

激光原理

- 1、我们为什么对激光感兴趣?
- 2、激光具体怎么产生的?



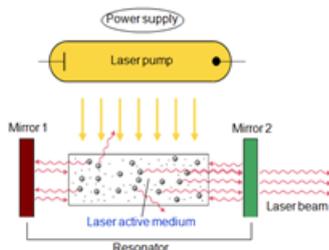
主要内容

- 1 激光器的基本原理
- 2 激光加工中常用到的激光技术
- 3 常用固体激光器的特点及构成
- 4 常用光纤激光器的特点及构成
- 5 常用CO₂激光器的特点及构成
- 6 超快激光器的特点及构成
- 7 半导体激光器的特点及构成

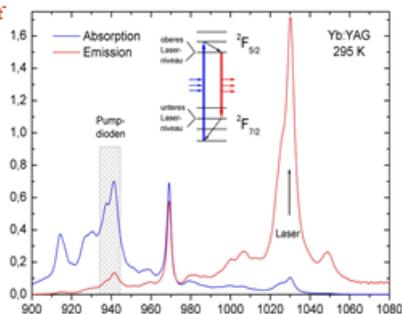
1 激光器的基本原理

1.1 激光产生的机理

激光 (Laser) 是受激辐射光放大 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



Yb:YAG Laser的激光能量转换机理



1 激光器的基本原理

1.2 激光束的基本特性

1) **高强度**——激光束发散角很小，光强度很高

例如：太阳光亮度 $3 \times 10^2 \text{ W} / (\text{cm}^2 \text{ sr})$

10mW的He-Ne 激光器的光亮度 $10^{16} \text{ W} / (\text{cm}^2 \text{ sr})$

调Q的固体激光器的光亮度 $10^{20} \text{ W} / (\text{cm}^2 \text{ sr})$

若进一步将激光束聚焦 (空间上集中) 或压缩脉冲宽度 (时间上集中)，则激光束更有极高的光强度

2) **高方向性**——由于谐振腔对光束方向的限制，激光束发散角很小。例如He-Ne 激光器的发散角 10^{-1} mrad ；固体激光器的发散角 $1 - 10 \text{ mrad}$

3) **高单色性**——激光的谱线宽度很窄；若进一步采用稳频和选取单一纵模，更可大大压缩谱线宽度。

4) **高相干性**——激光的谱线宽度极窄，传播中能产生相干的两点的时间间隔很大，其时间相干性很好；又激光发散角很小，方向性很高，激光束波前内任意两点均相干，空间相干性很好。

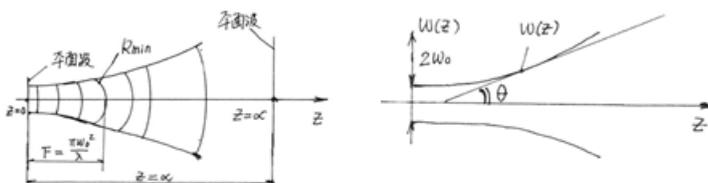
1 激光器的基本原理

1.3 高斯光束的特点

1. 高斯光束在其轴线附近可看作是一种非均匀高斯球面波，等相位面保持球面；

2. 在其传播过程中曲率中心不断改变，发散角会增大；

3. 其振幅在横截面内为高斯分布，强度集中在轴线及其附近；



1 激光器的基本原理

1.4 激光器的输出特性

1) 激光波长——激光器输出准单色光，聚焦不存在色差

2) 激光输出能量和功率

连续激光用激光功率 P 来表述输出的激光强度

脉冲激光的峰值功率 $P_m = \text{脉冲能量} E / \text{脉冲宽度} T$

脉冲激光平均功率 $P = \text{脉冲能量} E \times \text{脉冲频率} f$

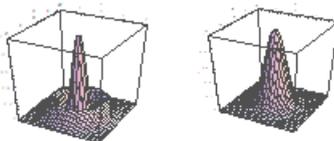
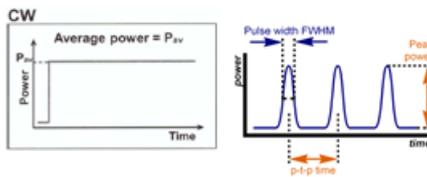
3) 激光的空间分布特性

基模 (TEM_{00}) 高斯光束——光场振幅按高斯函数分布;

将振幅值下降到 $1/e$ 的光斑宽度定义为光斑半径;

将强度下降到中心强度 $1/e^2$ 点对应的全角宽度定义为发散角;

为了改善发散角可用小孔选模, 非稳腔选模, 拉长谐振腔等方法



1 激光器的基本原理

4) 激光的时间分布特性

a. 连续激光——激光以连续恒定的功率输出

激光切割

b. 普通脉冲激光——以脉冲宽度(毫秒级)、脉冲能量与脉冲频率来描述; 输出激光是毫秒级的脉冲光。

激光焊接常用脉宽1 - 10ms, 能量1至数十焦耳; 峰值功率数千瓦;

打孔和切割常用脉宽0.1 - 2ms, 能量为0.5 - 20j; 峰值功率达万瓦

c. 调Q脉冲激光——用调Q技术压缩脉宽(纳秒级), 提高激光的峰值功率(声光调Q可达数百千瓦; 电光调Q可至兆瓦以上); 脉冲宽度为纳秒级的激光脉冲。

d. 超短脉冲激光——用锁模技术压缩脉宽到皮秒至飞秒级, 峰值功率达 $10^{12}W$, 可作很多精密微加工; 脉冲宽度为皮秒或飞秒级的激光

1 激光器的基本原理

5) 激光的偏振特性——椭圆偏振光与线偏振光

- 光波是横电磁波, 若在传播过程中电矢量只改变大小而不改变方向, 称为线偏振光;
- 若电矢量在传播过程中不改变大小而只改变方向, 两相互垂直分量的振幅相等, 而相位差是 $\pi/2$, 称为圆偏振光;
- 若电矢量在传播过程中既改变大小又改变方向, 称为椭圆偏振光;
- 若电矢量作无规变化, 振幅方向不确定的光, 称为自然光;
- 自然光与偏振光的混合光称为部分偏振光;
- 激光的偏振态对材料加工的效率和质量有较大影响。

例如: 线偏振光在切割时两个方向的切缝会不一样宽, 可加入一个 $1/4$ 波片变为圆偏振光, 使切缝均匀。可以通过 $1/2$ 波片改变偏振方向, 通过径向波片改变为径向偏振, 通过角向波片改变为角向偏振。

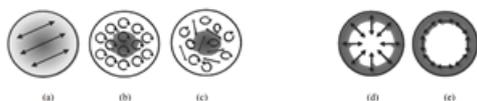


图5 (a) 线偏振光 (b) 圆偏振 (c) 随机偏振 (d) 径向偏振 (e) 角向偏振

1

激光器的基本原理

思考题:

- 1) 产生激光的基本条件
- 2) 简述激光束的基本特性
- 3) 影响激光束聚焦光斑的因素有哪些?

2

激光加工中常用到的激光技术

2.1 激光的选模——从激光器多模振荡中选取需要的基模

选基模

选取基模 (TEM₀₀) 振荡, 抑制其它高阶模

原则: 尽量减小激活介质的内部损耗及镜面损耗; 相对增大高阶模的衍射损耗。

a. 小孔光阑选模——孔径大小恰好通过基模而阻止高阶模(大小与位置); 但小孔也限制了基模体积, 功率受限。

b. 聚焦光阑选模——腔内聚焦的焦点处设置小孔光阑, 加大了模体积; 但腔内有聚焦不适合大功率大能量激光。

c. 非稳腔选模——模体积大, 有利于大功率大能量输出; 对横模选择本领高; 腔内光束均匀; 输出易于调整。有双凸腔; 平凸腔; 虚共焦凸凹腔等

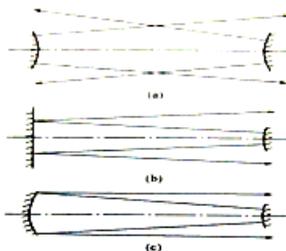


图 1-18 常用的非稳腔类型

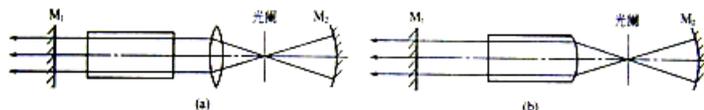


图 1-17 聚焦光阑法

2

激光加工中常用到的激光技术

2.2 调Q技术

声光调Q

当几十兆赫的射频电压驱动换能器, 产生超声波, 在超声介质中形成超声光栅; 激光通过超声光栅时产生衍射, 使激光偏离谐振腔, 造成腔内损耗大, Q值很低, 不能形成激光振荡; 而光泵不断, 使工作物质上能级粒子数积累到最大值; 调制讯号突然撤去超声场, 则衍射效应消失, 腔损耗减小, Q值突增, 激光振荡迅速恢复, 能量以巨脉冲输出。

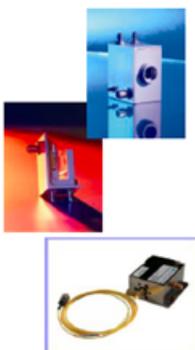
声光Q开关可获得频率0-20kHz, 脉宽几十纳秒量级的高重复率巨脉冲, 峰值功率数千瓦; 而所需调制电压很低, 200V以下。



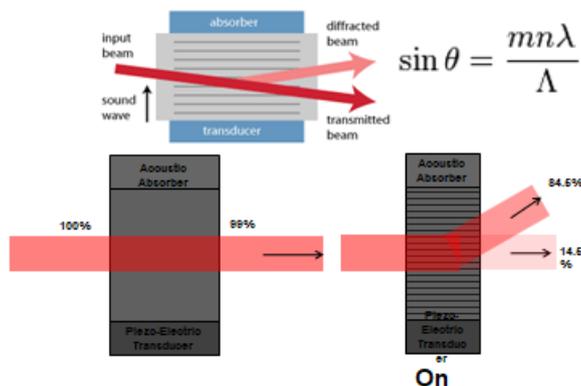
图 1-16 声光调Q激光器装置

2 激光加工中常用到的激光技术

声光Q开关



声光Q开关工作原理



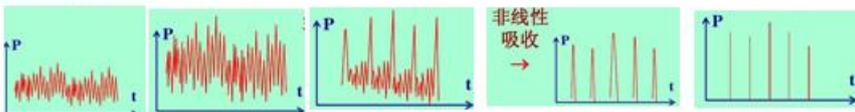
2 激光加工中常用到的激光技术

2.3 锁模技术

被动锁模

腔内插入一快速可饱和吸收体 (SESAM) 来调节腔内损耗, 可饱和吸收体的透过率随光强而变化, 对强光脉冲的透过率大, 弱光脉冲的损耗大;

强光脉冲通过后, 起初透过率很低, 使其纵模损耗很大; 仅强光脉冲处透过率增大损耗小形成稳定的振荡; 且脉冲前后沿不断被削弱, 使脉冲变窄, 形成很窄的超短脉冲输出。



2 激光加工中常用到的激光技术

2.4 激光器的波长转换

1) 非线性光学效应

有些特殊晶体材料 (非线性晶体) 在强光场的作用下, 在一定方向一定相位匹配的条件下, 会出现不同频率的光振荡, 产生较不同波长的光出射。

非线性光学晶体: 具有非中心对称结构, 一定的非线性系数, 在工作波段透明, 能实现相位匹配, 均匀性好, 物化性能稳定。

如: KDP, KTP, LNO, LBO, BBO 等, 以及某些半导体材料可对 CO₂ 激光实现倍频及上转换。

2) 激光的倍频:

倍频晶体可将波长 1064nm 的红外激光转换成 532nm 的绿激光; 再通过倍频可得到波长 266nm 的紫外光;

$$1064\text{nm}(\text{o光}) + 1064\text{nm}(\text{o光}) = 532\text{nm}(\text{e光})$$

3) 激光的混频:

$$532\text{nm}(\text{o光}) + 532\text{nm}(\text{o光}) = 266\text{nm}(\text{e光})$$

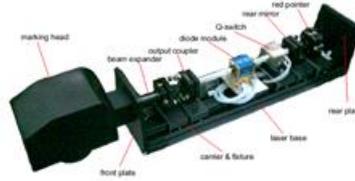
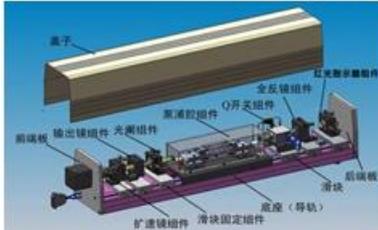
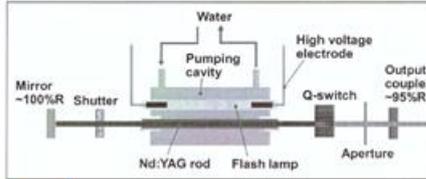
波长 1064nm 激光分别与 532nm 和 266nm 的激光混频, 可得到三次谐波 353nm 和五次谐波 212nm 的激光。

$$1064\text{nm}(\text{o光}) + 532\text{nm}(\text{e光}) = 353\text{nm}(\text{o光})$$

$$1064\text{nm}(\text{o光}) + 266\text{nm}(\text{e光}) = 212\text{nm}(\text{o光})$$

3 常用固体激光器的特点及构成

3.1 侧面泵浦固体激光器



3 常用固体激光器的特点及构成

3.2 端面泵浦固体激光器

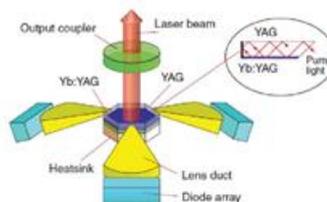
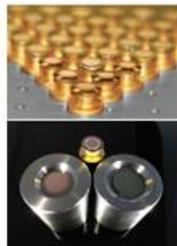
紫外调Q固体激光器

绿光调Q固体激光器

3 常用固体激光器的特点及构成

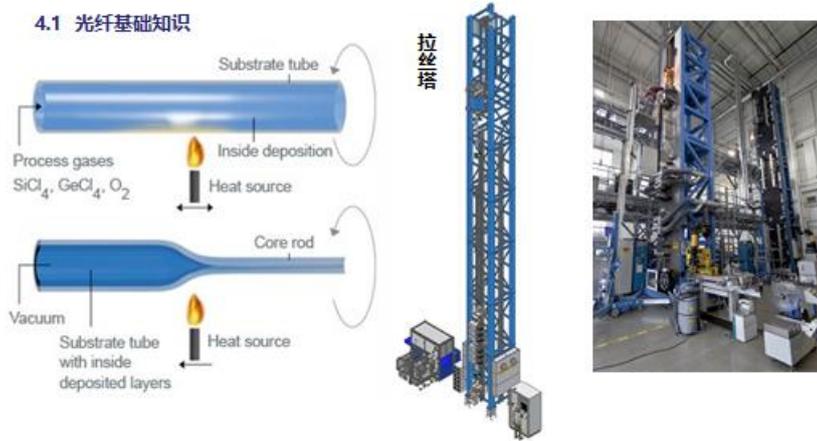
3.3 碟片固体激光器 主要工业生产商：通快

DG

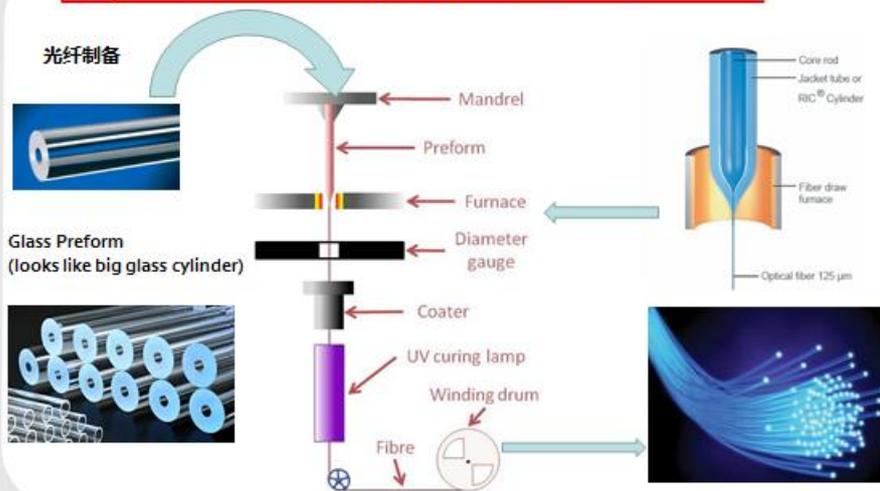


4 常用光纤激光器的特点及构成

4.1 光纤基础知识

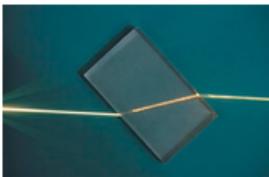


4 常用光纤激光器的特点及构成

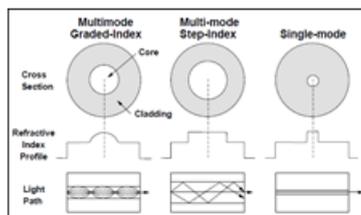


4 常用光纤激光器的特点及构成

某种的介质的折射率 n 亦等于光在真空中的速度 c 跟光在介质中的相速度 v 之比



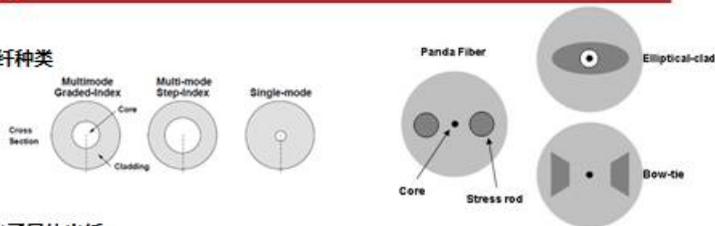
折射率: $n=c/v$



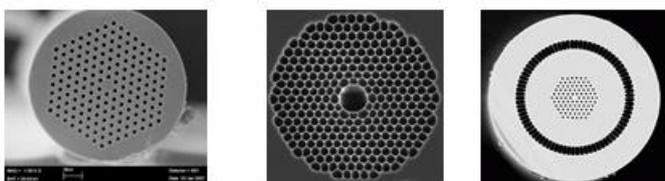
折射率分布图

4 常用光纤激光器的特点及构成

光纤种类

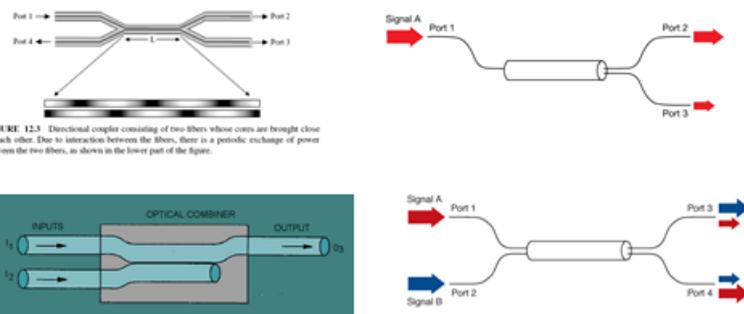


光子晶体光纤



4 常用光纤激光器的特点及构成

光纤耦合器



4 常用光纤激光器的特点及构成

4.2 连续光纤激光器

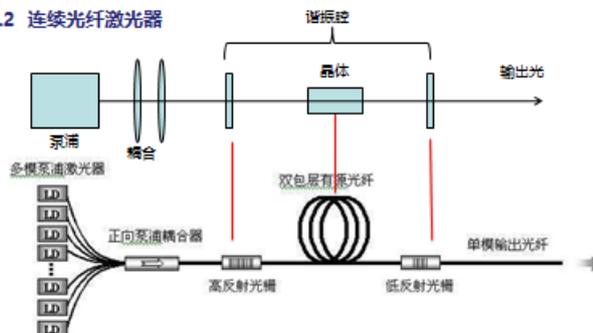


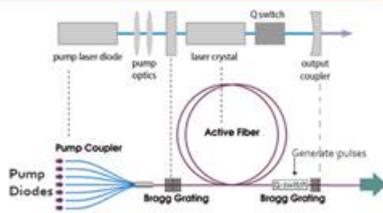
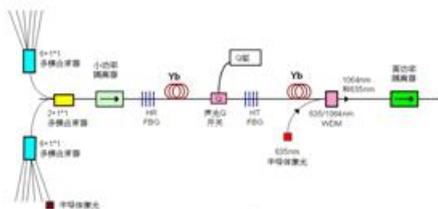
图 1A 单端泵浦连续单模大功率全光纤激光器光路示意图

目前功率可做到上万瓦

4 常用光纤激光器的特点及构成

4.3 调Q光纤激光器

其特点为脉宽一般为ns量级，目前最高功率可做到几百W



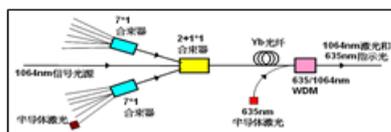
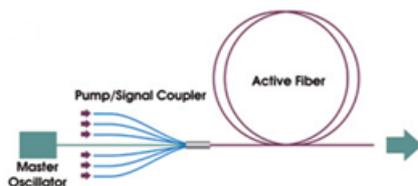
光纤Q开关



4 常用光纤激光器的特点及构成

4.4 MOPA结构光纤激光器

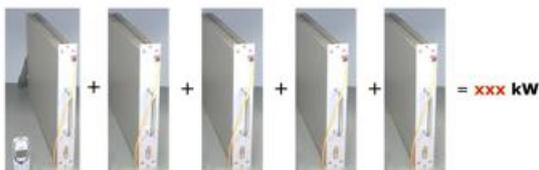
MOPA激光器的特点就是脉冲可以做的很窄（窄纳秒、皮秒、飞秒均属于这种结构），频率可以做的很高



4 常用光纤激光器的特点及构成

4.5 高功率光纤激光器实例

IPG



Modular Multi-KW Fiber Laser
Very High Beam Quality

5 常用CO2激光器的特点及构成

5.1 CO2激光器的特点

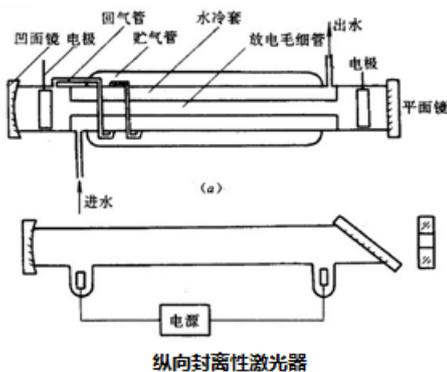
- 输出波长: 10.6um
- 工作物质: CO₂、He、N₂、Xe的混合气体。
- 激光由CO₂分子发射, 其他气体协助改善激光器的工作条件, 提高激光器输出功率水平和使用寿命。
- CO₂激光器是输出功率最高的气体激光器, 有连续输出50KW; 脉冲输出10⁴~12W的激光器。
- 多种结构形式



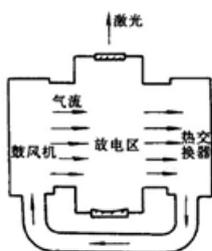
CO₂激光器可分为:

- (1) 纵向封离型激光器
- (2) 纵向流动激光器
- (3) 横向流动激光器
- (4) 横向激励高压激光器 (TEA)
- (5) 射频激励激光器
- (6) 波导CO₂激光器
- (7) 气动激光器

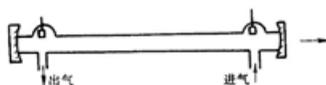
5 常用CO2激光器的特点及构成



5 常用CO2激光器的特点及构成

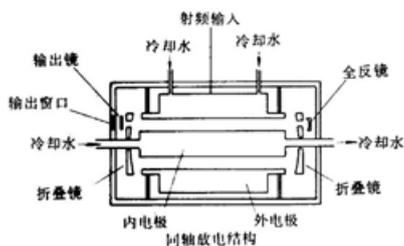


横向流动激光器

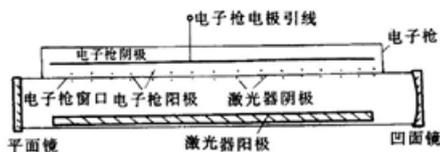


纵向流动激光器

5 常用CO2激光器的特点及构成



射频激励激光器



横向激励高气压激光器 (TEA)

5 常用CO2激光器的特点及构成

应用

- 低功率 (小于200瓦) CO2激光的应用

主要为电子工业 (如电阻制造、IC标志)、非金属加工业 (竹木雕、服饰、制鞋、饰品制造等) 和部份医疗和研究单位所使用。

- 中高功率(200瓦-1600瓦)CO2激光的应用

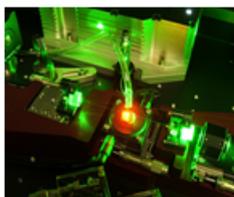
中高功率激光, 是目前CO2激光加工设备的主流, 主要用于钣金加工业。

- 高功率 (大于1600瓦) CO2激光的应用

大于1600瓦的高功率CO2激光, 主要被应用在金属焊接和表面处理上, 在工业先进国家已逐渐被国防、汽车和航天工业里一些特殊领域所采用

6 超快激光器

用于精密加工的超快激光器及其应用



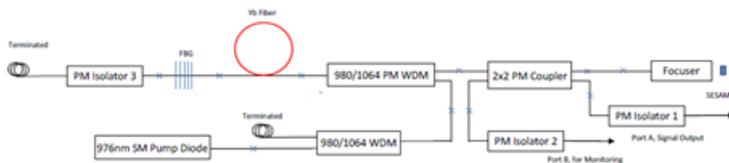
超快激光器的特点及发展现状

超快激光器的应用实例

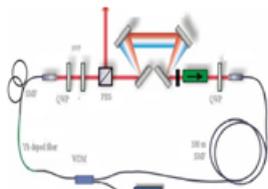
超快激光器的主要生产厂家及代表性产品

6 超快激光器

· 光纤激光种子源



皮秒光纤种子源
10ps, 20MHz, 10mW



2-Aug-18

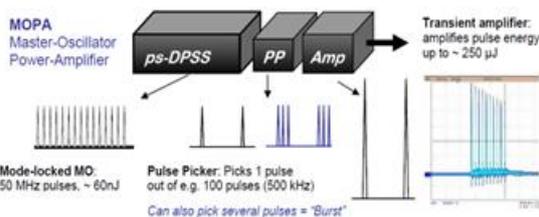
飞秒光纤种子源

Sintec Optronics Proprietary

37

6 超快激光器

超快激光的放大方法1——主振荡-功率放大 (MOPA) --- (Master Oscillator Power-Amplifier)

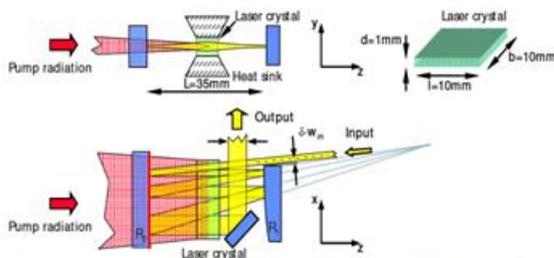


2010年, 德国 Lumenta 激光公司报道的最高功率可达 70W 的 RAPID 系列皮秒激光系统。其种子源为脉冲宽度 7ps, 单脉冲能量 60nJ, 重复频率 50MHz 的锁模激光器, 经过 Picks 选脉冲后频率可降为 500kHz, 最终放大后得到 250uJ 的皮秒单脉冲能量输出。

38

6 超快激光器

超快激光的放大方法2——行波放大 (INNO SLAB)

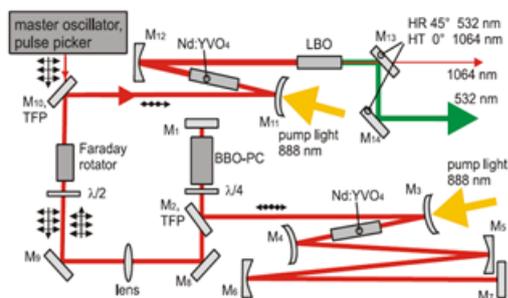


2011年, 德国 EdgeWave 公司的李代军和杜克明博士采用图结构的 Nd:YVO4 Innoslab 放大器, 经过两级放大, 分别将重复频率 2MHz, 单脉冲能量 1.4uJ 和重复频率 0.5MHz, 单脉冲能量 2.4uJ 的锁模种子光放大至 422W 和 380W。获得最大单脉冲能量 0.8mJ, 峰值功率 80MW[28]。

39

6 超快激光器

超快激光的放大方法3——再生放大



2009年，德国凯泽斯劳滕大学科研人员Markus. Luhrmann等人[20]采用高功率888 nm半导体激光器泵浦Nd:YVO₄激光晶体，实现重复频率20kHz，平均功率33.7 W的1064 nm再生放大激光输出，随后又输入后级放大器获得了高达58.7W的最终输出。上图为再生放大加后级放大光路图。

40

6 超快激光器

超快激光的放大方法4——碟片放大

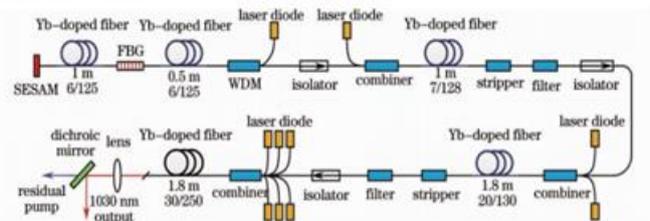


德国通快皮秒激光器

41

6 超快激光器

超快激光的放大方法5——皮秒光纤放大

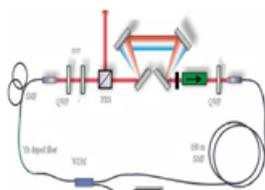


北京工业大学百瓦级全光纤皮秒脉冲激光器实验装置

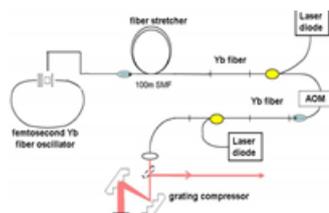
42

6 超快激光器

超快激光的放大方法6——飞秒光纤放大



飞秒光纤种子



飞秒光纤放大

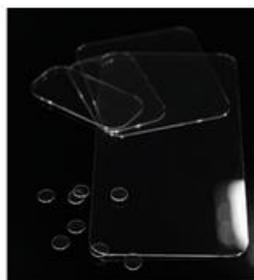
43

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

玻璃切割 900fs, 功率80W, 1030nm

强化玻璃切割: 康宁700um强化玻璃



44

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

精细打标切割



玻璃打标



玻璃切割



陶瓷切割



导电薄膜打孔切割



不锈钢彩色打标



阳极铝打黑



电池膜片切割



荧光膜切割

45

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

皮秒激光应用于碳纤维增强的聚合物的加工效果



采用皮秒加工的效果，相对于左上图的纳秒而言，皮秒可用于加工更加精细的机构，加工区域边缘的重铸层也更小。

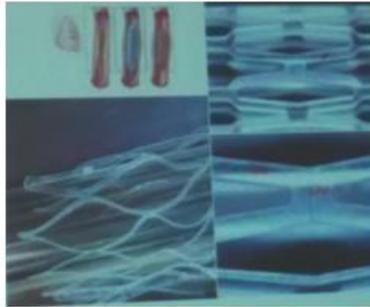
2-Aug-18

46

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

心脏支架



47

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

PCB钻孔

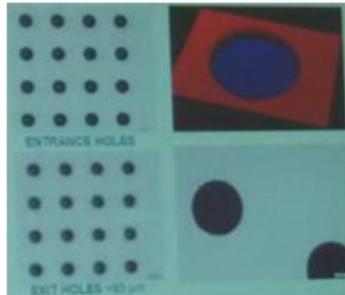


48

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

薄板打孔



49

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

切割——印刷电路板

900fs, 功率80W, 1030nm

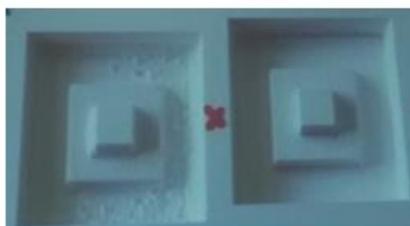


50

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

陶瓷体去除: 900fs, 功率80W, 1030nm



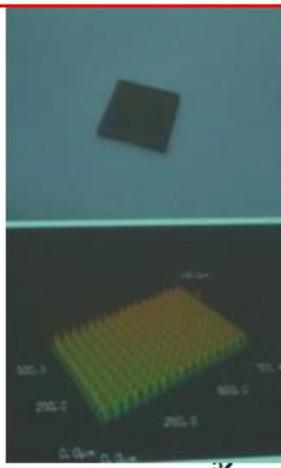
51

6 超快激光器

超快激光器的应用实例

表面结构化——金属

900fs, 功率80W, 1030nm



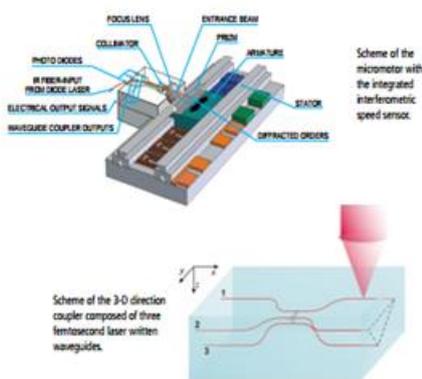
6 超快激光器

超快激光器的应用实例

波导写入

LASER PARAMETERS

Wavelength 1030 nm
Pulse length 350 fs
Repetition rate 1 MHz
Pulse energy 300 nJ
Scan speed 10 mm/s
20x focusing objective with 0.4NA

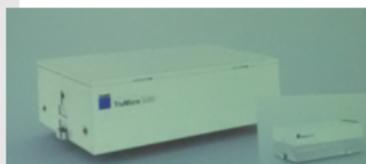


53

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

一、国外代表厂家
1. 通快 (TruMicro)



种子光+碟片再生放大技术，几乎是无敌的

	TruMicro	5000	5200	5300	Femolaser
最高平均功率	150W	120W	45W		120W
波长	1030nm	515nm	343nm		1030nm/515
脉冲宽度	<10ps	<10ps	<10ps		900fs/700fs
最高脉冲能量	500uj	300uj	50uj		200uj/125uj
重复频率					单发——1MHZ
光束质量					M2<1.3(一般<1.2)

54

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

2.相干 (Coherent)

板条放大超快激光器



System Specifications ^{1,2,3,4}	HyperRapid NX					
	1064	532	355	1064	532	355
Single Wavelength Output (nm)	1064	532	355	1064	532	355
Amplifier Pulse Repetition Rate (Hz)	200 to 1000			400 to 1000		
Output Pulse Repetition Rate Range (kHz)	0 to 1000					
Pulse Duration (ps)	< 5					
Average Power (W)	250	325	215	2500	320	230
Pulse Energy (μJ)	2750	3125	275	2750	3125	275
Average Power Stability over 8 hours, Constant Ambient Temperature (RMS vs. %)	±1					
Pulse-to-Pulse Energy Stability (RMS vs. %)	±1	±1	±1	±1	±1	±1
Beam Quality Parameter (M ²)	±1.1					

55

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

3. 光谱物理 (SP-Spectra-Physics)



	Spirit HE 1040-46	Spirit HE 1040-46-SHG
Wavelength		1040 nm ±5 nm
Output Power		>16 W at 200 kHz
Pulse Energy		>80 μJ at 200 kHz >120 μJ at 100 kHz (12 W)
Wavelength (SHG)	NA	520 nm ±5 nm
Output Power ² (SHG)	NA	>8 W at 200 kHz >6 W at 100 kHz
Pulse Energy ² (SHG)	NA	>40 μJ at 200 kHz >60 μJ at 100 kHz
Basic Repetition Rate ³	100 kHz, 200 kHz or 1 MHz	
Pulse Selection	Integrated pulse picker (AOM) for single shot to 1 MHz operation	
Pulse Width	<400 fs	
Pulse Width Tunability ^{4, 5}	400 fs to 10 ps, tunable by software	
Power Stability	<1% rms over 100 hours (for 1040 nm and 532 nm)	
Pulse-to-Pulse Stability	<2% rms over 5 min	
Spatial Mode	TEM ₀₀ , M ² < 1.2	

56

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

法国Amplitude Systemes公司

工业化设计,紧凑,体积小
脉宽<400fs,脉宽可调至10ps
高脉冲能量
高重复频率



技术参数:

型号	Satsuma	Satsuma HP	SatsumaHP2
脉宽	< 400 fs	< 400 fs	<400fs
脉冲能量	> 10 μJ	> 20 μJ	40μJ
平均功率	> 5 W	> 10 W	20W
重复频率	0 to 2 MHz	0 to 2 MHz	From 0 up to 2MHz
波长	1030 nm	1030 nm	1030nm
M ²	1,2	1,2	1,3
光束质量	TEM ₀₀	TEM ₀₀	TEM ₀₀

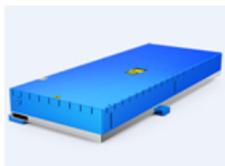
2-Aug-18

57

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

1、武汉华日激光技术有限公司 板条放大超快激光器



参数	Olive-1064-50
平均功率	>50W@500kHz
波长	1064nm
脉冲宽度	<10ps
重复频率	50kHz-1000kHz
光束质量	M ² ≤1.3

58

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

3、大恒光电 再生放大超快激光器



Wavelength/ 波长	1064nm	532nm	355nm
Pulse Energy (@200kHz) / 单脉冲能量	MAX: 100uJ @200kHz	MAX :60uJ @200kHz	MAX :30uJ @200kHz
Repetition Rate/ 重复频率	1Hz~1MHz	1Hz~1MHz	1Hz~1MHz
Pulse duration/ 脉冲宽度	<12ps	<10ps	<8ps
Beam Diameter/ 光斑尺寸	1.5mm+/-10%	1.5mm+/-10%	1.5mm+/-10%
Spatial Mode/ 激光模式	TEM ₀₀ (M ² <1.5)	TEM ₀₀ (M ² <1.5)	TEM ₀₀ (M ² <1.5)

59

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

板条放大超快激光器

4、北京卓镭激光技术有限公司



Version	BLAZER-30			BLAZER-60		
Wavelength (nm)	1064nm (532/355 option)					
Repetition Rate ¹ (kHz)	200 - 1000 kHz					
Average Power (W)	Average Power (W) at Different Rep. Rates ¹					
Wavelength (nm)	200kHz	500kHz	800kHz	400kHz	600kHz	800kHz
1064nm	25	30	30	50	50	50
532nm ²	15	15	13	30	25	21
355nm	6	10	9	10	16	15
Pulse Energy (μJ)	Pulse Energy (μJ) at Different Rep. Rates					
Wavelength (nm)	200kHz	500kHz	800kHz	400kHz	600kHz	800kHz
1064nm	125	60	38	125	83	63
532nm	75	30	16	75	42	26
355nm	30	20	11	25	26	19

60

6 超快激光器

超快激光器的主要厂家及代表性产品

5、上海国神光电科技有限公司



光纤超快激光器

参数/Parameters	单位/Unit	Y112-2P101
工作模式(Working Mode)		脉冲(Pulse)
中心波长(Center Wavelength)	nm	1040±10
最大输出功率(Max Optical Average Power)	W	10
典型输出功率(Typical Output Power)	W	1.5w@1000Hz
脉冲宽度(Pulse Width)	ps	<20
输出脉冲个数(Pulse Number)		0-13
重复频率(Pulse Repetition Rate)	KHz	50-1000
偏振(Polarization)		线偏(Linear)
最大脉冲能量(Max Pulse Energy)	μJ	15
光束质量(Beam Quality M ²)		< 1.2

参数/Parameters	单位/Unit	Y112CPA
工作模式(Working Mode)		Pulse
中心波长(Center Wavelength)	nm	1040±10
最大光功率(Average Power)	W	1-10
典型光功率(Typical Power)	W	5w@500KHz
脉冲宽度(Pulse Width)	fs	< 600
重复频率(Pulse Repetition Rate)	MHz	0.1 - 5
偏振(Polarization)		linear
消光比(Extinction Ratio)	dB	> 20
脉冲能量(Pulse Energy)	μJ	10
光束质量 M ² (Beam Quality M ²)		< 1.3

THANKS
谢谢聆听