зоной воздействия  $\Delta r_h^{raycc}$ и  $\Delta r_h^{odhop}$  как функцию  $a\tau/r_0^2$  (двумерный случай):

$$\frac{\Delta r_h^{\text{raycc}}}{\Delta r_h^{\text{odHop}}} = 0.35 \frac{r_0^2}{a\tau}$$
(5.2)

![](_page_57_Figure_4.jpeg)

Рис.5.4. Соотношение прогретых зон для Гауссова распределения (фокусирующий метод) и однородного распределения (проекционный метод) в поперечном сечении пучка в зависимости от длительности импульса.

## – 59 – ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (4)

#### Обработка в цилиндрической световой трубе (ЦСТ)

Геометрия светового пучка в значительной степени влияет на качество и точность микрообработки. Получение точных форм как следствие регулярной временной структуры требует определенного позиционирования относительно каустики оптической системы, с тем, чтобы сформированный световой пучок в зоне обработки был наиболее однородным в поперечном и продольном сечении. Каустика имеет две характерные плоскости, куда обычно помещается обрабатываемая поверхность, называемые фокальной плоскостью и плоскостью изображения (излучающей поверхности или ограничивающей диафрагмы). При определенном взаимном расположении лазера и оптической системы, когда размер светового пятна равен в обеих плоскостях, между ними образуется цилиндрическая световая трубка. Длина /' трубы и диаметр d' определяются соотношениями (рис.5.5)  $I' = \alpha F^2/D$  и  $d' = \alpha F$ .

Использование ЦСТ при обработке материалов позволяет существенно понизить (и в некоторых случаях избежать в целом) прямого поглощения падающего света (который в случае обработки фокусным пятном формирует конус) стенками отверстия. Кроме того, использование ЦСТ устраняет уменьшение плотности светового потока вследствие расфокусировки луча с увеличением глубины отверстия.

![](_page_58_Figure_4.jpeg)

Эксперименты, выполненные с оборудованием, позволяющим формирование ЦСТ демонстрируют возможность получения отверстий с формой, отклоняющейся от цилиндрической не больше, чем 1/200 при отношении глубина к диаметру 15.

Рис.5.5. Оптическая схема формирования цилиндрической световой трубы.

## - 60 -ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (5)

#### Экспериментальные результаты (1)

![](_page_59_Picture_2.jpeg)

Рис.5.6. Вид спереди на отверстия в стальной пластине сделанные:

а) методом фокусировки и б) проекционным методом (круговая маска)

![](_page_59_Picture_5.jpeg)

Рис.5.7. Отверстия в стеклокерамике, сделанные:

а) в цилиндрической световой трубке

б) обычным коническим лучом.

## - 61 -ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (5)

#### Экспериментальные результаты (2)

![](_page_60_Picture_2.jpeg)

![](_page_60_Figure_3.jpeg)

а), б) — вид спереди; в), г) — вид сзади

## МНОГОИМПУЛЬСНАЯ МИКРООБРАБОТКА (МИО)

Эта техника формирует отверстие (или разрез) посредством применения последовательности идентичных лазерных импульсов заданной энергии и длительности. Обработка последовательностью импульсов приводит к увеличению глубины отверстия (шва) постепенно, вследствие испарения слоя за слоем с каждым импульсом. Конечная глубина отверстия (шва) определяется полной энергией серии импульсов, в то время как диаметр шва зависит от средних параметров отдельного импульса, так же как диаметр светового пучка и каустика в зоне воздействия.

Метод МИО обычно используется для решения двух различных технологических задач: 1) получение отверстия максимальной глубины без строгих требований точности, 2) получение точных форм.

Оптимальному режиму МИО соответствует получение максимального отношения приращения глубины к диаметру ( $h_i/d > 1$ ) в каждом отдельном импульсе. Экспериментальное изучение режима, охарактеризованного как  $h_i/d > 1$  показало, что диаметр отверстия изменяется незначительно после первого импульса и определяется величиной энергии  $\overline{W}$ , усредненной по полной серии импульсов, в то время как глубина зависит от полной энергии *n* импульсов.

Формулы (2.10) и (2.11) опять могут быть использованы для вычисления конечного размера отверстия с той разницей, что глубина определяется полной энергией серии импульсов  $W = \sum W_i$ , в то время как диаметр определяется усредненной энергией отдельного импульса в серии  $\overline{W} = (1/n) \sum W_i$ . Из (2.10) и (2.11) следует, что главным фактором, воздействующим на отношение глубины к диаметру является tg $\gamma$ , характеризующий кривизну каустики после фокальной плоскости оптической системы, и количества п импульсов в по-следовательности, необходимых для получения требуемых d и h.

При использовании многоимпульсной обработки могут быть использованы различные схемы подачи излучения. Кроме облучения неподвижным пучком можно обходить лучом наружный диаметр отверстия или придавать ему движение развертки по спирали от центра к краям.

Оптимальный высокоточный режим МИО должен обеспечивать минимальное оплавление стенок и дна отверстия. Это становится возможным, если удовлетворены следующие два условия, определяющие приемлемые режимы работы:

$$t_i \leq r_0^2 / a$$
,  $h(\tau_i) \leq 2r_0$ 

Первое условие означает малые потери тепла на стенках в течении импульса, таким образом, минимум плавления стенок вследствие теплопроводности. Второе ограничивает факторы образования жидкой фазы.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И ПРОЦЕДУРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО: СТРУЯ ГАЗА И СТРУЯ ВОДЫ

-63-

Качество и точность могут быть улучшены с помощью других технологических методов, предусматривающих увеличение количества удаленной жидкой фазы, и таким образом уменьшение эффекта неконтролируемого перераспределения расплава (после импульса).

Резка металлов обычно проводится с помощью поддува газа (воздуха или кислорода). По существу, эта техника (называемая газолазерная резка — ГЛР) состоит в фокусировке лазерного луча на поверхность обрабатываемого материала, куда одновременно подается вместе с лучом газ. Поток газа выполняет следующие задачи:

1) поддержание горения металла с использованием теплоты реакции,

2) удаление жидкой фазы и очистка боковой поверхности потоком газа,

3) эффективное охлаждение материала в зоне резки

Наличие струи кислорода при резке металлов позволяет существенно увеличить глубину и скорость обработки и получить качественные кромки. ГЛР металлов обычно осуществляется мощным СО<sub>2</sub>—лазером. При использовании газа следует избегать сильного окисления краев. Иногда, с целью улучшения эффективности охлаждения потоком газа распыляется вода, в то время как в других случаях обрабатываемая поверхность непосредственно охлаждается водой.

Примечание: лазерная обработка пучком света, доставляемым на струет жидкости

![](_page_62_Figure_8.jpeg)

Рис.5.9. Схема газолазерной резки.

## - 64 -ПОСТ ОБРАБОТКА (1)

Обработанные лазером изделия могут быть подвергнуты дополнительной обработке путем химического травления (рис. 5.10), которая позволяет делать калибровку отверстий при любом диаметре и глубине, полученных при обработке лазером. Процесс травления исправляет вырезку и отклонения формы поперечного сечения от прямоугольной формы; быстро устраняется расплавленный металл и заусеницы внутри отверстия таким образом значительно уменьшая шероховатость поверхности.

![](_page_63_Picture_2.jpeg)

Рис.5.10. Начальное отверстие в медной пластине (а) и его форма, улучшенная после травления в 70 % HNO<sub>3</sub>, в течение 4 (б) и 7 (в) минут.

## - 65 -ПОСТ ОБРАБОТКА (2)

Другой метод, который нашел практическое применение в улучшении качества лазерного сверления отверстий — использование покрывающих пластин, накладываемых на фронтальную и заднюю сторону обрабатываемой поверхности. Входные и выходные конусы, таким образом, сформированы в этих вспомогательных пластинах, которые впоследствии снимаются.

Во множестве случаев, использование лазера, как инструмента обработки, оправдано технологически и экономически, если он используется, чтобы произвести черновые отверстия, которые затем доводятся до требуемого размера и точности другими средствами, такими, какие используются для механической обработки (рис. 5.11), алмазным порошком с шлифовкой проволокой, например, для фильер.

![](_page_64_Picture_3.jpeg)

Рис.5.11. Поперечные сечения фильер для вытяжки волокон искусственного шелка после лазерной обработки и механической калибровки (а), пуансоном (б).

## -66-**6. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЙ** 6.1. УПРАВЛЯЕМОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Развитие надежных и мощных лазеров, работающих в непрерывном и импульсном режиме, прежде всего Nd:YAG и CO<sub>2</sub> лазеров, позволило осуществить широкий диапазон технологических операций, вовлекающий управляемое лазером разделение материалов.

Применение лазеров для этих целей имеет многочисленные преимущества перед традиционными методами, а именно:

- широкое разнообразие материалов,
- возможность достижения узких резов, а в некоторых случаях разделение без потерь,
- малая зона термовлияния,
- минимальное механическое воздействие и термодеформации,
- возможность резки по сложному профилю в двух, или даже в трех измерениях.
- •

Резка может происходить путем испарения или удаления расплава из зоны взаимодействия с лазерным пучком, а также посредством создания термомеханических напряжений с последующим расколом по сформированной трещине. Лазеры чаще всего используются для резки металлов и некоторых диэлектриков, при этом грат обычно удаляется направленной струей газа, химически активного или инертного. Термораскалывание применяется при разделении хрупких материалов, таких как стекло, керамика и т.п.

![](_page_66_Figure_0.jpeg)

![](_page_66_Picture_1.jpeg)

![](_page_66_Figure_2.jpeg)

Рис.6.1. Общий вид NiTi–стентов, вырезанных с помощью лазера:

а) различные типы стентов, б) спираль ная антенна.

Рис.6.2. Схема размещения стента в сосуде (а) до (б) и после его расширения.

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРАФАРЕТОВ ДЛЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ (ЛАЗЕРНОГО, ХИМИЧЕСКОГО (ТРАВЛЕНИЕ) И ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО (ОСАЖДЕНИЕ))

Сравнение между лазерным обрабатывающим методом и обычным методом для изготовления трафарета Таблица 8 Лазерный Травление Адлитивный метод Метод ИЗГОТОВdilla alta ления 1 1 1 1 Форма сечения Материалы Нержавеющая сталь и т. д.. Нержавеющая сталь, медь Никель и т. д.. Время изготов-Несколько дней От 7 до 10 дней 2 недели ления Не требуется удаления жидкой Низкая стоимость Шероховатость поверхности меньше и хоро-• фазы шая возможность для длительного применения • Одновременное изготовле-Не требуется предварительных ние нескольких изделий при печати операций типа разработки, печати Возможно большое аспектное h/d отношение • Долговечность Хорошие характеристики для прохождения ит.д. Быстрая замена модулей при изпасты менении конструкции Хорошее качество Преимущества Возможен большой размер образ-• ца Долговечность Отличное качество Малое время изготовления Хорошие характеристики для прохождения пасты Большое время обработки Высокая стоимость Плохое качество Поскольку материал – Ni, пленочная толщина Плохие характеристики для Недостатки имеет тенденцию колебаться прохождения пасты данные по Долговечность Ni ограничена Y.Kathuria Требуется удаление жидкости • Высокая стоимость

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

- 69 -

В общем случае качество лазерной резки может быть определено следующими главными параметрами (рис. 6.3):

- ширина реза на передней  $b_n$  и на задней  $b_3$  сторонах и  $\Delta b$ ,
- 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, зависят больше от времени облучения. Неровность реза на поверхности зависит от формы светового пятна, перекрытия пятен и (или) частоты повторения f.

В общем случае, чтобы уменьшить бороздки необходимо: 1) увеличить перекрытие отверстий (увеличением частоты повторения импульсов f или сокращением скорости движения  $u_0$  и т. д.) и, 2) ограничить количество жидкой фазы (уменьшением длительности импульса  $\tau$ , и т. д.).

![](_page_68_Figure_11.jpeg)

Рис.6.3. Характеристики качества лазерной резки: m — отходы, S — бороздки,  $\Delta r_h$  — размер зоны теплового воздействия, R — радиус плавления,  $R_z$  — неровность края реза,  $b_n$  и  $b_3$  — ширина резки на передней ( $b_n$ ) и на задней ( $b_3$ ) стороне,  $\beta$  — угол задержки реза и отклонения бороздок (разрез (а) и полный (б) вид)

## ВРЕМЕННО–ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПИЧНОГО ИМПУЛЬСА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

a)

б)

- 70 -

![](_page_69_Figure_1.jpeg)

![](_page_69_Figure_2.jpeg)

Рис.6.4. Осцилограмма импульса пичковой структуры импульса генерации Nd:YAG лазера фирмы LASAG (а) и реконструкция при той же форме импульса свободной генерации τ = 10<sup>-4</sup> s с такой же энергией (б).

Уменьшение мощности к концу импульса и исчезновение больших пичков ведет к образованию жидкой фазы металла (которая не может более быть испарена) и не способствует созданию достаточного дополнительного давления, чтобы удалить ее — и это главная причина ухудшения качества резки.

Большая постоянная составляющая интенсивности (см. рис.) и плотности мощности  $q_{i\dot{a}i\dot{\sigma}\dot{\sigma}}$  — это также факторы, ведущие к образованию жидкой фазы (легко оценить, что  $q_{\dot{e}} < q_{i\dot{a}i\dot{\sigma}} < q_{i\ddot{e}}$ ).

Главная причина образования грата — это большое количество жидкой фазы, которое является следствием спада мощности к концу импульса, большой постоянной составляющей и различной импульсной мощности в пиках. Жидкая фаза и сложные многоимпульсные механизмы ее удаления — также главные причины образования бороздчатости.

Уменьшение зоны теплового воздействия (ЗТВ)  $h_h \sim \sqrt{a\tau}$ , включая плавление, окисление и нагревание, зависит прежде всего от длительности импульса  $\tau$ , чрезмерная длительность импульса так же важная причина плавления передней поверхности вырезки (см. радиус *R* на рис.).

Чтобы увеличивать возможность резки, необходимо увеличивать частоту следования импульсов f (что означает увеличить среднюю мощность  $\overline{P}$ ), и скорость перемещения  $u_0$  соответственно. То же самое качество тогда будет обеспечиваться в той же самой плотности мощности  $q_i$  и том же самом перекрытии p.

## ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЛАЗЕРНУЮ РЕЗКУ

![](_page_70_Figure_2.jpeg)

Рис.6.5. Типичная структура лазерного пучка с фокусирующей оптической системой в зоне обработки

![](_page_70_Picture_4.jpeg)

Рис.6.6. Идеальная структура лазерного пучка в зоне обработки

Фокусирующая оптическая система может вызвать следующие недостатки:

- оплавление передней поверхности вокруг реза и, соответственно, коническая форма реза
- неровность края реза на поверхности (рис.5.3).
- образование дополнительного количества жидкой фазы из–за конической продольной формы сечения пучка

Проекционная оптическая система с цилиндрической световой трубой лишена этих недостатков.

## КАК ОБЕСПЕЧИТЬ РЕЖИМ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ С ВЫСОКИМ КАЧЕСТВОМ И РАЗРЕШЕНИЕМ?

Временно-энергетические характеристики лазерных импульсов:

 плотность мощности q<sub>i</sub> — чем больше, тем лучше (уменьшение жидкой фазы), но меньше чем порог поглощения в эрозионном факеле:

 $qpprox 2-3q_{_{
m i\,\,\hat{o}}} < q_{_{
m o\,\,\hat{a}\hat{e}}}$  (формула 3.3)

 длительность импульса τ<sub>i</sub> — чем меньше, тем лучше (уменьшение жидкой фазы), в диапазоне от микросекунд до нано– (и даже) пико–, и фемтосекунд. Сокращение τ<sub>i</sub> ведет к уменьшению глубины испарения:

$$10^{-6}$$
  $n < \tau_i < 10^{-9(12,15)}$  c

*P<sub>i</sub>* определено требованиями плотности мощности *q<sub>i</sub>* и размера оптического пятна в фокальной плоскости *d<sub>0</sub>* (см. ниже), чем больше тем лучше, чтобы обеспечить необходимые *q* и *f*:

крутизна фронтов импульса, τ<sub>ô ð</sub>:

 $\tau_{\hat{o}\,\hat{o}} < \tau_i$ 

постоянная составляющая мощности, *P*<sub>ñ</sub>:

$$P_{\tilde{n}}=0$$

- отдельные импульсы (или пички) должны быть равными по мощности и длительности,
- частота повторения импульсов, чем больше, тем лучше, но должна позволять удалять продукты эрозии из реза:
#### Пространственные характеристики лазерного пучка и оптической системы:

• выбор размера светового пятна  $d_0$  зависит от ширины реза d; чем меньше d, тем меньше должно быть  $d_0$ , в любом случае  $d_0 < d$  и

$$d_0 = (0.1 - 0.5)d$$

 фокусное расстояние линзы, *F*, или лучше сказать, числовая апертура 2*F*/*D*<sub>0</sub> определяет продольную структуру пучка и глубину фокуса, в особенности; лучше всего — структура световой цилиндрической трубы, которая реализуется при условии

$$I_{\ddot{e}} = D_0 / \alpha$$

где *I<sub>ё</sub>* — расстояние между выходным зеркалом лазера и задней фокальной плоскостью фокусирующей линзы (рис.5.5), α — угол расходимости лазерного луча;

• распределение энергии в световом пятне должно быть однородным (Рис.5.3).

### Оснастка и параметры системы управления:

- оснастка должна быть обеспечена струей газа и воды (внутри трубки-заготовки) вспомогательные системы для удаления продуктов эрозии,
- перекрытие отверстий: чем больше, тем лучше для минимизации бороздчатости при данной скорости перемещения *u*<sub>0</sub>, диаметра вырезки *d* и частоте повторения импульсов *f*:

$$0.5$$

 система управления должна обеспечивать одинаковую плотность мощности в криволинейных частях траектории, особенно на крутых поворотах, при смене направлений (реверсе) и т. д., что необходимо для стабилизации качества резки

$$P_i/u_0 = \text{const}$$

## ЛУЧШИЙ ТИП ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ТРЕБУЕМЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ, МОЖЕТ БЫТЬ ВЫБРАН ИЗ ТАБЛИЦ 3, 4

1. Эксимерные лазеры (оптическое качество пучка не высоко).

2. Лазеры на парах Cu (время жизни ограничено 1000-2000 часов).

3. Nd–YAG, непрерывная накачка, акусто–оптическая модуляция (AOM) (τ ограничена 100 нс — не менее).

4. Nd–YAG, импульсная накачка, электрооптическая модуляция (ЭОМ) (частота следования *f* ограничена ~ 100 Гц — не более).

5. Nd–YAG, свободная генерация (СГ) с электромеханическим модулятором (качество ограничено)

6. CO<sub>2</sub>, непрерывный (низкое качество реза), импульсный — ширина реза ограничена снизу.

## -75-К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ВЫРЕЗАНИЯ ТРАФАРЕТОВ (СТЕНТОВ)

Таблица 9

Лазерная обработка металлической маски/трафарета



# КАК ОБЕСПЕЧИТЬ РЕЖИМ ОБРАБОТКИ С ВЫСОКИМ КАЧЕСТВОМ И РАЗРЕШЕНИЕМ?

#### Предварительная обработка

Для предотвращения осаждения грата на поверхности могут использоваться различные покрытия, в частности, могут применяться различные смазки на масляной основе.

Однако, наиболее эффективные результаты могут быть получены путем предварителнього нанесения пленочных покрытий, которые затем удаляются методом химического травления.

При этом грат, прилипающий к внешней стороне так же удаляется вследствие удаления металлизации травлением (в азотной кислоте, например).

Пленки могут быть нанесены либо гальваническим осаждением, либо напылением нитрида бора.





Рис.6.7. а) сцепление грата с покрытием из нитрид бора, б) заключительный вид после снятия покрытия.

# ЛАЗЕРНО–ИНДУЦИРОВАННОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ (ЛОКАЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ) — ПРИНЦИП

Термическое воздействие сфокусированного лазерного излучения может быть локально усилено реакцией химического травления на твердой поверхности, помещенной в соответствующий жидкий раствор (травитель).

Химическое травление с помощью лазера в жидкостях перспективно, благодаря высокой концентрации реагентов и разнообразию возможных химических реакций. Главные преимущества метода могут быть сформулированны как:

- низкая тепловая нагрузка на образец,
- высокая локализация химической реакции,
- быстрая скоростиь травления и
- точная обработка с разрешением до микрометра.



$$2\text{Ti} + 2\text{H}_{3}\text{PO}_{4} \rightarrow 2\text{TiPO}_{4} + 3\text{H}_{2}^{\uparrow}$$
$$\text{Cu} + 2\text{KOH} + \frac{1}{2}\text{O}_{2}^{} \rightarrow \text{K}_{2}\text{CuO}_{2}^{} + \text{H}_{2}\text{O}$$

Рис.6.8. Принцип селективного химического травления с помощью лазера. Некоторые возможные реакции в жидкости — травителе.

# ЛАЗЕРНО–ИНДУЦИРОВАННОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ (ПРИМЕРЫ)



Рис.6.9. SEM микрофотография канавок, вытравленных в Ті.





Рис.6.11. Микроспираль, изготовленная в Ті с помощью Nd:YAG–лазера жидкостным химическим травлением в H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



- 78 -

## 6.2. ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА (ФИГУРНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ГРАВИРОВКА)

### ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

 маркировка механического инструмента — особенно для подшипниковой промышленности,

- маркировка медицинских инструментов,

- электронная промышленность,

- маркировка электронных компонентов,

- изготовление устройств для возбуждения поверхностных акустических волн,

- гравировка топологии печатных плат,

- ювелирная промышленность,

– полиграфия — изготовление печатных форм

## ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ

- нет механического контакта — благоприятно для массового конвеерного производства,

 программируемость картин — вне конкуренции при частой сменяемости продукции и малых сериях,

возможность использования практически любых материалов, включая твердые сплавы, стекла и т. д., применяя различные лазеры: Nd–YAG, CO<sub>2</sub>, на парах Cu, эксимерные,

– гибкость, адаптивность к потребностям производства,

- долговечность нанесенной лазером маркировки,

- нет механического воздействия на хрупкие и тонкие изделия,

– малое количество удаленного материала (важно при обработке Au, Pt и т.п.),

– набольшая площадь маркировки и размер знаков,

- большой оптический контраст,

- возможность маркировки не плоских поверхностей,

– возможность нанесения штрих-кодов и рисунков (иероглифов и т.п.)

# СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ С ДРУГИМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

таблица 10

	Тип процесса						
Параметры	лазерная маркировка	окраска	штамповка	механическая гравировка	химическое травление		
стойкость маркировки	высокая	низкая	высокая	высокая	высокая		
тип поверхности	любая	любая	мягкий ме- талл	мягкий металл	любая		
деформирующие силы	низкие	низкие	высокие	высокие	низкие		
экологические про- блемы	нет	да	нет	нет	да		
время изменения зна- ков маркировки	низкое	высокое	высокое	низкое	высокое		
себестоимость	высокая	низкая	низкая	высокая	низкая		
затраты	высокие	средние	средние	высокие	высокие		
квалификация штата	высокая	низкая	низкая	высокая	низкая		

## – 82 – ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА — ПРИМЕРЫ ИЗДЕЛИЙ



Приборные панели, шильдики, этикетки, ярлыки и т.п. высокой контрастности и четкости при больших сериях с различным текстом для каждого изделия могут быть легко изготовлены



Панели и этикеточные изделия из нержавеющей стали отвечают наиболее жестким требованиям по износоустойчивости, прочности и четкости знаков



Поливинилхлориды, полиамиды, тефлоны и многие другие пластмассы можно маркировать лазером



Лазер может испарять тонкие цветные покрытия — краски, пленки и т.п. на стекле и других материалах

ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

- 83 -





Рис.6.21. Проекционная схема со сканировани- Рис.6.22. Маркировка изделий из золота: ем маски: а) схема сканирования с периодической структурой маски, б) схема сканирования с непериодической структурой 1 — образец, 2 — маска, 3 — проекционная система, 4 — оснастка, 5 — лазер, 6 — сканирующая призма, 7 — сканирующее световое пятно, 8 — прозрачные секции маски

а) без чистки, б) после чистки спиртом (Nd-ҮАС импульсный, 200 нДж, 15 Гц, глубина линий 0.01 мм, разрешение 15 линий/мм).

## – 84 – ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### 1. Типы лазеров

– Nd–YAG, импульсный (непрерывная накачка — акустооптический затвор, импульсная накачка)
— металлы, металлы с покрытием

 – СО<sub>2</sub>, импульсный (высокочастотная накачка, непрерывный – сканирующий) — органические материалы, дерево, пластик, кожа, стекло (штампы, флексографические формы)

### 2. Типы сканеров

- электромеханический (гальванометрический механизм)

– плоттеры (механические столы)

– акусто–оптический (высокие потери)

- опто-механический

#### 3. Тип оптических систем

- сканирующие

– проекционные

### 4. Рекомендации режима

также, как при резке, малые длительности импульсов, большие частоты повторения импульсов

# 6.3. УПРАВЛЯЕМОЕ ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОНТРОЛИРУЕМЫМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ РАСКАЛЫВАНИЕМ— ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ

#### Материалы, лазеры:

Кремниевые подложки — Nd–YAG

стекло, керамика, сапфир, феррит, кристаллы кварца — СО2

#### Достоинства:

- 1. Отсутствие механического контакта, малая продолжительность воздействия, и малый размер зоны воздействия; это гарантирует крутые края реза и малые остаточные напряжения, которые являются особенно важными в резке пластин GaAs с размещенными на них оптоэлектронными структурами.
- 2. Отсутствие трещин в точках пересечения надрезов.
- 3. Возможность скрайбирования полупроводниковых пластин с нанесенным защитным покрытием, так как скрайбирование сделано на пластинах с уже сформированными полупроводниковыми структурами
- 4. Высокое качество резов (рис.6.25).
- 5. Возможность сокращения размера чипа до 0.25 mm
- 6. Высокая скорость скрайбирования, которая сильно увеличивает производительность одна лазерная установка для скрайбирования заменяет до 10 механических.
- 7. Возможность получения более глубокой (в 2–3 раза) и более регулярной резку управляемым способом, который существенно увеличивает выход годных изделий после резки до 96–98 % (алмазная резка дает 86–94 %) из–за того, что при механической резке нельзя управлять глубиной и шириной реза.
- 8. Увеличение выхода годных чипов приводит к существенной экономии.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ



Рис.6.23. Глубина надреза *h* в кремниевой пластине в зависимости от коэффициента перекрытия *p*, %. Nd:YAG–лазер, модуляция добротности, длительность импульса 100 нс и импульсная плотность мощности около 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup>

$$\rho = \left(1 - \frac{t}{d}\right) \cdot 100\%$$



Рис.6.24. Относительная сила *F*, необходимая для разламывания кремниевой пластины (в процентах от величины, необходимой для разламывания нескрайбированной пластины) в зависимости от глубины надреза *h* (в процентах от толщины пластины). Условия резки такие же как и на рис.6.23.

## - 87 -ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ (1)



Рис.6.25. Надрезы на кремниевой пластине а, б и микрокристаллической InSb пластине в а — скрайбирование алмазным инструментом, б — скрайбирование Nd–YAG–лазером, в скрайбирование N<sub>2</sub>–лазером (поперечное сечение), никаких изменений кристаллической структуры не наблюдается

## – 88 – ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ (2)





Рис.6.26. Вид лазерного надреза на стекляннокерамической пластине а) и профиль пластины после разламывания b)

1 — лазерный надрез (линия раскола)



Рис.6.27. Разделение подложек CO<sub>2</sub>– лазером: а) до разделения, б) после

# РЕЖИМЫ СКРАЙБИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Таблица 11

материал	размер образца			диаметр ла-	MOULUOOTI	
	ширина, мм	длина, мм	толщина, мм	зерного пят- на, мм	лазера, Вт	рования, м/мин
алюминий керами- ческий (99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25.4	114	0.68	0.25	8	0.30
	25.4	15.2	1.01	0.38	16	0.07
	25.4	114	0.68	0.38	7	0.30
оконное стекло	25.4	76.2	1.2	0.38	3	0.30
	25.4	76.2	1.6	0.50	9	0.30
сапфир	25.4	25.4	1.3	0.38	12	0.07
кристаллический кварц	10.2	25.4	0.82	0.38	3	0.60
феррит	50.8	35.0	0.2	0.3	2.5	1.20

## 6.4. УПРАВЛЯЕМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ (УТС)

Техника разделения хрупких диэлектрических материалов путем создания термонапряжений (УТС) более эффективна, чем лазерная резка. В этом способе плотность светового потока в облучаемой зоне и скорость движения луча по поверхности выбираются т.о., чтобы нагреть поверхностный слой до температуры, достаточной для достижения значительных термонапряжений. Напряжения релаксируют, если предел текучести хрупкого материала не был превышен. Если, однако предел текучести был превышен, в поверхностном слое возникают существенные пластические деформации, которые после охлаждения ведут к развитию остаточных напряжений растяжения. Когда они превышают критическую величину предела прочности, образуются трещины.

Окончательное деление достигается путем механического разлома материала по контуру намеченной трещине. Если пластинка достаточна тонкая, трещина может развиться самопроизвольно и может произойти нежелательный разлом. Чтобы этого не случилось, надо, чтобы температура нагретой верхней поверхности была примерно в три раза выше, чем нижней. Это приблизительно реализуется при толщине материала *h*:

$$h = \sqrt{at} = x_{np} \tag{6.1}$$

где a – температуропроводность, и  $x_{np}$  — глубина зоны нагрева за время t.

## -91-ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ

Условие (6.1) позволяет получить простую формулу, описывающую скорость процесса УТС. За время нагревания материала до температуры, при которой выполняется условие (6.1), лазерный луч продвинется на расстояние *I*, равное произведению его скорости и времени, полученном из (6.1): I = vt. Подставляя *t*, найденное из (6.1), получим длину отставания (задержки) начала развития трещины относительно движения пятна:

$$I \le \frac{h^2 v}{a} \tag{6.2}$$

Чем выше величина отставания трещины от светового пятна, тем ниже вероятность ее появления; особенно следует учитывать дефекты и неоднородности материала, также как внешние механические факторы, способные увести трещину от траектории движения луча. Поэтому величина отставиния (задержки) разлома должна быть определена из условий получения траектории с требуемой точностью и раскола. Таким образом, можно выразить (6.2) для скорости сканирования пучка света, которая и является критическим фактором УТС:

$$v_{\rm Tp} \le \frac{al}{h^2} \tag{6.3}$$

Материалы, лазеры:

– стекло — Nd–YAG–лазер – алюмо–керамика — CO<sub>2</sub>–лазер – сапфир — CO<sub>2</sub>, Nd–YAG–лазеры – кристаллический кварц — CO<sub>2</sub>, Nd–YAG–лазеры

### Преимущества:

- при разрезе стекол, края практически свободны от трещин,
- нет внутренних напряжений на краях образцов после УТС,
- нет абразивных частиц, приводящих к повреждению поверхности стекла,
- возможность вырезания по контуру сложной формы,
- можно разрезать стопку стеклянных листов при правильном выборе режима

# ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ





Рис.6.28. Стеклянные кольца, полученные лазерным термораскалыванием из стеклянных керамики от мощности излучения (толщина 0.7 труб.

## 6.5. ЛАЗЕРНОЕ СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- алмазные фильеры для волочения проволоки (Рис.6.30, 6.31)
  - рубиновые часовые камни
  - керамические и стальные фильеры для получения синтетического волокна (выдавливанием)
    - жиклеры и инжекторы для двигателей внутреннего сгорания
    - керамические прокладки коаксиальных кабелей
    - охлаждающие компоненты для реактивных двигателей
      - микрофильтры (сигаретная бумага, фильтры для противогазов)
        - сетки для клистронов и т.д
          - подложки микросхем и печатные платы
          - электронно–лучевые, ионно–лучевые диафрагмы
          - ювелирные камни
            - резиновые прокладки, детские соски и т.д.

## ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

– в любых материалах( очень твердых, жаропрочных, хрупких, пластичных, слоистых и др.)

- в любой атмосфере (включая вакуум)
- под любым углом к поверхности
  - очень высокое аспектное отношение *d/h* 1:25 до 1:80 (рис.6.32) (Nd–YAG), 1:100 (стекло, CO<sub>2</sub>)
    - возможность получения фигурных отверстий проекционной техникой (рис.5.8)
      - возможность упрочнения стенок отверстий (рис.6.36)
        - возможность металлизировать или изолировать) отверстия (рис.6.37)
          - толщина зависит от материала, диаметра, точности и качества; обычно до 1 мм, иногда 10 см (стекло — СО<sub>2</sub>–лазер)
            - диаметр зависит от толщины от микрон (тонкие слои, рис.6.33) до разумных размеров (≈ мм, рис.6.34) аксиконная оптика или сверление по контуру (рис.6.37)
              - дополнительные возможности использования струи газа и жидкости (рис.5.9)
                - химическая, механическая постобработка (рис.5.10, 5.11)

## - 96 -СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В АЛМАЗНЫХ ФИЛЬЕРАХ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ



Рис.6.30. Последовательность сверления алмаза 1 — кристалл алмаза, 2 — пластина из материала, сильно поглощающего лазерное излучение, 3 — сфокусированный пучок, 4 — начальное отверстие в пластине (2), 5 — начальное отверстие в алмазе (графитные стенки), 6 — входной конус, 7 — рабочий канал, 8 — выходной конус Последняя операция – ультразвуковая очистка. Рис.6.31. Лазерная обработка алмаза на одной из стадий сверления (толщина алмаза 1.6 mm)

Общее время обработки: лазерной — 5–8 мин. (~100 импульсов), обычный способ механической обработки: 48–60 часов.

# ДЕМОНСТРАЦИЯ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ





## – 98 – ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ



Рис.6.33. Отверстия в меди (1, 2, 3) и в кремнии (4, 5, 6), сделанные одиночным одиночным импульсом мощного фемтосекундного эксимерного лазерапри плотности светового потока 1.2 Дж/см<sup>2</sup> и длительности порядка пксек.

Рис.6.34. Перфорация отверстий (ø 0.7–0.9 mm) механическая — в бумаге (а), импульсночастотный СО<sub>2</sub> лазер — делает отверстия в обычной бумаге (б) и на документах (в)

## - 99 -УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ

Многоимпульсный метод — дополнительные преимущества

- сокращение размера зоны теплового воздействия  $x_{np} = \sqrt{a\tau_i} << \sqrt{a\tau}$ ,

- увеличение воспроизводимости отверстий в  $\sqrt{n}$  раз (n — число импульсов),

– увеличение глубины отверстия в  $n^{\frac{1}{3}}$  раз, соответственно увеличивается максимальное отношение d/n также в  $n^{\frac{1}{3}}$  раз (зависит от апертуры линзы  $N = \frac{D}{2F}$ ):  $\frac{d}{h} = \frac{2N}{n^{\frac{1}{3}}}$ ,

– в цилиндрической световой трубке нет теоретического предела для глубины отверстия, кроме ее длины,

– длительность одного имульса должна обеспечить условия одномерной модели испарения

(Рис. 2.1): 
$$\tau << \frac{d_0}{v} = \frac{d_0 L_v}{q} \approx 10^{-6}$$
 с

Рис.6.35. Идеальная временная структура лазерных импульсов для сверления микроотверстий.



– 100 – УПРОЧНЕНИЕ СТЕНОК ОТВЕРСТИЯ (ЗАКАЛКА)



Рис.6.36. Поперечное сечение (сталь У–9) пластинки (толщина 0.2 мм): белый слой — закаленная зона (а), профиль внутренней поверхности (б) и микрозакалка на различных расстояниях от поверхности : 1 — на передней стенке пластины, 2 — на задней стенке (в).

## МЕТАЛЛИЗАЦИЯ (ИЗОЛЯЦИЯ) СТЕНОК ОТВЕРСТИЯ



Рис.6.37. Схема металлизации отверстий в диэлектриках:

а) с помощью металлической подложки,

б) химический метод (H<sub>2</sub>, CO).

– 102 – СВЕРЛЕНИЕ (ВЫРЕЗАНИЕ) ОТВЕРСТИЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА



Рис.6.38. Различные способы сверления (вырезания) больших отверстий:

а) аксиконная оптика (1 — аксиконная призма, 2 — фокусирующая линза, 3 — образец);

б) вырезание по контуру (1 — сверление, 2 — увеличение диаметра по контуру резки, 3 — вырезание по контуру).

## – 103 – СВЕРЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ



сверления глубоких отверстий: 1 — одноимпульсный, 2 — многоимпульсный с неподвижным лучом, 3 — многоимпульсный с обходом по контуру, 4 — многоимпульсный со спиральной разверткой луча









Рис. 6.41. Отверстие в стали, *d* = 70 мкм, *h* = 1 мм, полученное спиральным сверлением.

Рис. 6.42. Оптическая схема устройства для спирального сверления (слева)

## – 104 – СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Миниатюрные печатные платы являются важным элементом современных мобильных устройств связи и обработки информации. Рост мирового рынка мобильных телефонов показан на рис. 6.43, а печатных плат — на рис. 6.44.



Лазеры позволили в 2–3 раза уменьшить размер отверстий в печатных платах с 300–400 мкм до 100–200 мкм и перейти от сверления сквозных отверстий к внутренним (глухим) переходным отверстиям (рис. 6.45), что позволило повысить плотность упаковки (фотографии отверстий приведены на рис. 6.46, 6.47).



899211 20XV X1.80X 50 МКМ

Рис. 6.46. Глухое переходное отверстие в эпоксидной смоле, просверленное 3-й гармоникой YAG-лазера



Рис. 6.45. Схема перехода от печатных плат с СО (механическое сверление отверстий) к «лазерным» печатным платам с ГПО: уменьшение размеров отверстий и повышение плотности упаковки, упрощение разработки, повышение качества и производительности.

Рис. 6.47. Процесс лазерной вырезки (по контуру) СО фемтосекундным импульсным лазером на Ті–сапфире.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ И РЕЗКИ

(длительность импульсов определяется требованиями качества, частота следования определяет производительность, длина волны определяется главным образом материалом) Типичные области применения

**Металлы** — Nd–YAG–лазеры (свободная пичковая генерация — черновое сверление,

Непрерывная накачка + АОМ — точное сверление,

Импульсная накачка + ЭОМ — точное сверление,

– лазер на парах меди

- эксимерный лазер
- Ті–сапфир фемтосекундные лазеры
- Керамика СО2-импульсный лазер
  - Nd–YAG–импульсный лазер
  - эксимерные лазеры
- Стекло СО2-лазер
  - Nd–YAG–лазеры (термораскалывание)
  - эксимерные лазеры (+UVV)
- Пластик эксимерные лазеры (включая фемтосекундный)
  - CO<sub>2</sub>-лазер
  - Nd–YAG–лазеры
- Бумага СО<sub>2</sub>-лазеры

## – 107 – СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров. М.: Высшая школа, 1987.
- 2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.
- 3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд. Болгарской АН, 1991.
- 4. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
- 5. Турыгин И.А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1966.
- 6. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970.
- 7. Рэди Дж.Ф. Действие лазерного излучения. М.: Мир, 1974.
- 8. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.
- 9. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975.
- 10. Таблицы физических величин. Справочник. Под. ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
- 11. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении иприборостроении. Л.: Машиностроение, 1978.
- 12. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
- 13. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий. Учебное пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
- 14. Яковлев Е.Б. Лазерное оборудования, автоматизация и контроль технологических процессов. Конспект лекций. Часть І. Учебное пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
- 15. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.





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

#### КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

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

#### История кафедры ЛТ и ЭП делится на 3 разных периода:

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

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982-1988 гг.
Период III — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

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

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

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

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

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

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

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

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

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

## Основные научные направления кафедры

1). Лазерная обработка пленочных элементов.

2). Лазерное локальное осаждение тонких пленок.

3). Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.

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

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

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

7). Лазерное медицинское оборудование и инструмент.

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

9). Лазерный трехмерный синтез объемных моделей.

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

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

Вадим Павлович Вейко

Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка

Компьютерный набор и верстка Дизайн обложки Редакционно–издательский отдел СПб ГИТМО (ТУ) Зав. отделом Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99. Подписано в печать Отпечатано на ризографе Тираж 200 экз.