

## Дисциплина «Мощные технологические лазеры»

### Основные направления применения мощных лазеров

Металлообработка — сварка, резка, упрочнение.

Лазерная маркировка материалов и изделий.

Химические технологии: разделение изотопов, катализ и т.д.

Космос: лазерные реактивные двигатели, разведка и добыча полезных ископаемых на космических телах, удаление космического «мусора» с Земли или из космоса.

Энергетика: передача энергии на большие расстояния (из космоса), разделение изотопов, термоядерный синтез, рентгеновские лазеры, управление грозowymi разрядами, очистка и утилизация радиоактивно-зараженных объектов.

Строительство: резка бетона, скал, камня, стали, стекла и т.п., поверхностная обработка строительных материалов, проходка туннелей и скважин,

Экология — очистка среды, ликвидация разливов нефтепродуктов, ликвидация аварий и разрезка ядерных реакторов (дистанционная); ликвидация аварий железнодорожных, авто и т.п. — разрезка на мобильных лазерах.

Лазерное оружие: космическое – противоракетное, ослепляющее.

Наука: различные области естественных наук и наук о человеке

### **ЛАЗЕРНОЕ СВЕРЛЕНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В АЛМАЗНЫХ ФИЛЬЕРАХ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ**

Объемы до 30 000 фильер в год в мире (3 тыс. новых), время механического сверления каждой – 60 часов (48 часов – сверление черного отверстия и 12 часов – доводка его формы)

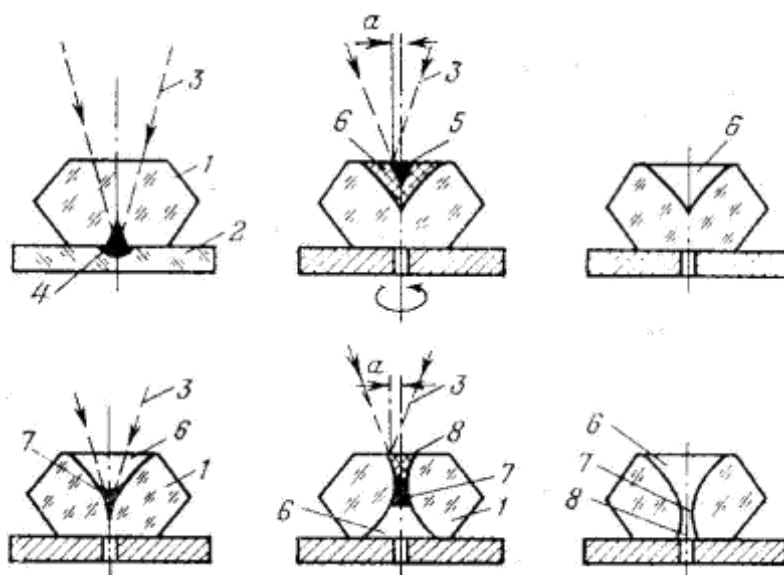
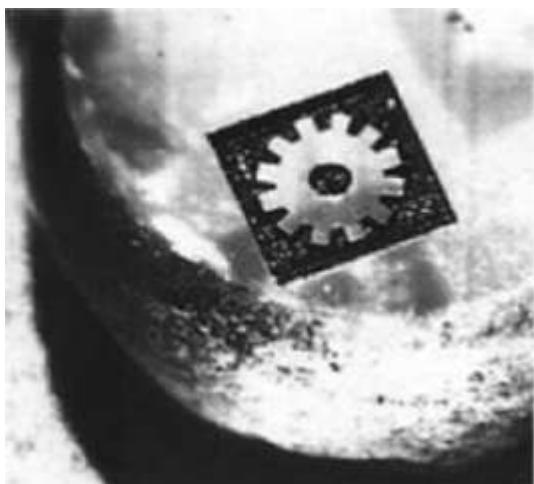


Схема процесса лазерного сверления микроотверстий в алмазных фильерах: 1 — алмазный кристалл, 2 — пластинка из материала, хорошо поглощающего лазерное излучение, 3 — фокусированный лазерный луч, 4 — исходное микроотверстие в пластинке (2), 5 — исходное микроотверстие в алмазе (графитовая преграда), 6 — входной и смазанный конус, 7 — рабочий канал, 8 — выходной конус. Последняя операция — ультразвуковая очистка.

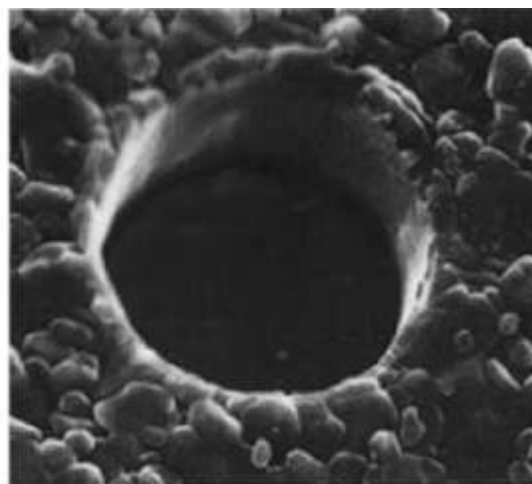


Рисунок. Фотография алмазной фильеры на одном из этапов сверления микроотверстия (толщина алмаза 1.6 мм). Время лазерного сверления 5-8 минут.

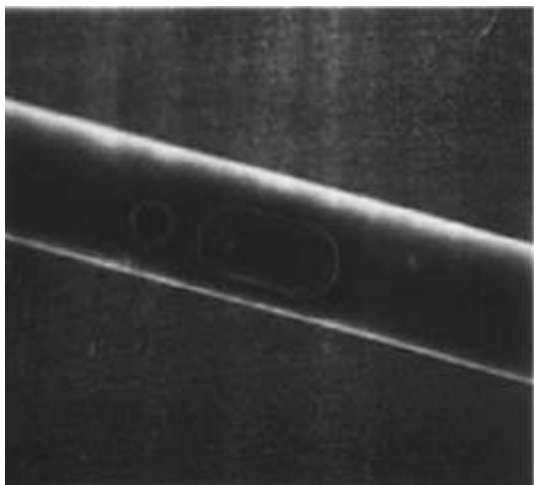
## ПРИМЕРЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ



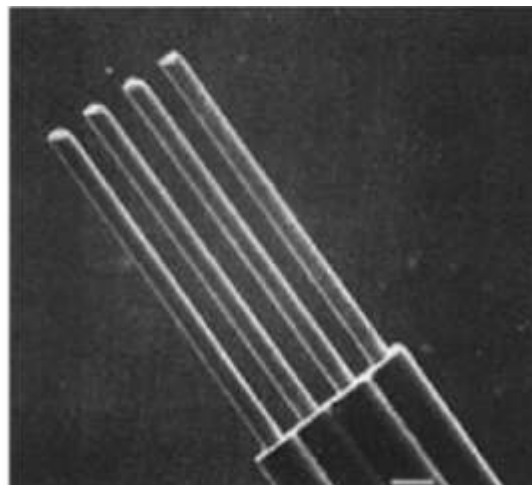
*300 микронная 3D шестерня  
в алмазе*



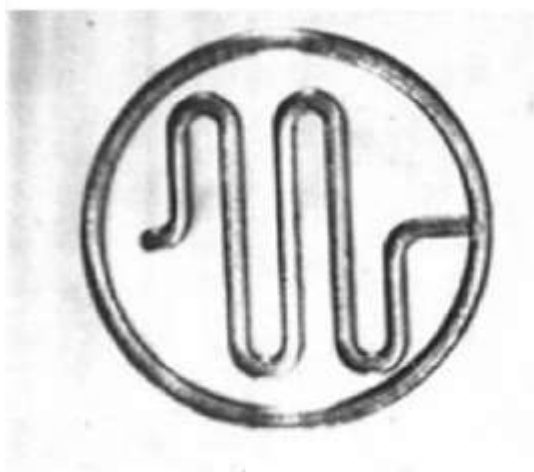
*Микроотверстие диаметром 300  
микрон в керамике Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*



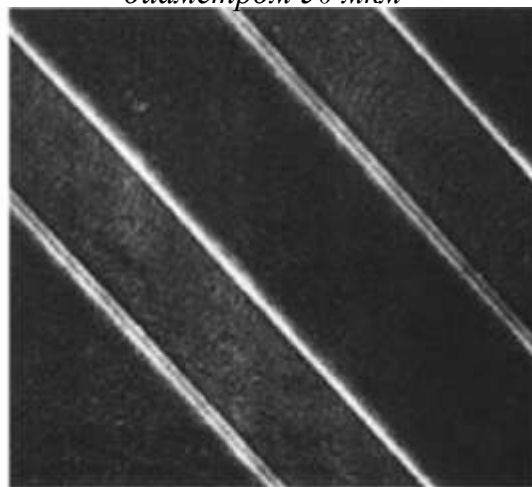
*Микроотверстие диаметром 100  
мкм и щель в полиамидной трубке*



*Снятие изоляции с провода  
диаметром 50 мкм*



*Змеевидный образец с шириной  
линии 30 мкм в стекле*

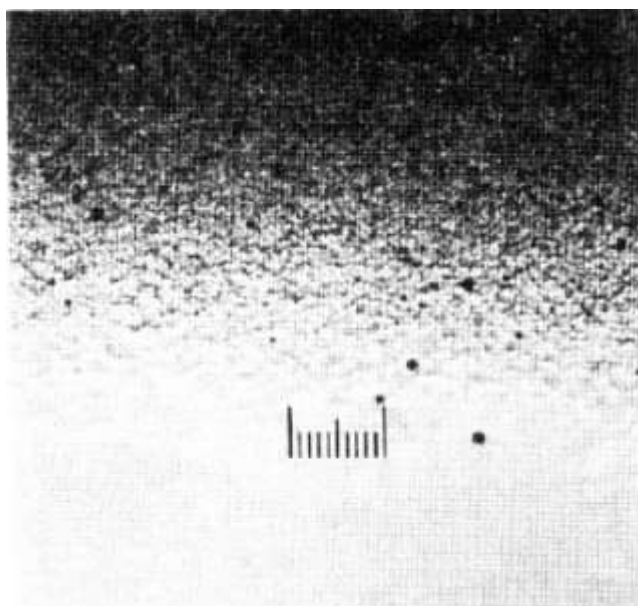


*Крупный план змеевидного  
образца в стекле*

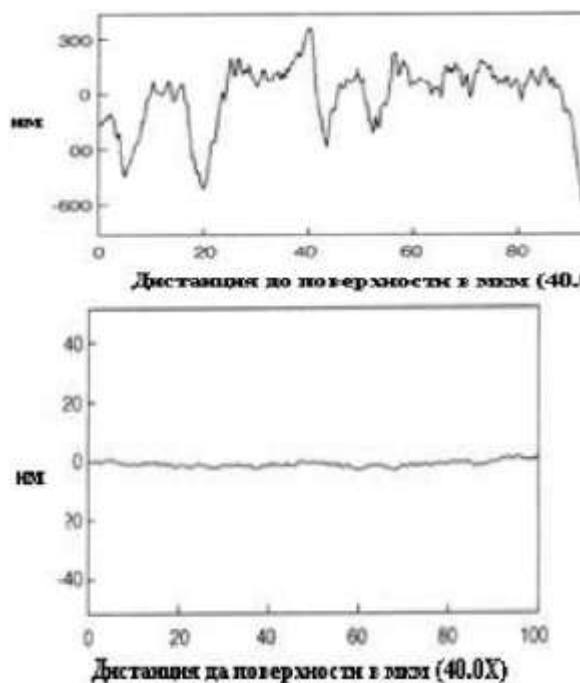
## ЛАЗЕРНАЯ ПОЛИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Физическая идея лазерной полировки стеклянной поверхности сходна с огневой полировкой стекла: при лазерном нагреве вязкость стекла уменьшается, а силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать свободную (поверхностную) энергию и соответственно, объем и шероховатость поверхности. Проблемы, которые при этом возникают – это гидродинамические волны и термомеханические напряжения

Положительные результаты продемонстрированы для мини- и микрооптики и даже для макрооптики.



а



б

Рисунок: лазерная полировка стекла: слева электронная микрофотография образца из стекла В-270 после механической полировки (а, сверху) и после дополнительной лазерной полировки (а, снизу), показана переходная область между облученной и необлученной зоной; соответствующий измеренный профиль после механической (б, сверху) и лазерной (б, снизу) обработки стеклянных образцов.

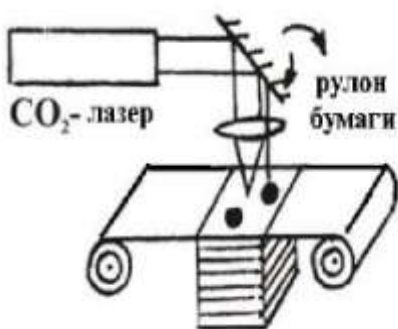
## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ

может производиться дистанционно, в условиях музейных интерьеров, труднодоступных местах с помощью волоконной доставки излучения, также локально – в микроэлектронике, и т.д.

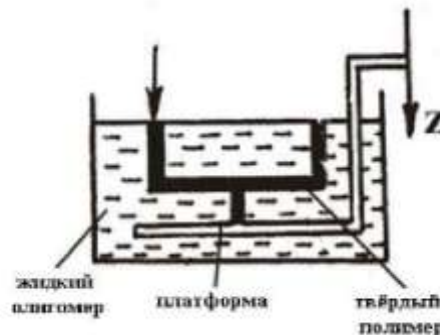


*Фотография медной статуэтки Петра I в процессе  
лазерной очистки*

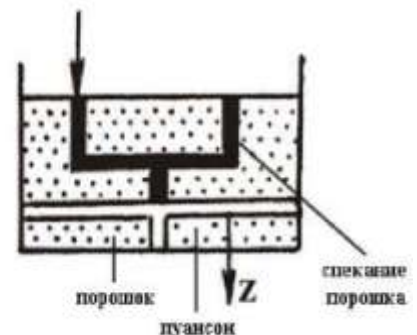
## ТРЕХМЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ ОБЪЕКТОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ



послойный синтез  
из целлюлозно-  
бумажных слоев



стерео-  
литография



спекание  
из порошков

## Быстрое создание опытных образцов-прототипов



В медицине структура костей или органов имитируются при помощи данных компьютерной томографии, чтобы планировать операции или встраивать имплантанты, которые с помощью методов 3-х мерного лазерного синтеза можно изготовить индивидуально и оперативно подогнать для каждого пациента.

*Фотография трехмерной модели Нефертити (слева) и черепа доисторического человека (внизу), изготовленных методом стереолитографии из фотополимера.*



Процессы послойного синтеза из целлюлозно-бумажных слоев, стереолитографии или спекания из порошков позволяют создавать любые трехмерные модели из данных CAD в течение короткого времени. Такие модели являются прототипами и радикально сокращают время изготовления литейных форм. Преимущества действующих и наглядных моделей заключается также в значительной экономии времени при разработках в медицине, промышленности, архитектуре и т. д.

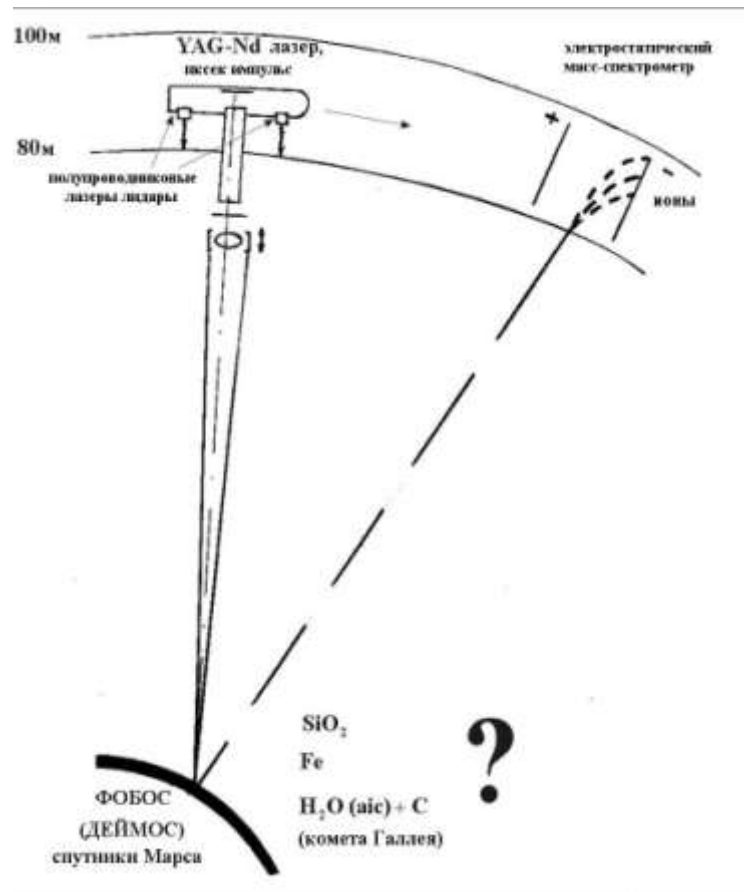


Трехмерные изображения записываются в стеклянных блоках путем послойной записи рассеивающих точек. Внутри прозрачного стеклянного блока (призмы, куба и т.п.) формируется объект, который можно рассмотреть со всех сторон. Применение: в рекламе, в науке для наглядного представления о структуре сложных молекулах, для изготовления портретов и т.п.

Реализовано множество мотивов композиций – от архитектурных сооружений (церквей, храмов и т.п.), изображений технических объектов (ракет, самолетов, автомобилей) до изображений животных, картин спортивных игр, портретов людей и т.д.

## **ДИСТАНЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**





## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

### Эмиссионные процессы

- десорбция газа,
- термоэлектронная эмиссия,
- термоионная эмиссия,
- эмиссия нейтральных атомов,
- тепловое излучение (пироэлектрические измерения).

### Структурные процессы

- рекристаллизация,
- структурные изменения в Fe–C сплавах (закалка сталей),
- размягчение стекла и, соответственно, структурные изменения,
- аморфизация и кристаллизация стеклокерамик,
- аморфизация тонких металлических пленок,
- взаимная диффузия нагретых слоев (микрометаллургия),
- отжиг дефектов (в полупроводниках).

### Поверхностные химические реакции

- локальное окисление металлов и полупроводников,
- восстановление окислов,

- термическое разложение металлоорганических соединений
- полимеризация (деструкция) полимеров.

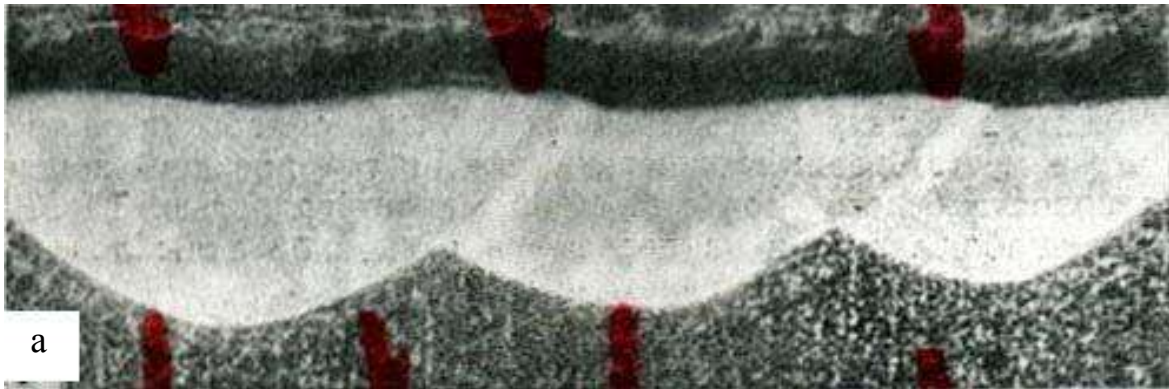
#### Термомеханические эффекты

- тепловое расширение (включая импульсное),
- появление термонапряжений,
- генерация ударных волн в твердом теле и в воздухе,
- генерация ультразвука (дефектоскопия),
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках

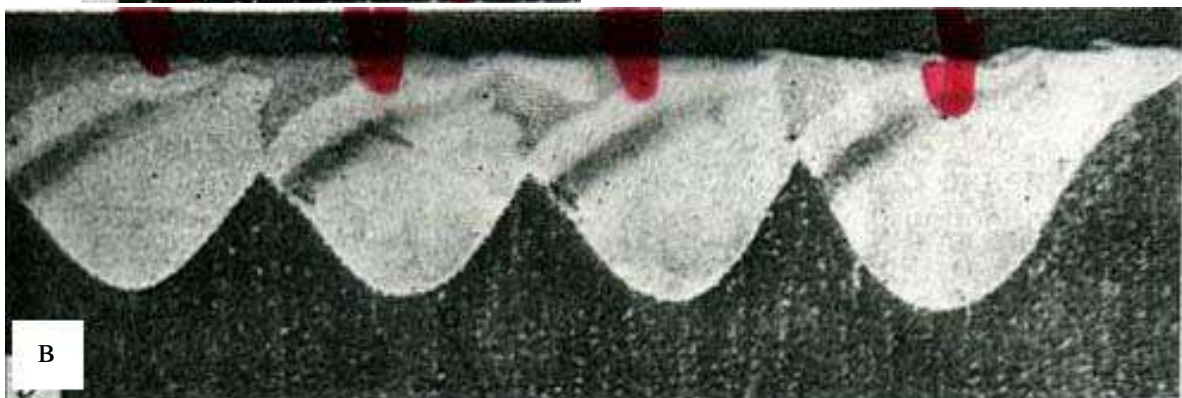
#### Физические переходы

- плавление,
- испарение,
- воспламенение и горение,
- детонация активных и взрыв пассивных сред.

## ЛАЗЕРНАЯ ЗАКАЛКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ



*Рисунок:  
упрочненный слой в стали  
Р6М5: а — на воздухе X100, б  
— при обработке на воздухе  
X500, в — в среде аргона  
X100.*



## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОТ ЧАСТИЦ

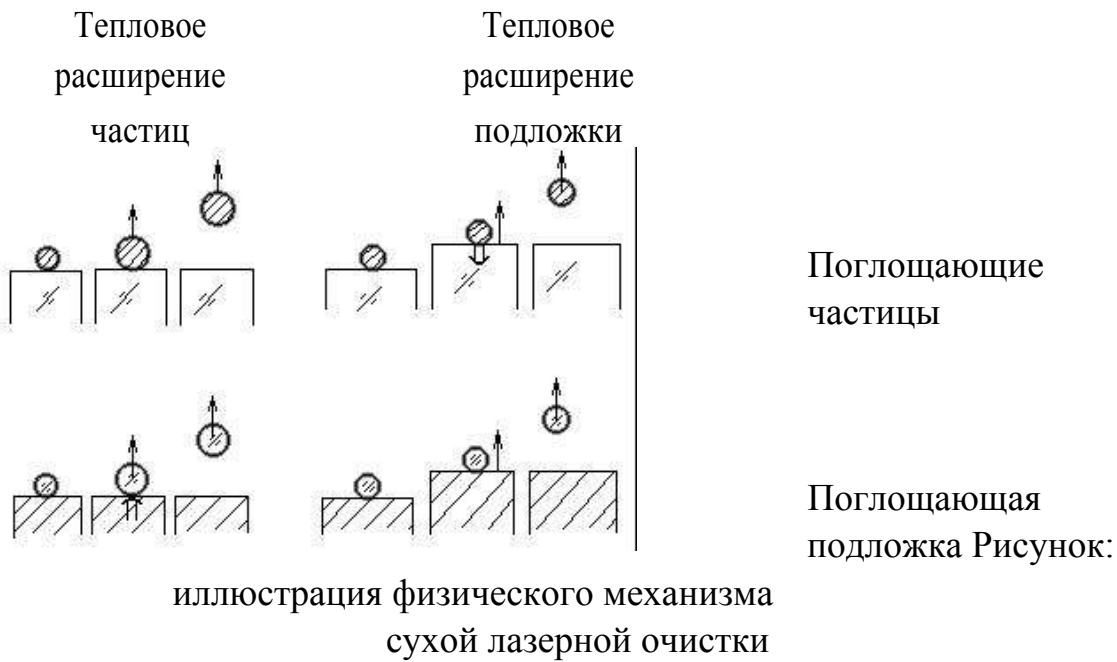
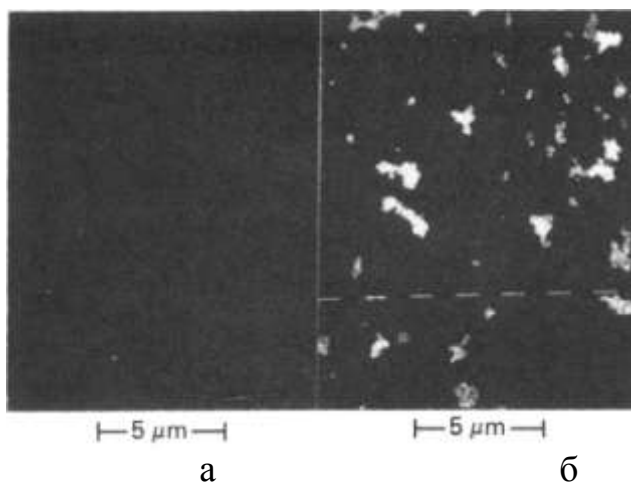


Рисунок. Иллюстрация физического механизма влажной  
лазерной очистки.



Фотография поверхности Si подложки с 0.2 мкм Au частицами, KrF-лазер (0.2 Дж/см<sup>2</sup>, 4 импульса, пленка воды): а) до очистки, б) после очистки

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТИПОВ ЛАЗЕРОВ

СО <sub>2</sub> –лазеры:	обработка материалов, медицина, научные исследования, оборона
Твердотельные (YAG:Nd):	обработка материалов, датчики, спектроскопия, научные исследования, оборона
Ионные лазеры (Ar):	печать, датчики, развлечения, обработка материалов, научные исследования
Полупроводниковые:	оптическая связь, хранение информации, печать, сканеры, юстировка, датчики, научные исследования, медицина
Волоконные:	оптическая связь, медицина, промышленность
Экцимерные:	микроэлектроника-литография, медицина, научные исследования
На парах металлов (Cu):	научные исследования, микроскопия, обработка материалов
He–Ne:	сканирование, измерения, датчики, юстировка, голография, научные исследования
На красителях:	спектроскопия, научные исследования

## ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

### ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

- ✓ высокая оптическая однородность активных газовых сред, что приводит к малой угловой расходимости – порядка дифракционной.

- ✓ малая плотность газовых активных сред, что приводит к сужению контура усиления и высокой монохроматичности.
- ✓ высокая мощность, непрерывный и импульсный режимы
- ✓ высокий КПД

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ

- ✓ высокая удельная мощность,
- ✓ высокое качество при большой мощности (TEM<sub>00</sub>),
- ✓ высокий КПД (с диодной накачкой) > 20%,
- ✓ большая энергия (до кДж/импульс),
- ✓ широкий диапазон длин волн,
- ✓ широкий диапазон длительностей импульсов (от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>-15</sup> с),
- ✓ совместимость длин волн с оптическим волокном,
- ✓ возможность получения генерации в волокнах
- ✓ большая яркость,
- ✓ высокая надежность.

## Основные виды твердотельных лазеров

Nd-YAG — 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм;

Nd-стекло — 1.06, 0.53, 0.355, 0.266 мкм;

Er-стекло — 1.54 мкм;

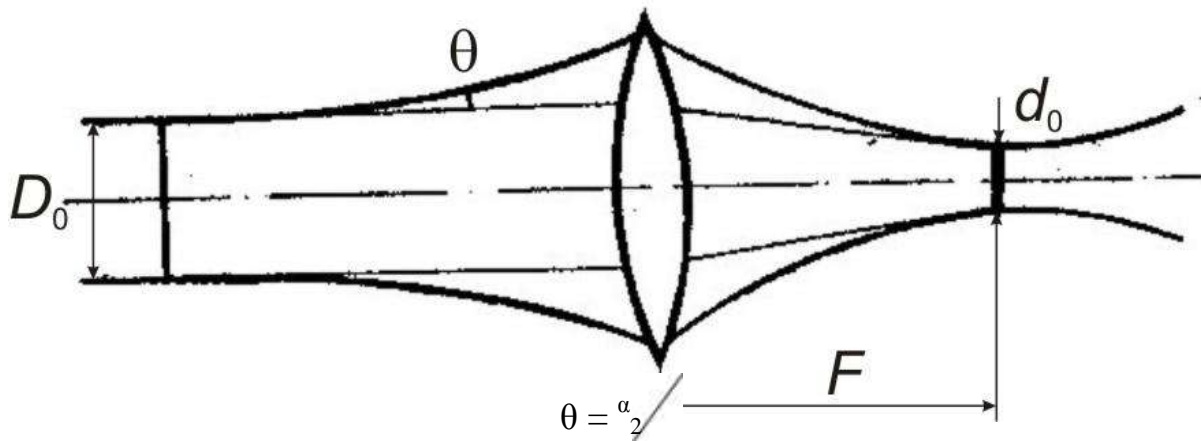
Рубиновый — 0.63 мкм;

Ti-сапфир — 0.66–0.98 мкм;

Cr-BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (александрит) — 0.72–0.78 мкм.

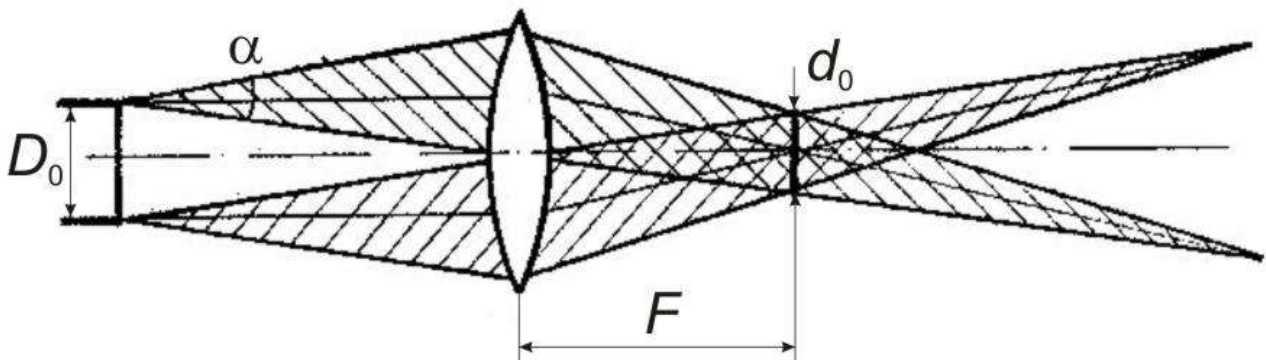
## ФОКУСИРУЮЩИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

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



в перетяжке  $d_0 = 2\omega_0$

Телецентрическая модель лазерного источника (многомодовый режим) (оси всех пучков  $\parallel$  оптической оси, все направления внутри  $\alpha$  равноценны)



фокальное пятно  $d_0 = \alpha F$ , глубина резкости  $l = 2d_0 F / D$

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,  $l_0 = 20$  мкм

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

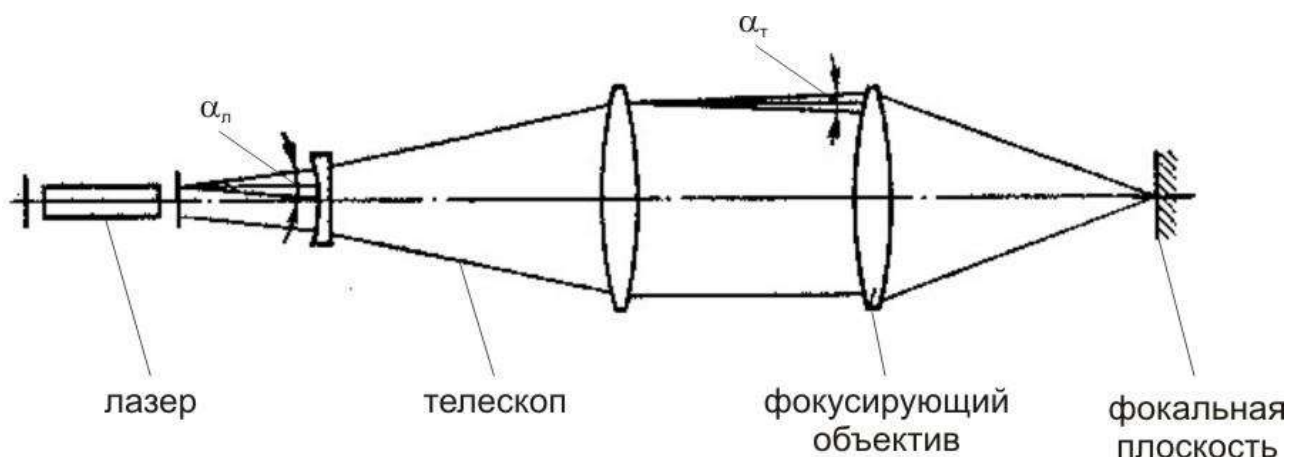
Фокусирующая техника характеризуется простотой, полным использованием лазерной энергии и оптическим разрешением (размером светового пятна), определяемым расходимостью пучка и фокусным расстоянием линзы.

Дальнейшее уменьшение размера пятна может быть достигнуто размещением перед объективом телескопического расширителя пучка с увеличением  $\Gamma$  (снижение расхождения в  $\Gamma$  раз). При этом можно либо уменьшать  $d_0$ , либо увеличивать фокусное расстояние объектива  $f$  без изменения  $d_0$  ( $d_0 = \alpha_{\text{л}} f / \Gamma$ ).

Использование расширителя пучка в рабочей станции «КВАНТ– 3» приводит к получению пятна диаметром 5 мкм с рабочим отрезком 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
- ✓ неопределенность размера зоны воздействия, который зависит от порога чувствительности материала,
- ✓ сложность обеспечения достаточной точности краев зоны воздействия при сканировании.

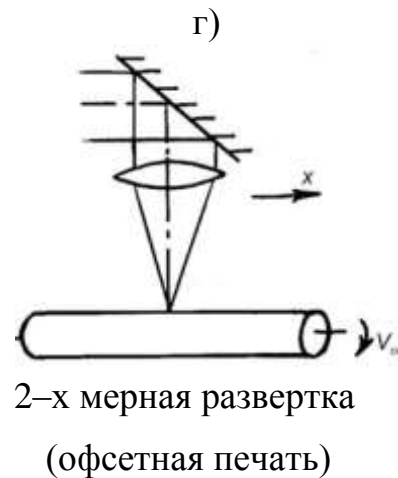
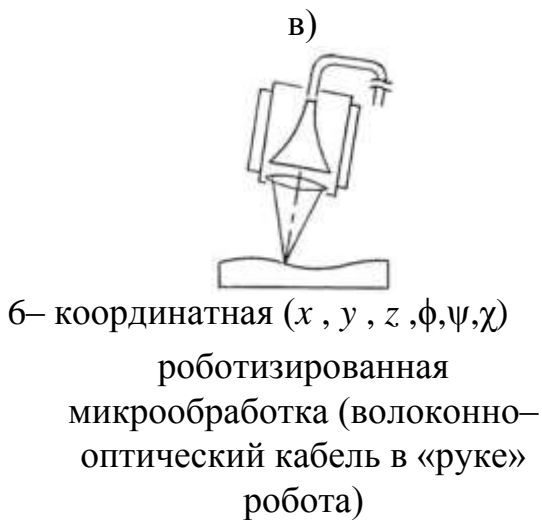
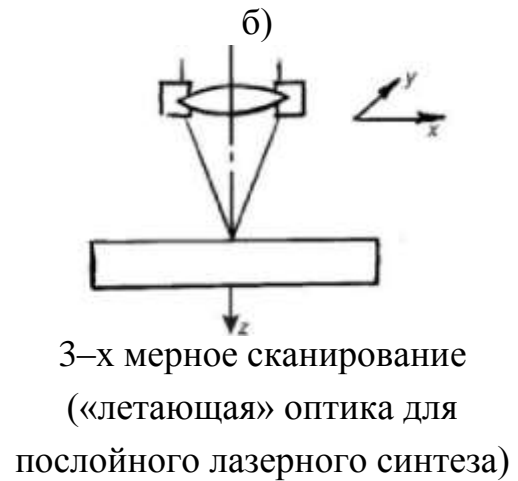
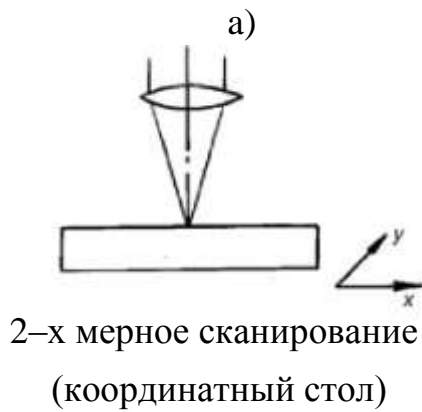


*Схема уменьшения размера фокального пятна с помощью телескопической системы*



## СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ А-ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

А-тип: поверхность обработки расположена в фокальной плоскости линзы  
(сканирование с прямоугольной разверткой)

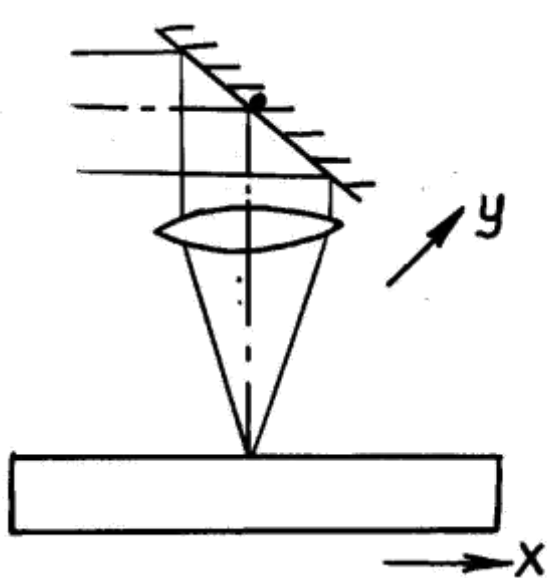


*Схемы сканирующих систем А-типа*

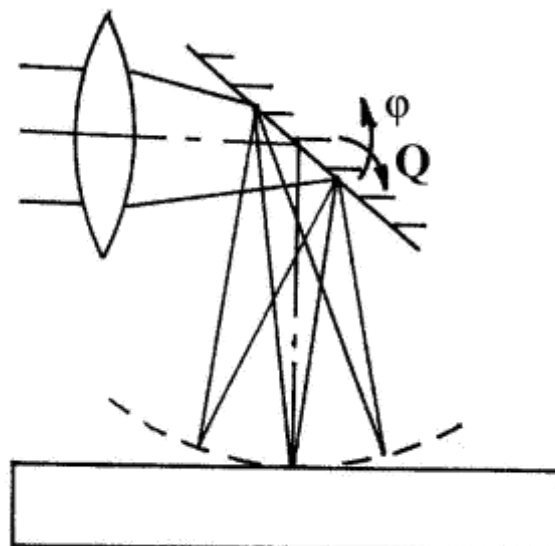
## СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ Б–ТИПА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Б–тип: только центральная точка обрабатываемой поверхности находится в фокальной плоскости линзы

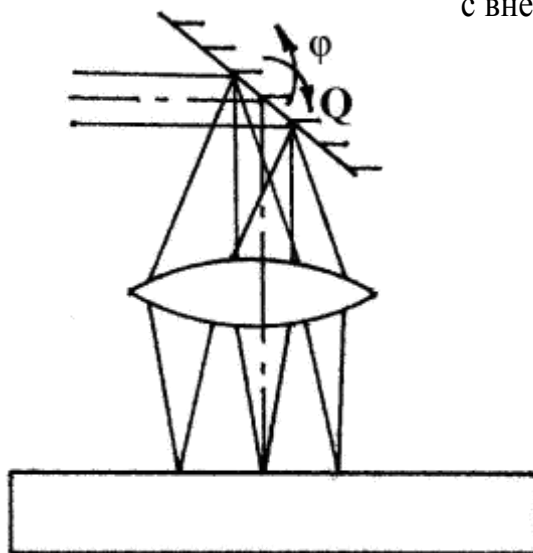
(сканирующие системы с угловым отклонением пучка)



одномерное угловое отклонение



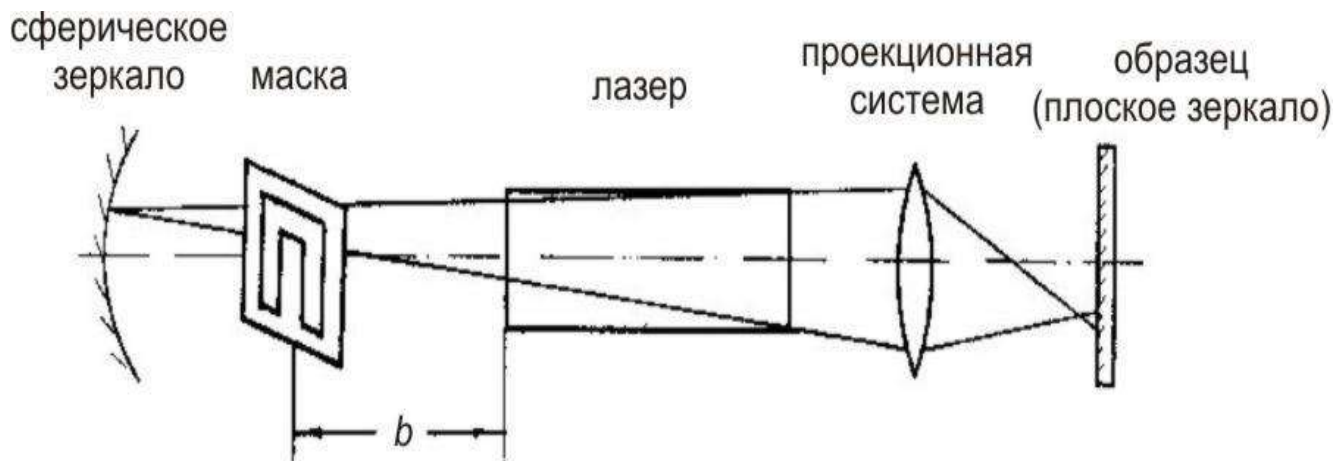
2–х мерная сканирующая система  
с внешней линзой



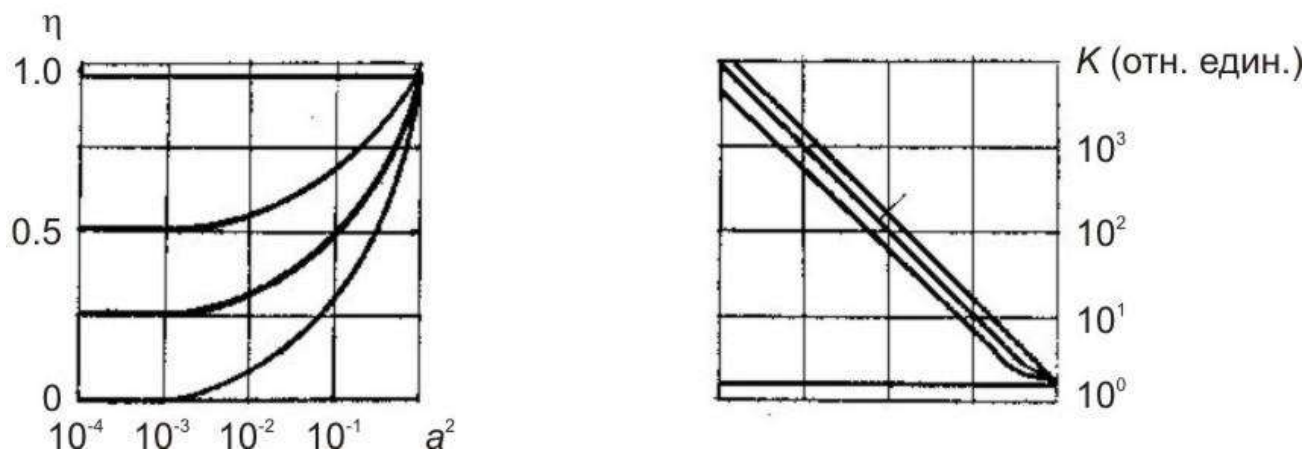
2–х мерная система типа линзы с “плоским полем”

*Схемы сканирующих систем Б–типа*

## АКТИВНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД



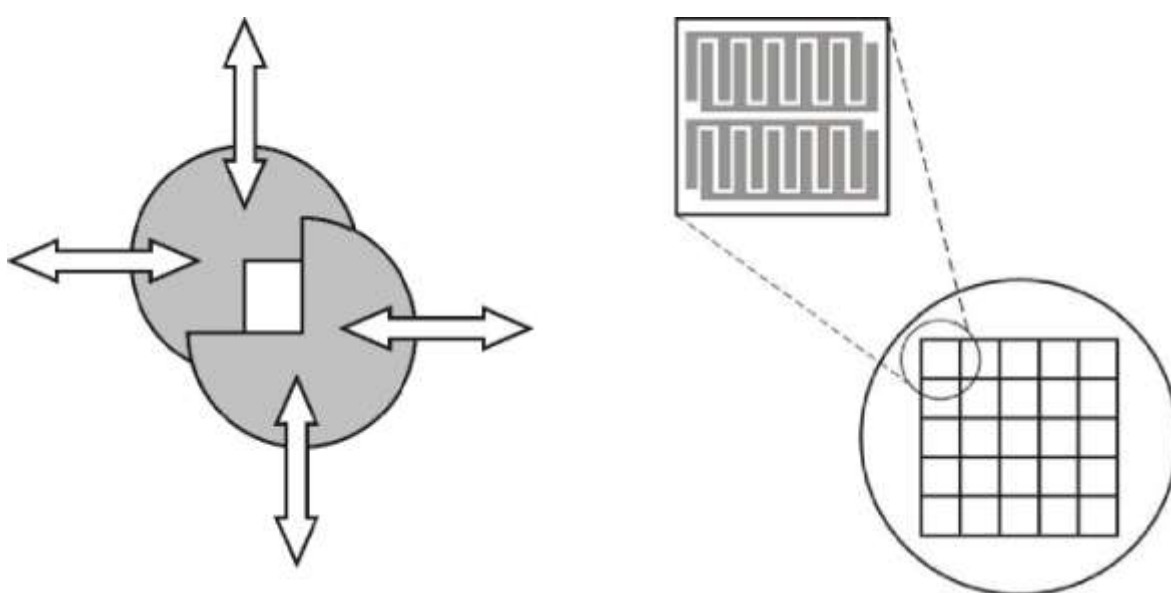
*Принципиальная схема активного проекционного метода*



*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*

## КОМБИНИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

На практике большое распространение получили комбинированные методы формирования изображения, когда элемент изображения строится методом оптической проекции, а поле обработки перекрывается сканированием пучка. К таким методам относятся мультиплицирование изображения и фотонабор, применяемые в фотолитографии. В лазерных технологиях наибольшее распространение получил сканирующий проекционный или контурно–проекционный метод.



*Принципиальные схемы метода фотонабора (а) и метода мультипликации (б)*

Принцип метода фотонабора заключается в синтезе (наборе) изображения из элементарных частей (базовых элементов) путем последовательного экспонирования пятном с изменяющимся размером и формой в плоскости изображения. Для изменения геометрии пятна могут быть использованы подвижные диафрагмы. Метод мультиплицирования (размножения) изображений осуществляется многократным последовательным или параллельным нанесением повторяющегося топологического рисунка. Различают оптико-механическую и оптическую мультипликацию.

Проекционно–сканирующий (контурно–проекционный) метод состоит в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата. Схема контурно–проекционного метода аналогична схеме проекционного метода, но

осветительная система работает с увеличением, меньшим 1. Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера. Достоинствами контурно–проекционного метода формирования оптического изображения являются: независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности; высокая точность рисунка (вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нем энергии); высокая разрешающая способность; небольшие потери энергии на маске. Рассмотренное выше положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной принцип построения осветительных систем — использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы. Преимуществами таких осветительных систем являются значительно меньшие габаритные размеры и более равномерное распределение интенсивности излучения. Для осуществления трехмерной (рельефной) обработки поверхности могут быть использованы различные модификации метода, например, контурно–проекционный метод с «дрожящей» маской (колеблющейся вдоль оптической оси системы по заданному закону в процессе перемещения облученной области по обрабатываемой поверхности), а также применение в микропроекционной схеме полутонных масок с переменным пропусканием.

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

Применяются для доставки и распределения лазерного излучения по рабочим местам. ВОС могут улучшать качество пучка и обеспечить передачу достаточно больших мощностей до 1 кВт по одномодовому волокну и до 50 кВт по многомодовому оптическому кабелю.

