

高功率光纤激光器新进展



楼祺洪研究员
中科院上海光机所
2013年11月



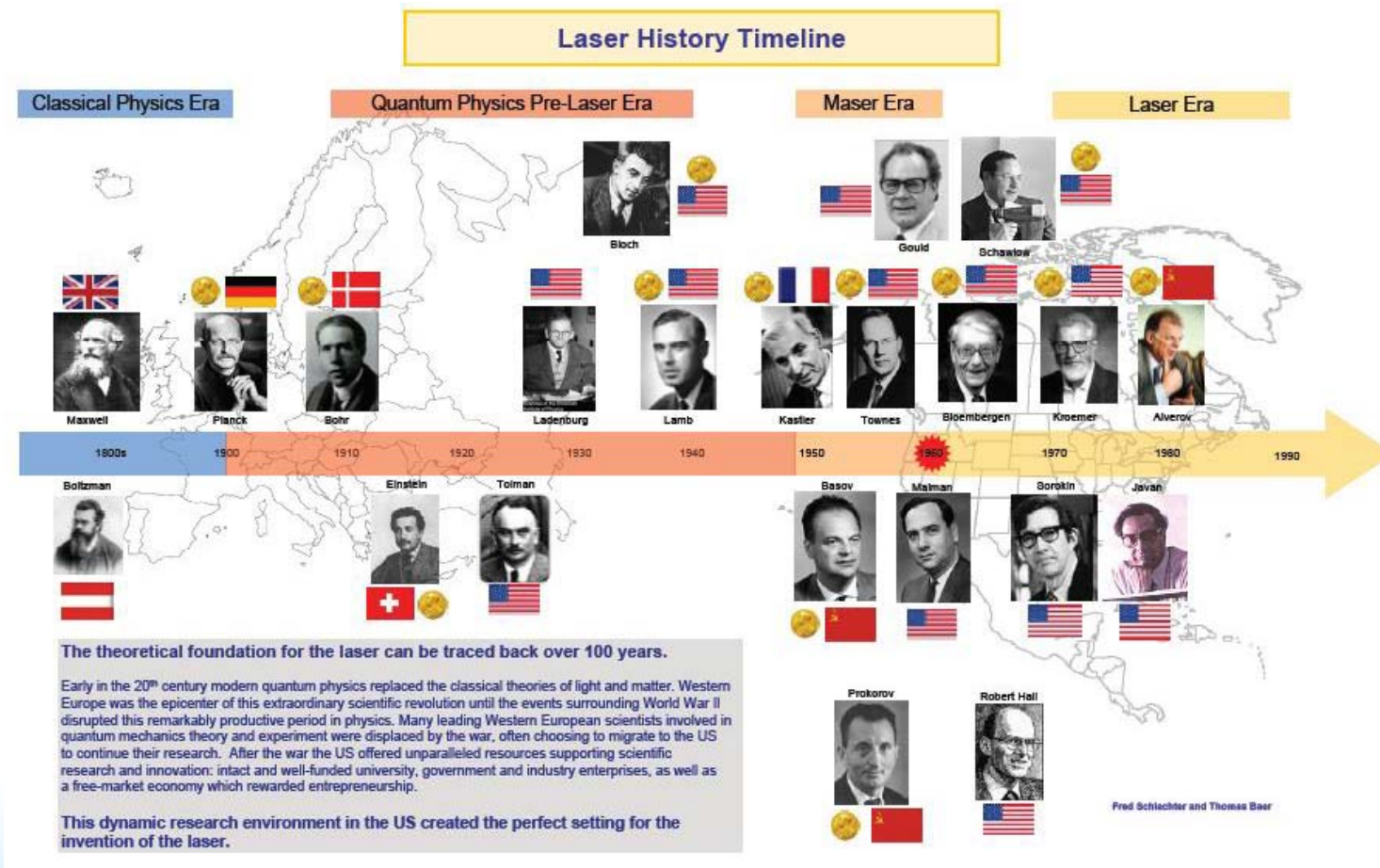
中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

引言

自问世以来，光纤激光器就以其低阈值、高效率、窄线宽、可调谐和高性价比等优点而倍受人们的关注。随着光纤制造工艺与半导体激光器生产技术日趋成熟，光纤激光器也取得了迅速的发展。国内处有众多的高校、研究所和公司参与到光纤激光器的研究开发中来，并相继推出了各种成熟的产器。随着光纤技术的发展，关键问题的解决，以及新型光纤激光器的出现，光纤激光器的应用领域不断扩大，光纤激光器在激光器市场份额逐年增加，光纤激光器进入了黄金发展时期。



Laser history



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS



disk

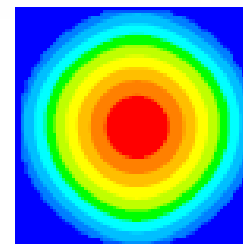


slab

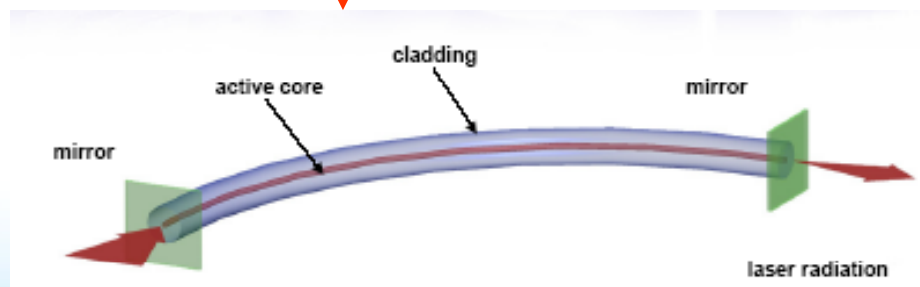
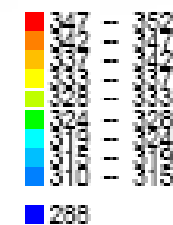


rod

高功率时存在严重的
热透镜效应和热
致双折射



temperature [K]



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

History of the fiber

- Optical Fiber
- 1965 高锟
- 1970' 1000dB/km ----- 20dB/km
- 1987' EDFA optical fiber communication
- 1988 Double cladding fiber
- 1999 100W fiber laser
- 2009 Nobel prize for 高锟
- 2010' 10000W fiber laser



光纤之父高锟

- 高锟的发明使信息高速公路在全球迅猛发展，这是他始料不及的。他因此获得了巨大的世界性声誉，被冠以“光纤之父”的称号。美国耶鲁大学校长在授予他“荣誉科学博士学位”的仪式上说：“你的发明改变了世界通讯模式，为信息高速公路奠下基石。把光与玻璃结合后，影像传送、电话和电脑有了极大的发展……”高锟此后几乎每年都获得国际性大奖，但由于专利权是属于雇用他的英国公司的，他并没有从中得到很多的财富。中国传统文化影响极深的高锟，以一种近乎老庄哲学的态度说：“我的发明确有成就，是我的运气，我应该心满意足了。”



高锟得到的奖励

- 高锟获得2009年诺贝尔物理学奖：
- 2009年10月6日瑞典皇家科学院宣布，将2009年诺贝尔物理学奖授予英国华裔科学家高锟以及美国科学家威拉德·博伊尔和乔治·史密斯。
- 瑞典皇家科学院说，高锟在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性成就，他将获得今年物理学奖一半的奖金，共500万瑞典克朗（约合70万美元）；博伊尔和史密斯发明了半导体成像器件——电荷耦合器件（CCD）图像传感器，将分享今年物理学奖另一半奖金。



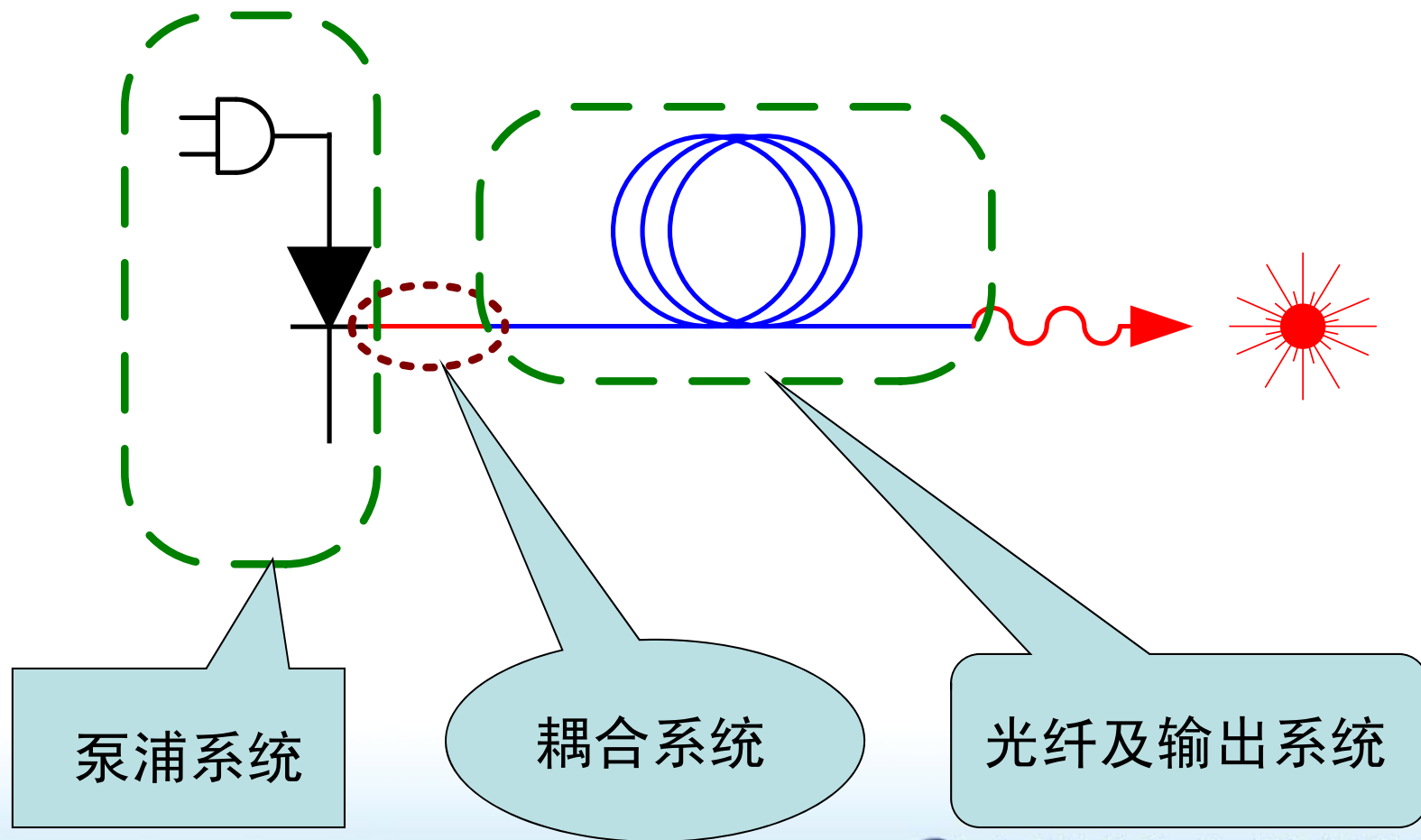
高锟提出的问题

- 1960' 红宝石激光是否可以成为光通信载体
- 有何种物质具有高透明度，光可以远距离传输
- 1970' 将所有不纯元素含量小于 10^{-6} 至 10^{-8} 以减低损耗
- 搞完玻璃在高速冷却下应有较少的微组织
- 1980' 负离子沉积法
- 化学气相沉积



光纤激光器概述

半导体泵浦全固态光纤激光器基本结构



光纤激光器优点

- 1、增益介质的表面积/体积比大
- 2、优异的双波导限制机制
- 3、固有的全封闭柔性光路
- 4、光路具有免维护性
- 5、单条宽发光区易于采用多模泵浦激光器
- 6、寿命长
- 7、体积小重量轻
- 8、输出功率大
- 9、节水节电成本
- 10、造价不断降低

高功率下的极好光束质量，高光束质量下的极好电光效率，高功率高光束质量下的极小体积、可移动性和柔性。



光纤激光器概述

光纤激光的主要特点

热管理

Yb转换效率高（70%）

表面积/体积比大

——产生的热量少

——有助于散热

光束质量

模式由波导结构限制

——热畸变

双折射畸变

其它方面

全固态、结构紧凑、输出功率高等



光纤激光器概述

光纤激光的缺点

- ◆ 纤芯功率密度高 – 激光伤,非线性效应影响功率提升
(**CW or Pulsed, SRS, SBS,SPM**)
- ◆ 储能体积小 – 脉冲能量低 (**10mJ-100mJ**)
- ◆ 增益高 – 抑制自激比较困难
- ◆ 光子暗化效应Photodarkening (掺杂浓度不能太高)

充分利用其优点，对缺点则设法避免或克服

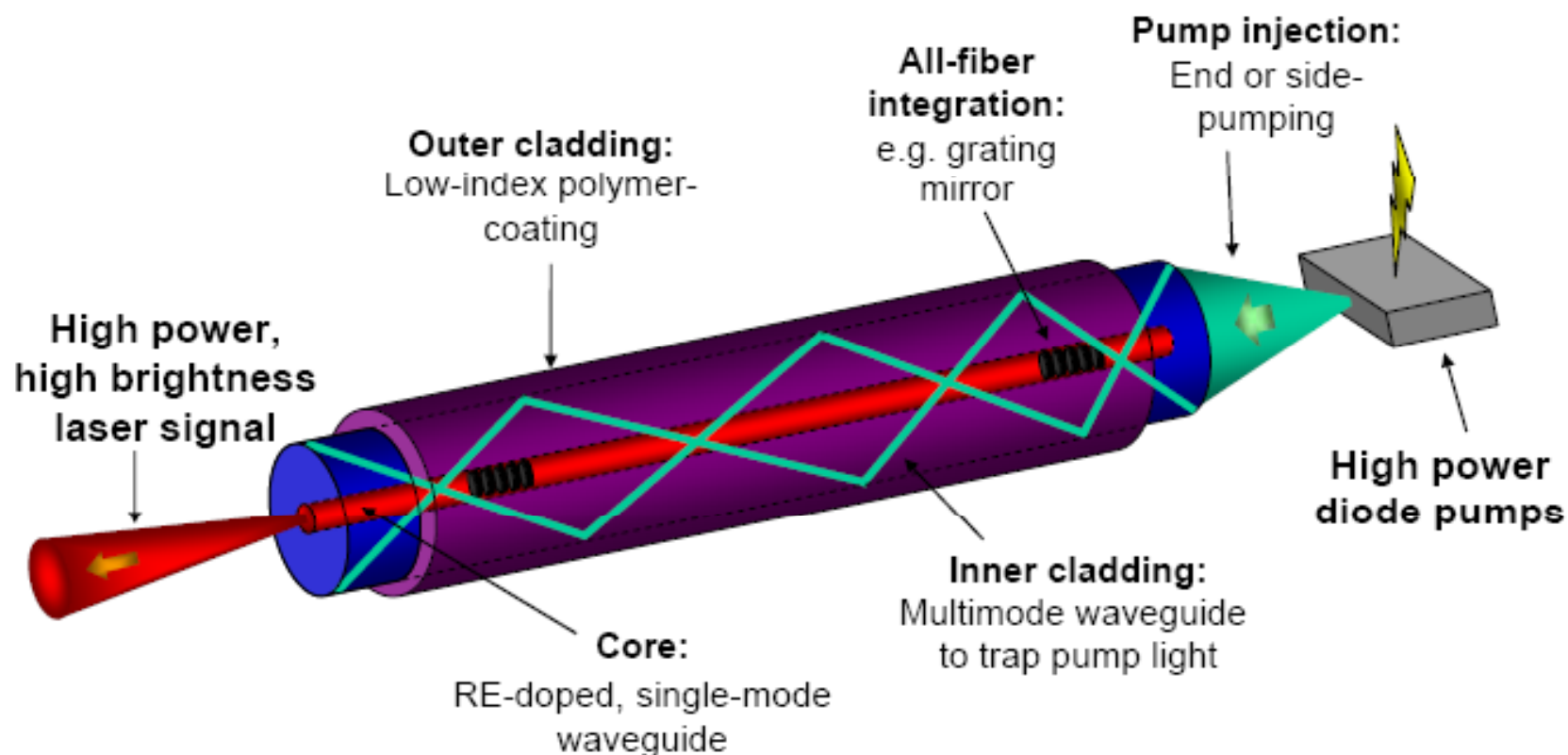


光纤激光器与其他激光器的类比

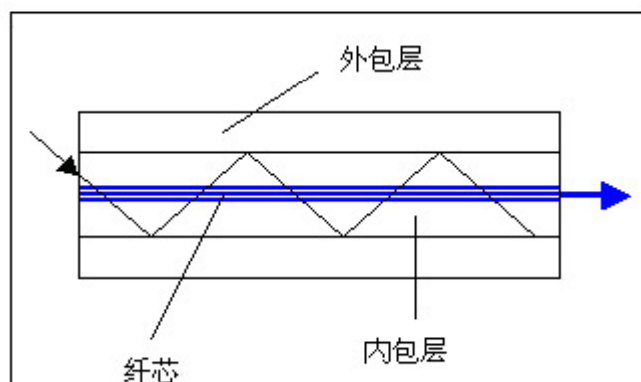
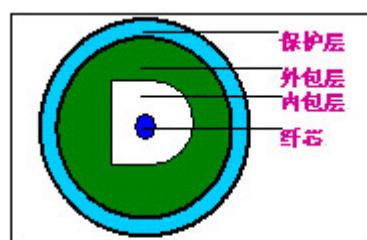
	CO ₂	LP Nd:YAG	DP Nd:YAG	HPFL
E/O Efficiency, %	5-10	2-3	4-6	16-20
Electric Power, kW (no chiller)	~ 50	~ 130	~ 80	20-25
Footprint, m ² (no chiller)	6	5	3	0.5
Water, m ³ /hr	6-8	20-25	~ 15	<2
Maintenance, Khrs	1-2	0.5	2-3	10-15
Pump Replace, Khrs	n/a	0.5-1	2.5	>50



双包层光纤结构



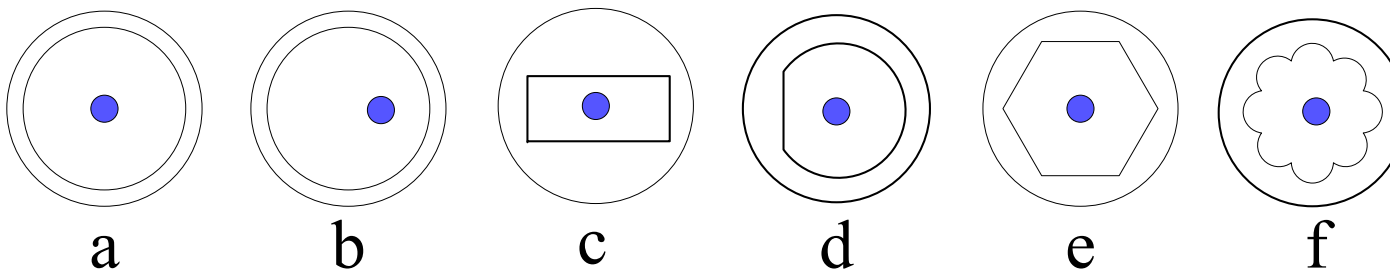
双包层光纤的结构



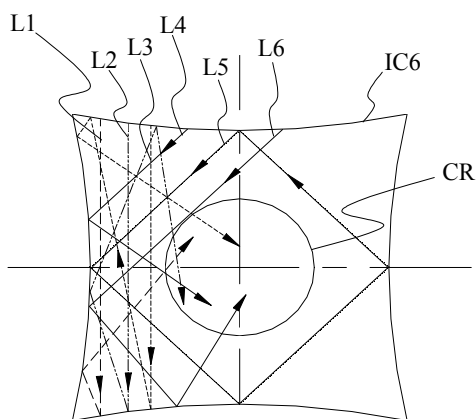
	美国 JDSU	德国	英国	中国 fiberhome
截面照片				
内包层	矩形 170x330 μm $NA_1=0.46$	D 形 400/350 μm $NA_1=0.37$	D 形 400/360 μm $NA_1=0.48$	D 形 450/400 μm $NA_1=0.36$
纤芯	直径 9 μm $NA_0=0.1$	直径 12 μm $NA_0=0.15$	直径 30 μm $NA_0=0.08$	直径 16 μm , 30 μm $NA_0=0.08$
掺杂浓度	1.5 wt. %	6500 mol ppm	8000 mol ppm	6500 mol ppm
光纤长度	50m	40m	24m	6m, 15m
斜率效率	60%	67%	65%	60%, 80%
中心波长	1100nm	1108nm	1108nm	1083nm



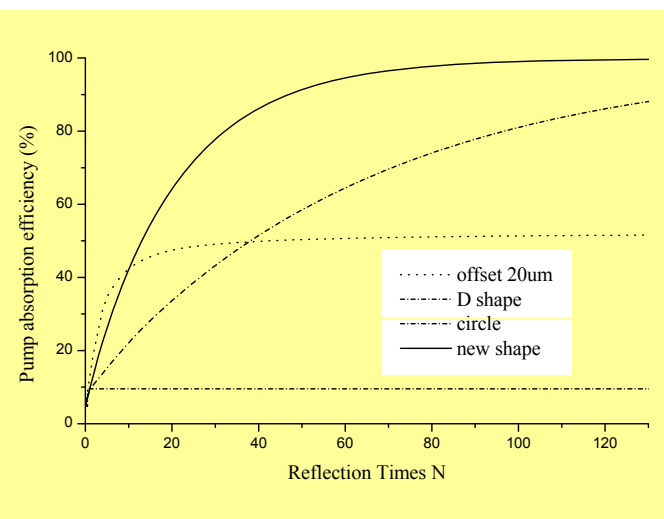
双包层光纤的结构



典型的内包层形状

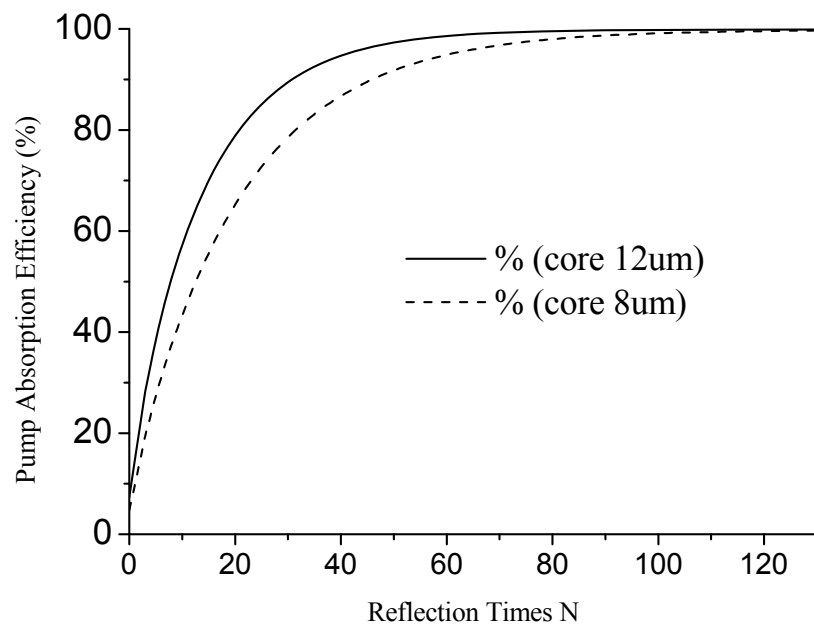


“非稳腔”内包层
王之江院士设计

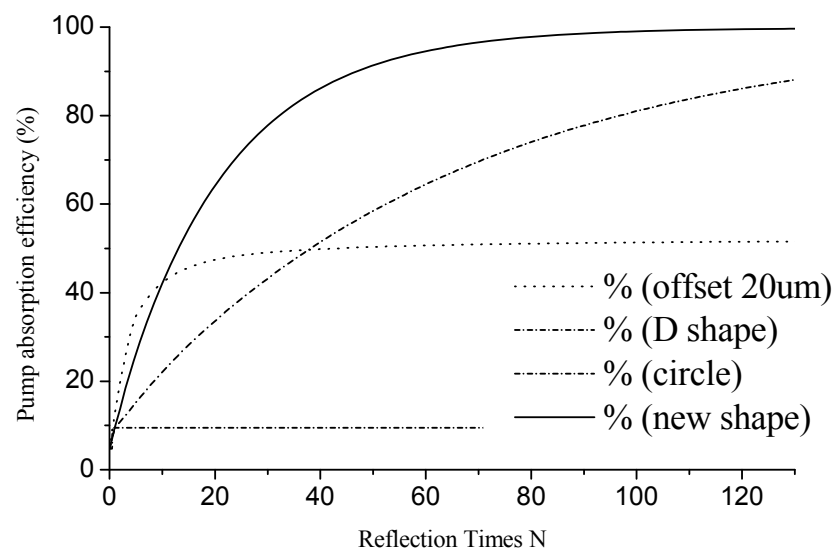


不同内包层形状光纤的泵浦吸收特性比较非稳腔的内包层形状几乎不存在局域模，因而可以达到非常高的泵浦吸收效率。

双包层光纤的结构



不同纤芯直径新型内包层光纤
的泵浦吸收特性

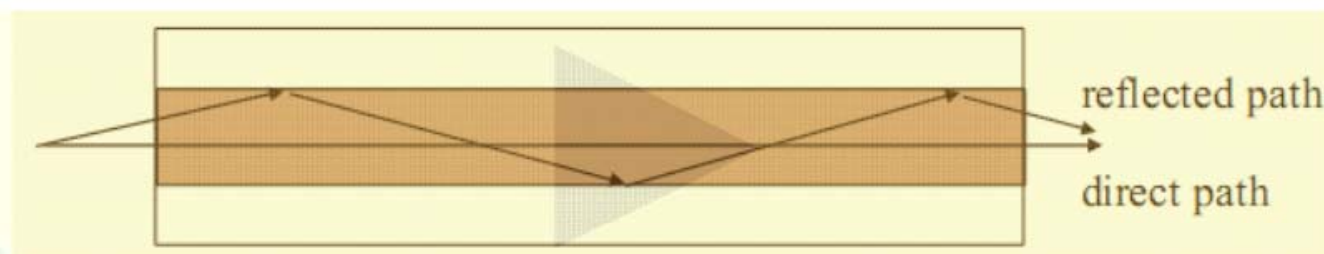


不同内包层形状光纤的泵浦吸
收特性比较



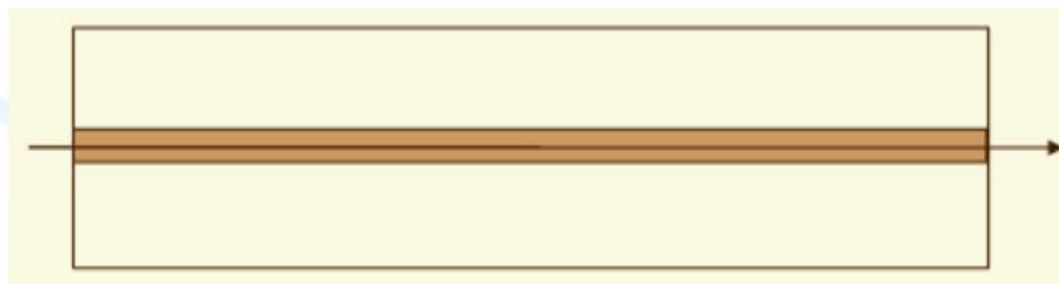
多模光纤与单模光纤

❖ Multimode fiber: multiple rays follow different paths



优点：芯径大，易于光耦合。缺点：模间色散。适用于低速短距离系统

❖ Single mode fiber: only direct path propagates in fiber



优点：无模间色散。缺点：不易于光耦合。适用于高速信号的长距离传输

模式的重要性质

- **归一化频率V**: 给定光纤中,允许存在的导模由其结构参数所限定。光纤的结构参数可由其归一化频率V表征: V值越大,允许存在的导模数就越多。

$$V = 2\pi/\lambda_0 \cdot a\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta}$$

- **导模的“截止”**: 除了基模之外,其它导模都可能在某一个V值以下不允许存在,这时导模转化为辐射模。使某一导模截止的Vc值称为导模的"截止条件"。
- **导模的“远离截止”**: 当导模的本征值 $\beta \rightarrow n_1 k_0$ 时,导模场紧紧束缚于纤芯中传输,称之为导模的“远离截止”。同样,每一个导模都对应于一合适的V值使其远离截止,称之为导模的“远离截止条件”。

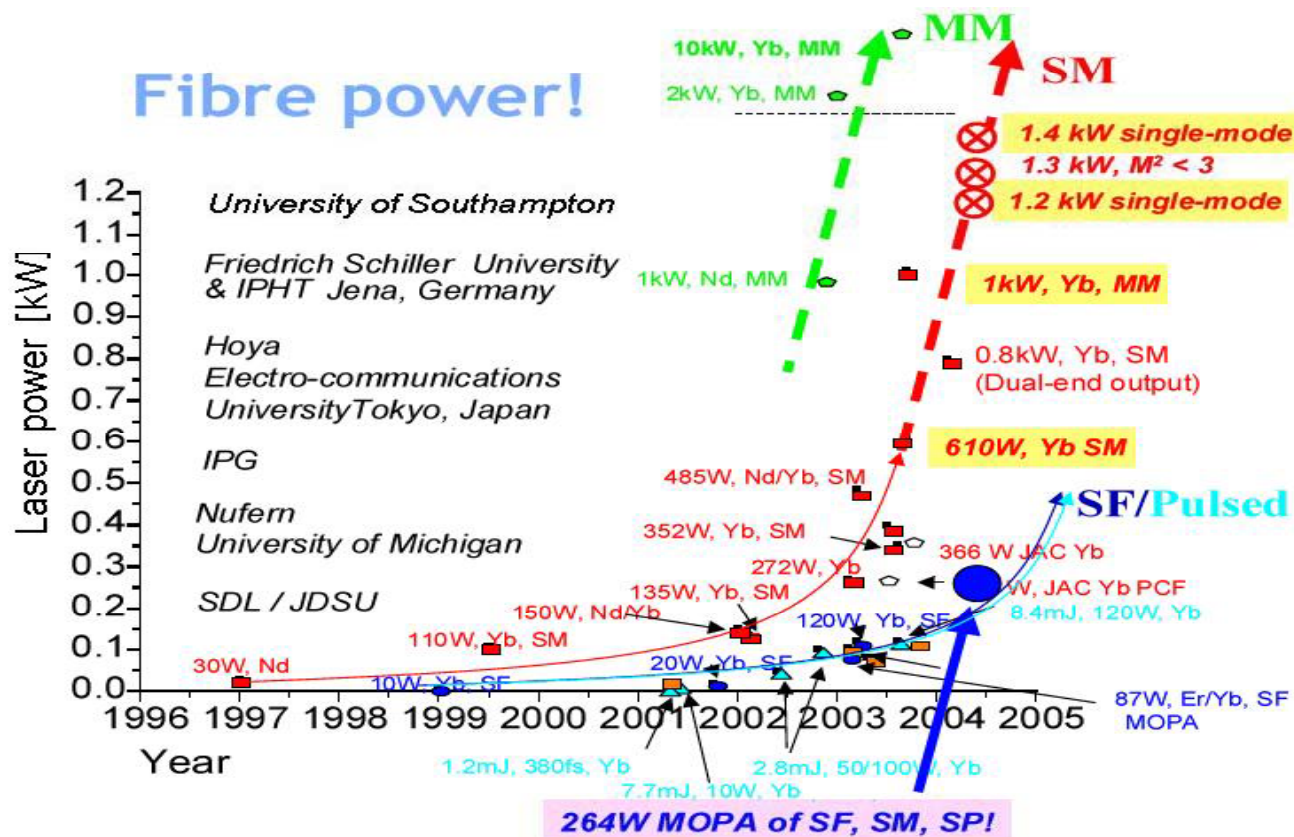
光纤激光器发展史

- ◆ **1964** 世界上第一个玻璃激光为钕玻璃光纤激光
- ◆ 光纤损耗、光纤拉制工艺、室温半导体激光器技术限制了光纤激光器的发展
- ◆ **1987** 英南安普顿大学和美国贝尔实验室证明**EDFA**可行性。采用常规单模光纤，不易实现高功率
- ◆ **1988** 年提出包层泵浦的双包层光纤，为实现高功率提供了有效途径。但圆形内包层效率低
- ◆ **1999** 半导体激光泵浦双包层光纤，实现110W，波长1120nm激光输出
- ◆ 国内关于双包层光纤激光器的研究始于20世纪90年代末。2006年，中国兵器装备研究院和上海光机所的掺Yb双包层光纤激光器输出功率先后突破了千瓦大关。
- ◆ **2001年后**，随着双包层光纤技术（特别是大模场面积光纤技术）和高功率泵浦及其耦合技术的发展，光纤激光的输出功率**飞速提升**

目前**10kw**单模光纤激光器已达到



光纤激光器发展史



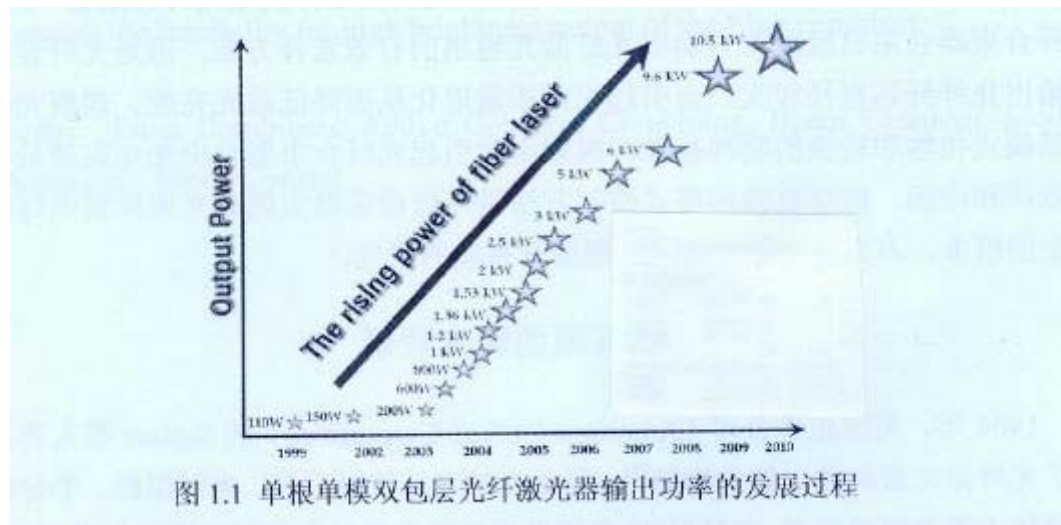
光纤激光器功率迅猛提高



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

10KW光纤激光器

百瓦到万瓦的发展过程



功率极限的评估

- 极限 LLNL J.W.DAWSON
- 36.6KW
- 单频 (100MHZ)
- 1,86 KW



高功率光纤激光器

尽可能地提高单根光纤激光器的输出功率，并保持其单模特性，追求的目的！

单纤的功率极限？ **10kW** 以上

影响双包层光纤激光器输出的因素

纤
芯

内
包
层

光
纤
长
度

泵
浦
光
特
性

高功率光纤激光器研究现状及新发展

1

单模光纤输出功率从千瓦向几万瓦发展

2

从连续光纤激光向各种脉冲宽度的脉冲光纤激光发展 (ns, ps, fs)

3

从1微米波段光纤激光向中红外波段发展



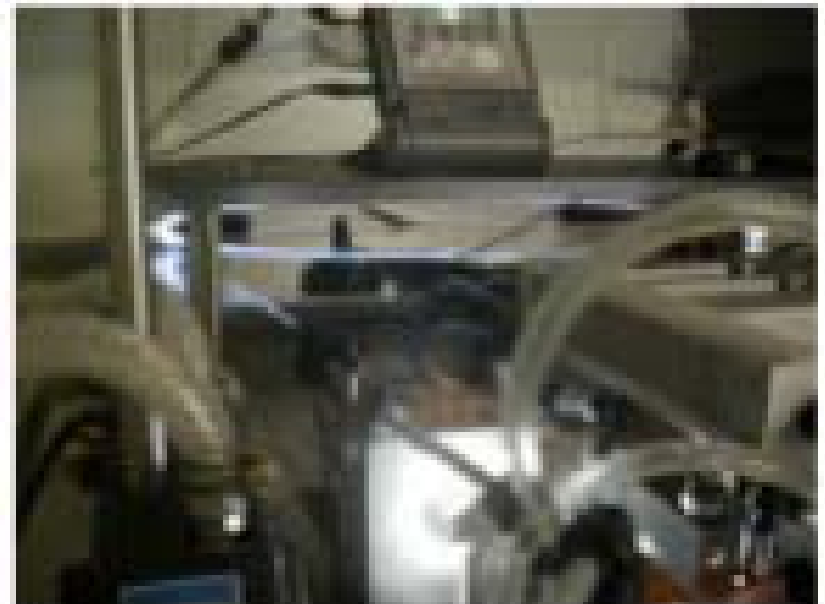
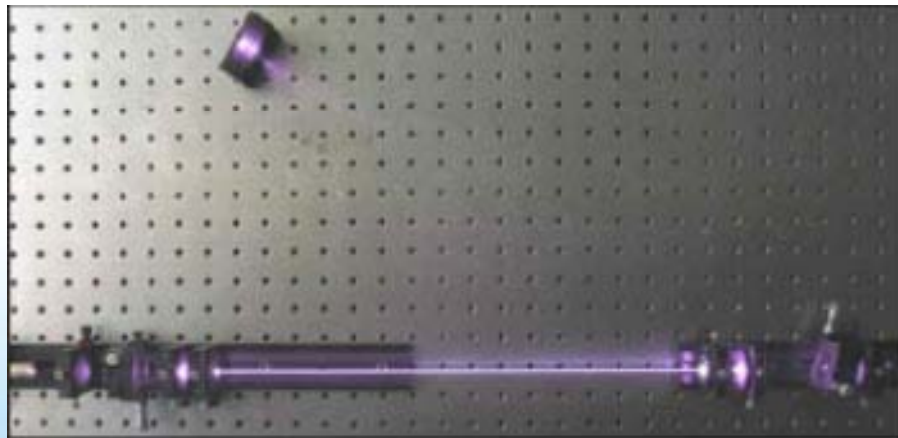
高功率光纤激光器

采用双包层光纤工艺降低纤芯的NA（目前最小为0.05），可以在保持单模的情况下，适当增大纤芯直径，**大模场光纤技术（Large-mode-area fiber, LMA）**。 **激光器 1.36kW**

光子晶体光纤技术，模场面积增大，克服端面损伤和非线性效应。目前单根光子晶体光纤激光器的最高输出达到2.5kW

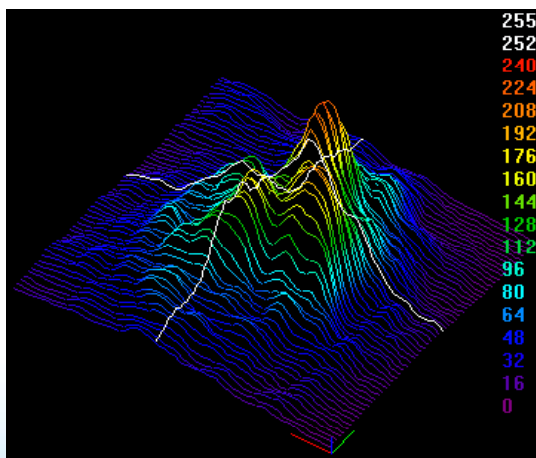
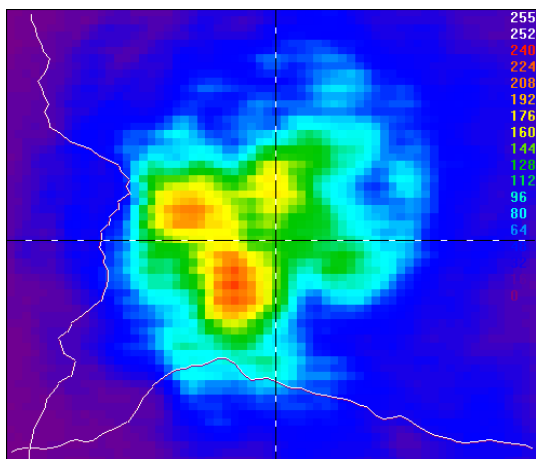
超大模场纤芯直径光纤的设计是一个重要的研究课题！通过光纤设计克服非线性效应！

光子晶体光纤激光的盘绕问题！

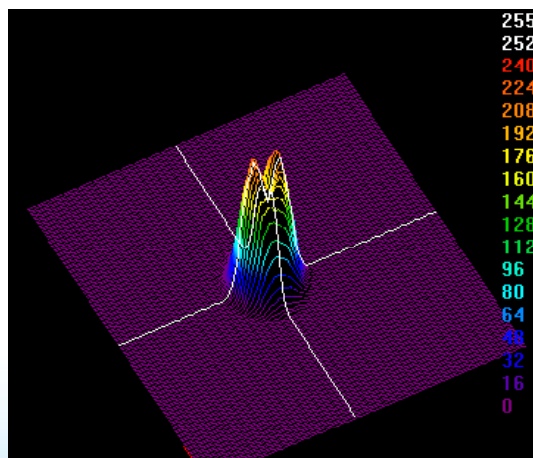
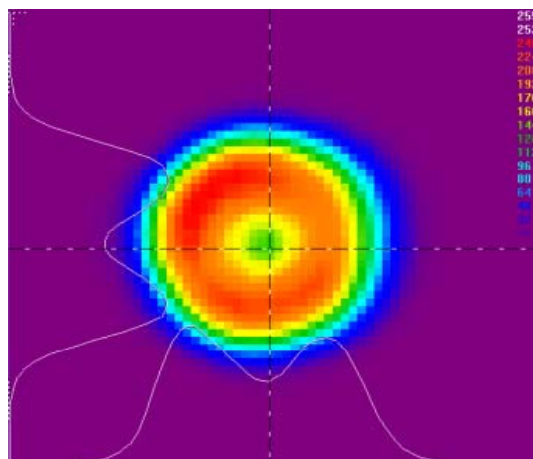


高功率光纤激光器

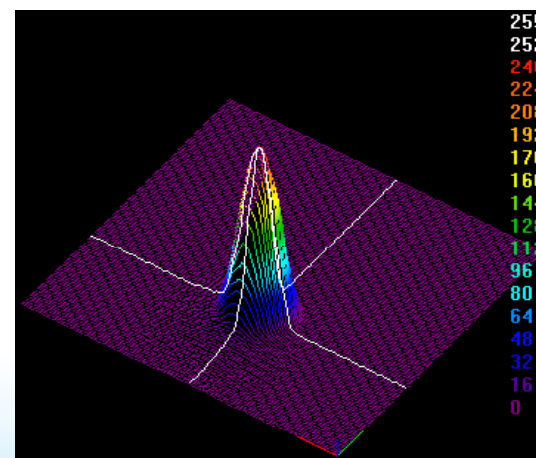
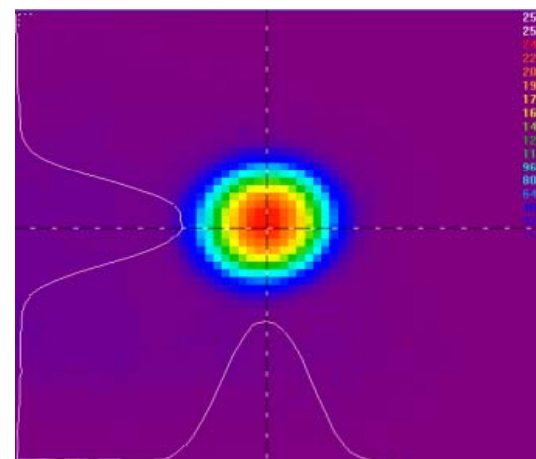
利用外腔、缠绕或拉锥等技术进行选模，在粗芯光纤中也可获得高光束质量的激光输出。



垃圾模式



环形模式



选模后的模式



中国科
Shanghai

机械研究所
Mechanics, CAS

光子晶体光纤概念

1991 年， Russell 等提出，如果在二维光子晶体中引入线形缺陷，那么由于光子带隙的作用，某些频率的光可以受限于线型缺陷中，从而达到传导光的目的。

光子晶体光纤被认为是实现大模场光纤最具有潜力的方法。其核心是纤芯缺陷，这种缺陷由空气孔构成，也可以用石英或掺杂的石英棒代替。光子晶体光纤的特殊结构决定了它具有许多传统光纤不能比拟的特性。其中最引人注目的是“无截止单模特性”。

不同的导光机制分类

- 折射率引导型光子晶体光纤
- 光子带隙光子晶体光纤



光子晶体光纤分类

- 折射率引导型光子晶体光纤

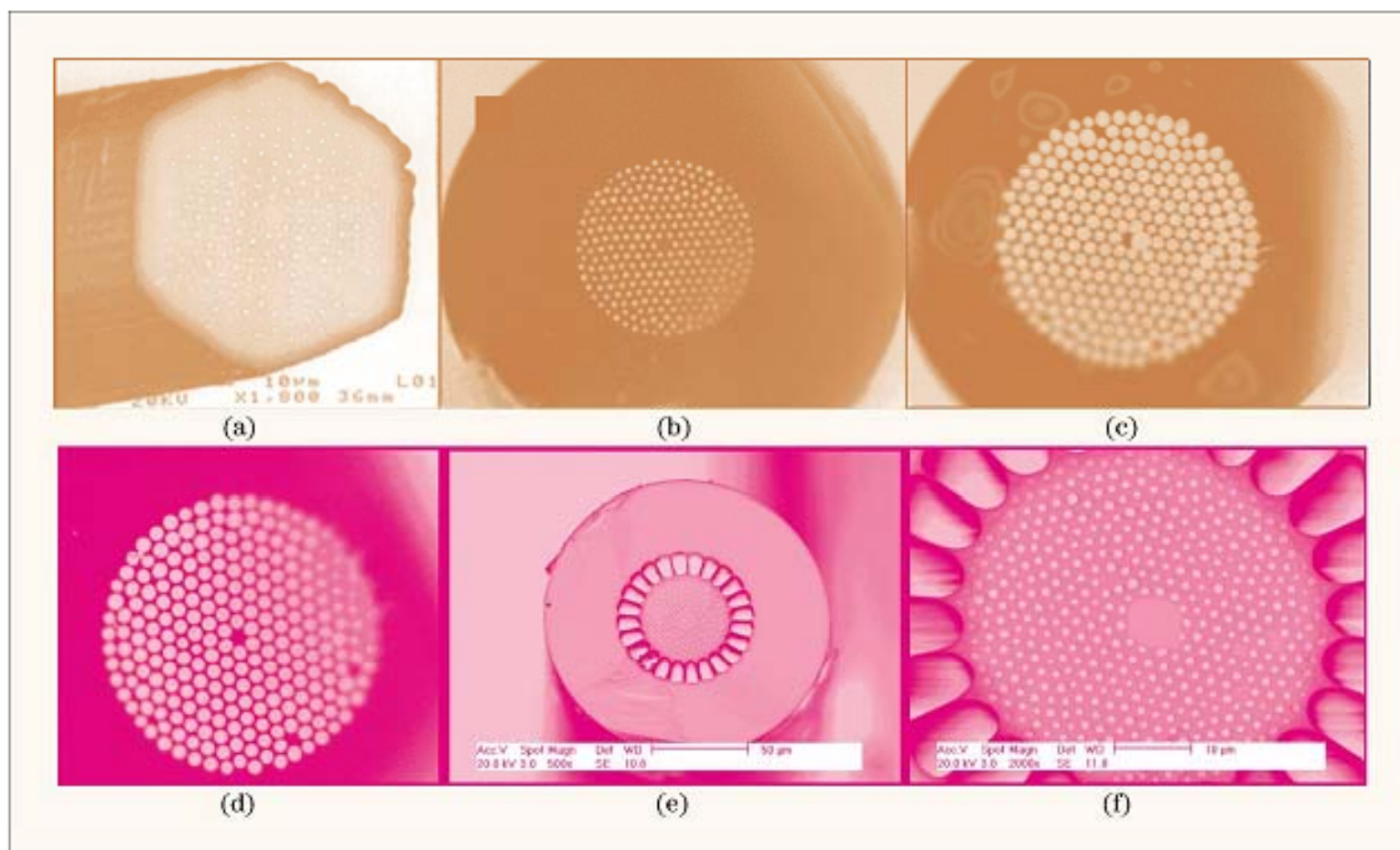
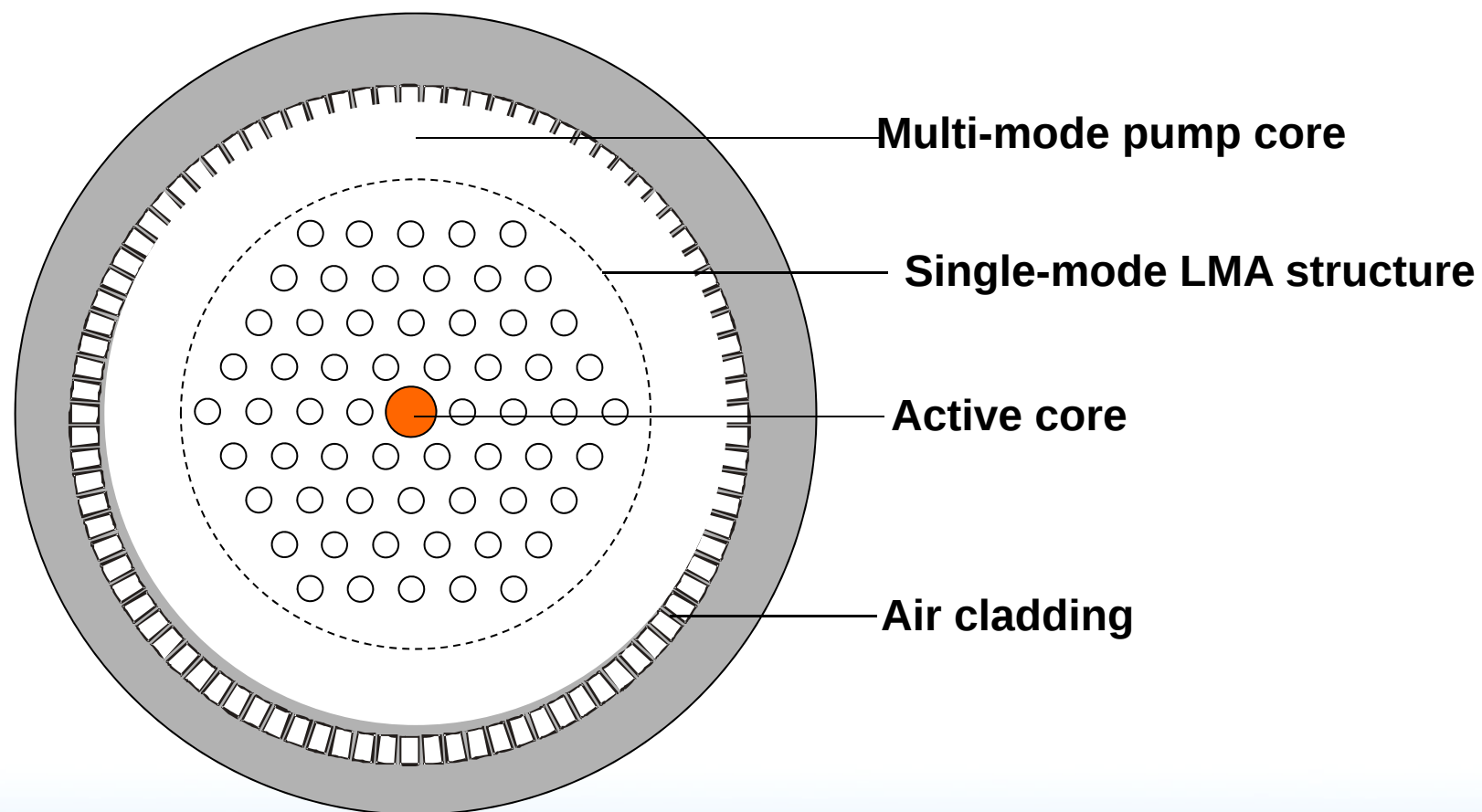


图 1 (a)历史上第一根光子晶体光纤, (b)~(f)为燕山大学实验室制备的几种折射率引导型光子晶体光纤; (b)大模面积光子晶体光纤; (c) 高双折射光子晶体光纤; (d) 高非线性光子晶体光纤; (e)大模面积双包层光子晶体光纤; (f) 图 e 的芯区放大图

双包层掺镱光子晶体光纤

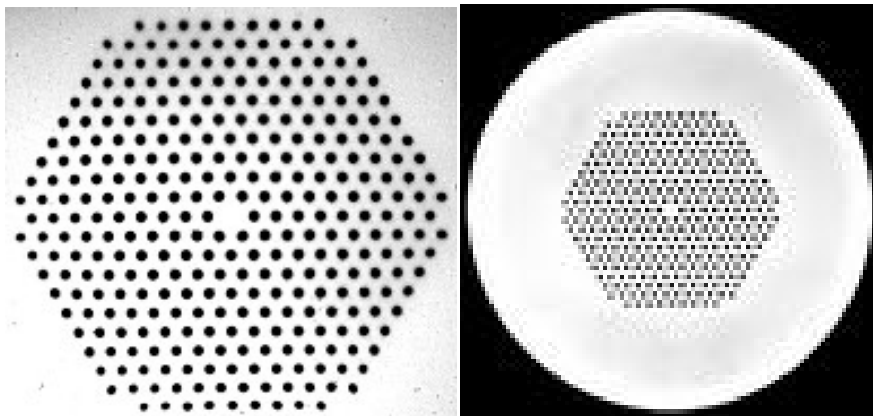


双包层掺铒光子晶体光纤特点

- 内包层周期排列的小孔将有效调节纤芯的数值孔径;
- 提高光纤的耐高温性能
- 获得较大的内包层数值孔径



光子晶体光纤激光器



应用领域:

- 光纤激光器和放大器
- 非线性光学
- 光纤通信
- 光纤传感

- 大模区和高数值孔径可以减弱掺杂光纤的非线性效应，热性能优越；
- 单根可以获得更高功率的单模激光输出，目前已有**1.53kW**的报道；
- 初步计算表明，光子晶体光纤激光器在实现单频、保偏输出时功率可以超过**2.8 kW**。

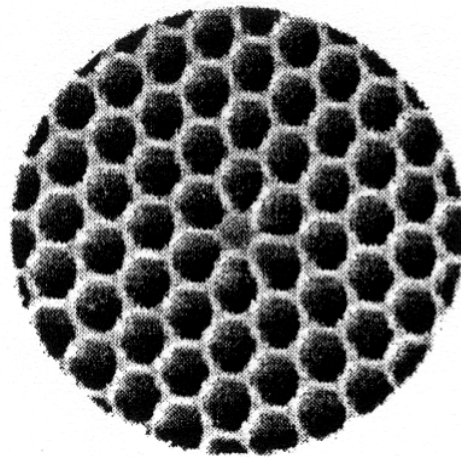


光子晶体光纤

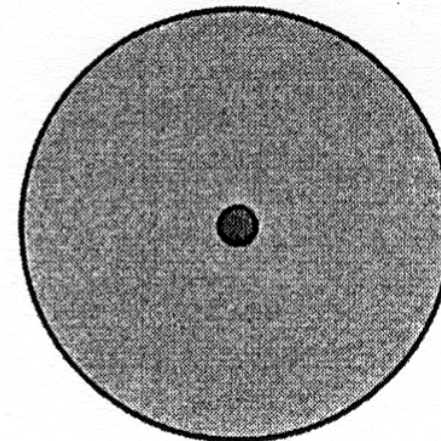
等效折射率理论

包层折射率

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - B_i}$$



PCF structure



Equivalent index profile

将光子晶体横截面用等效折射率来替代的原理图

光子晶体光纤的特性

- 无截止单模传输特性

传统光纤

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} = \frac{2\pi r}{\lambda} \times NA < 2.4048$$

r: 表示纤芯半径

光子晶体光纤

$$V = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

Λ : 表示空气孔间距



光子晶体光纤的特性

无截止单模传输特性

纤芯是由单根石英棒替换毛细管形成的且包层为三角形结构的光子晶体光纤，单模传输的条件应该改为

$$V = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} < \pi$$

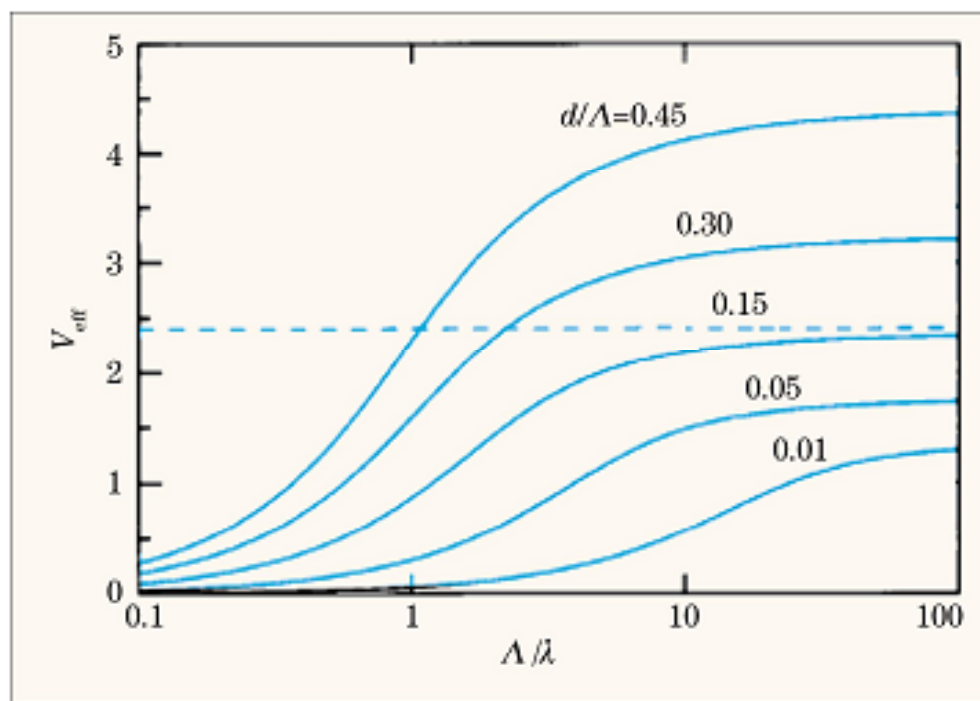


图 4 V 随 Λ/λ 的变化关系

光子晶体光纤的特性

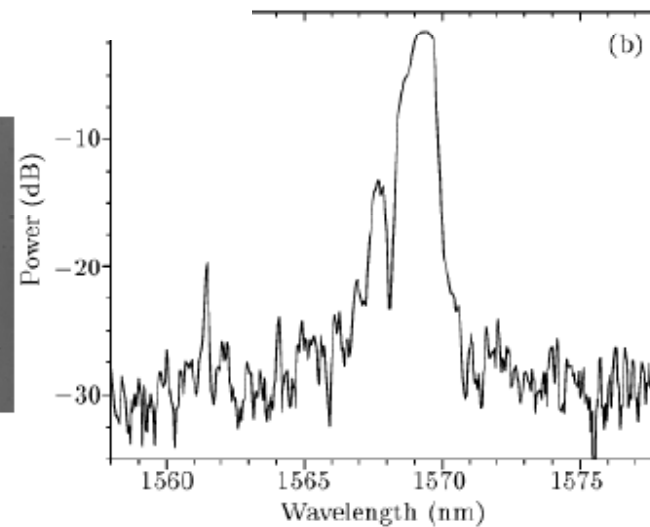
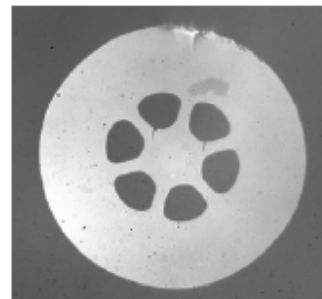
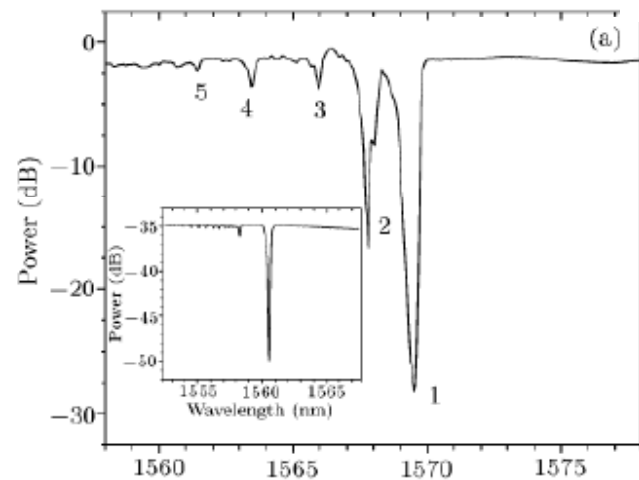
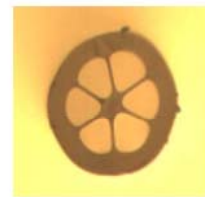
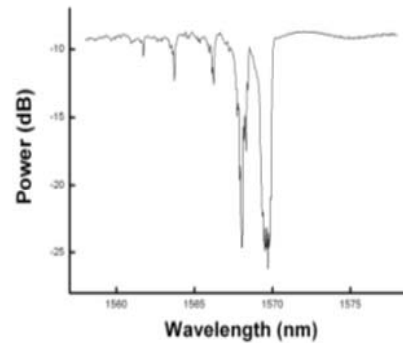
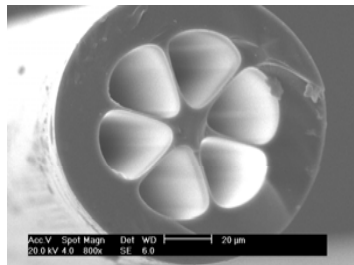
大模面积特性

- 调节包层中空气孔的大小——光子晶体光纤包层和纤芯的折射率差 Δn ——增大模场面积。
- 较小的包层空气填充率——大模面积光子晶体光纤在很宽的带宽实现单模传输——良好的光束质量。

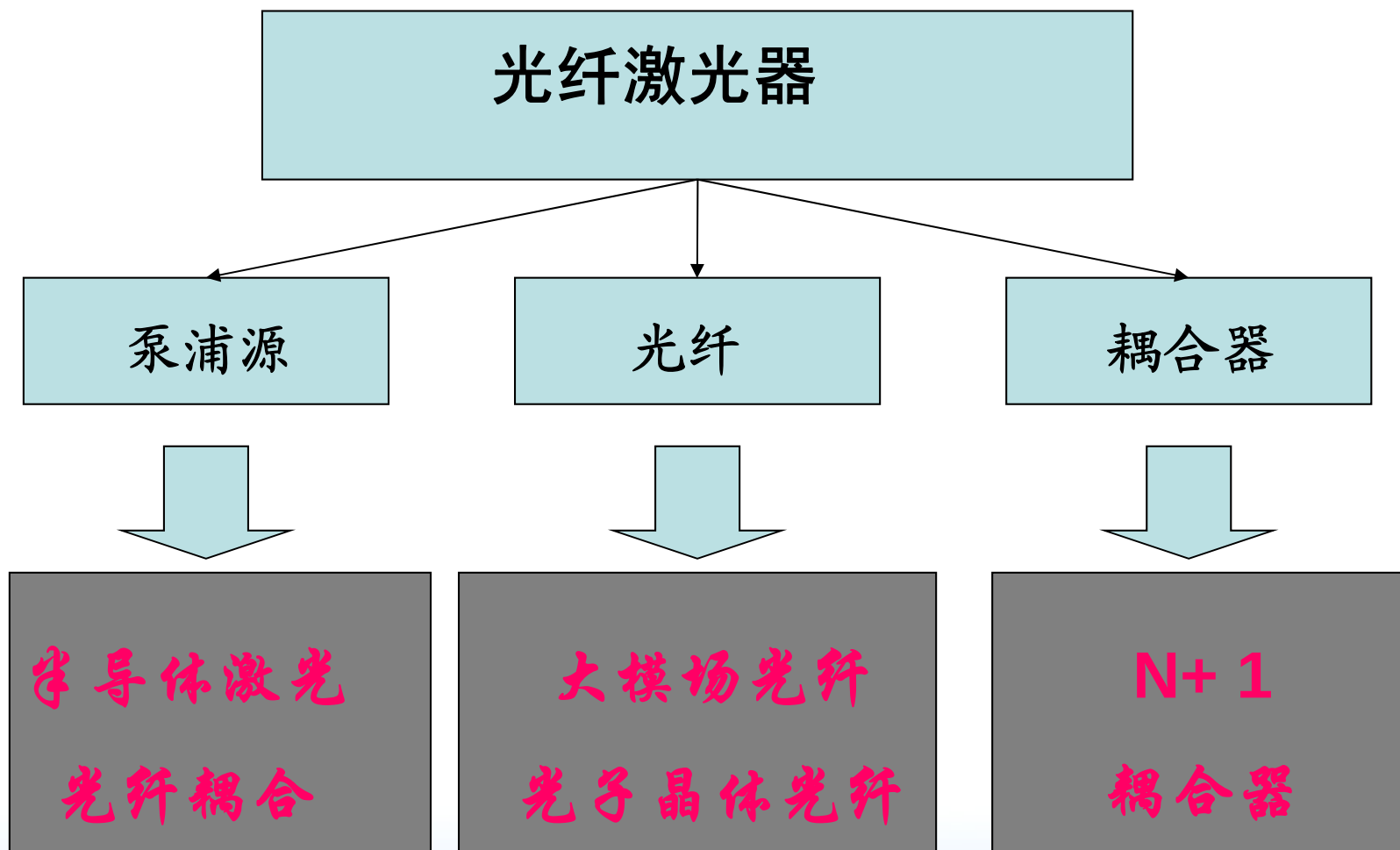


光子晶体光纤的特性

大模面积特性--柚子型微结构光纤



光纤激光器的关键技术

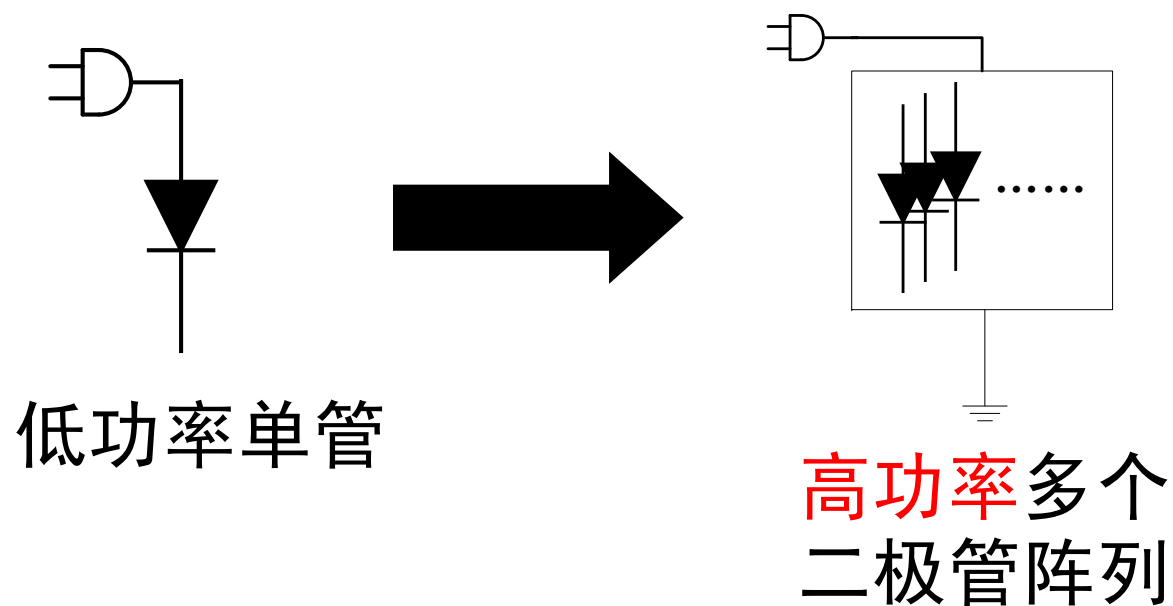


光纤激光器的关键器件

- 光纤光栅
- 光纤焊结器
- 调Q元件
- 种子源
- 光纤隔离器
- 模式匹配器
-



光纤激光器的泵浦技术



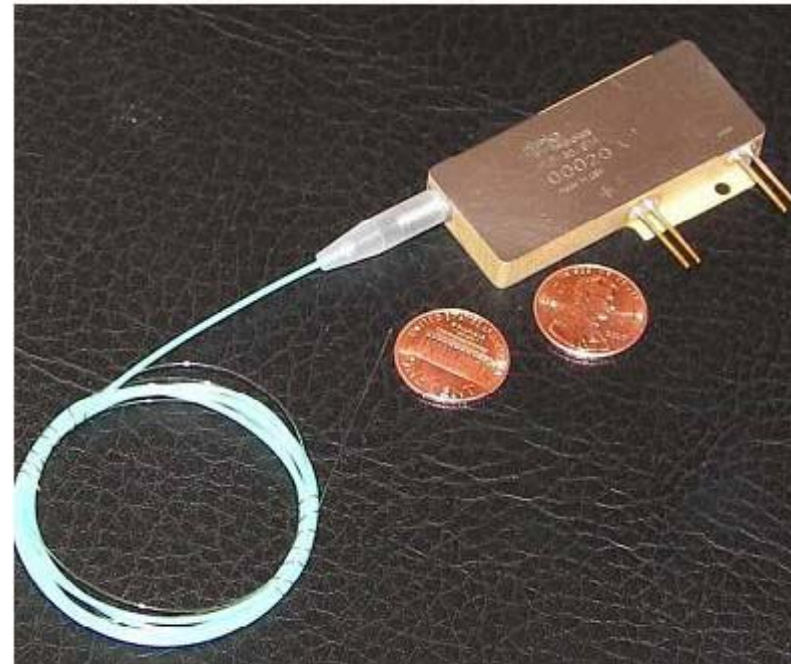
关键技术：LD的整形技术



一些半导体激光器



IPG 30W
974nm NA~ 0.12



IPG 60W
974nm NA~ 0.12



光纤激光器的泵浦技术

激光二极管阵列缺点

➤光束质量差

一维激光二极管阵列 (diode bar)

快轴与慢轴方向光束质量相差很多

快轴方向 近衍射极限

慢轴方向 BPP=**1200–1750 mm mrad**

➤谱线比较宽 (2–4nm)

光束整形方法

核心思想：使慢轴和快轴方向光束质量接近

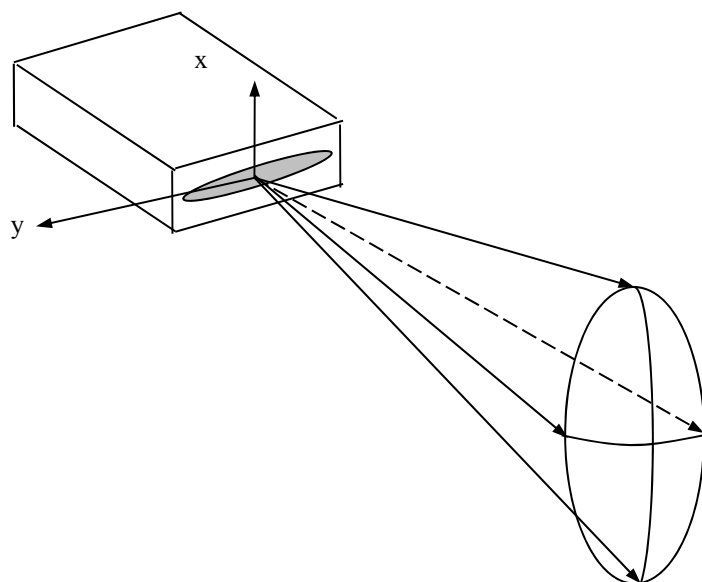
措施：牺牲快轴方向光束质量

提高慢轴方向光束质量

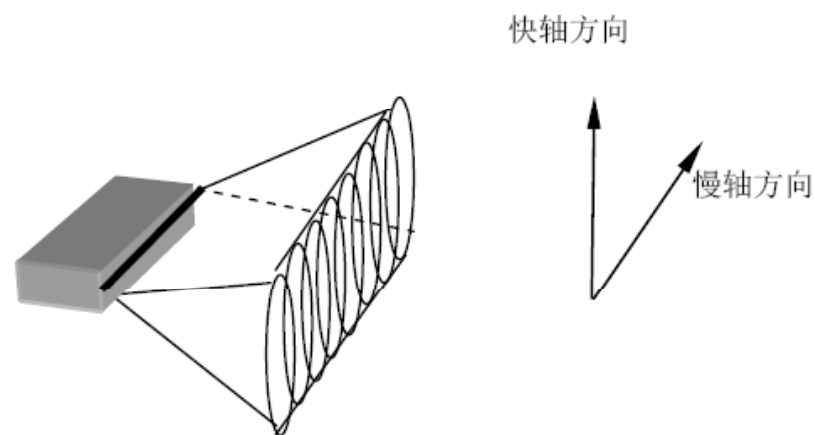


光纤激光器的泵浦技术

半导体激光器 输出光束的空间分布

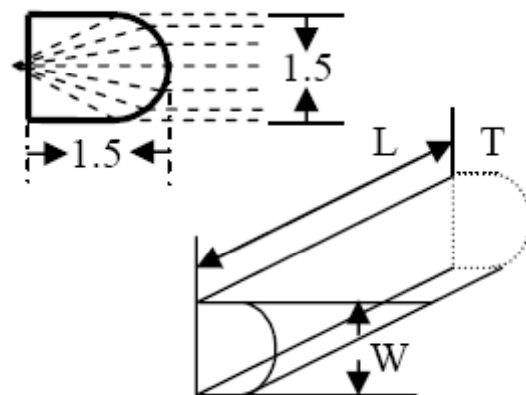


单管半导体激光器的光束形状

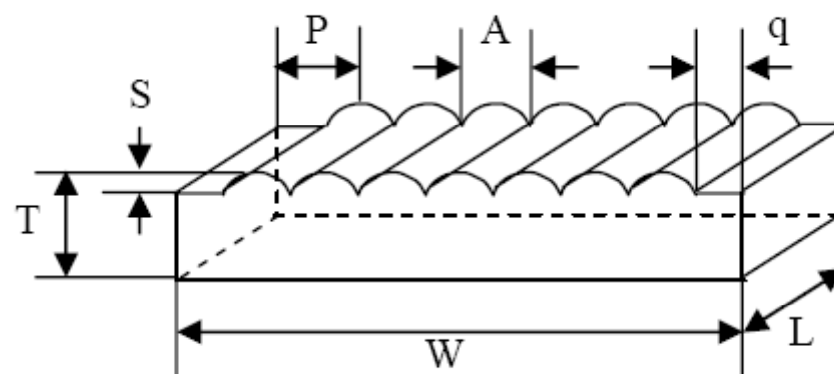


激光二极管阵列组的输出光束
 $1\mu\text{m} \times 1\text{cm}$; $40^\circ \times 10^\circ$

半导体激光器的光束整形



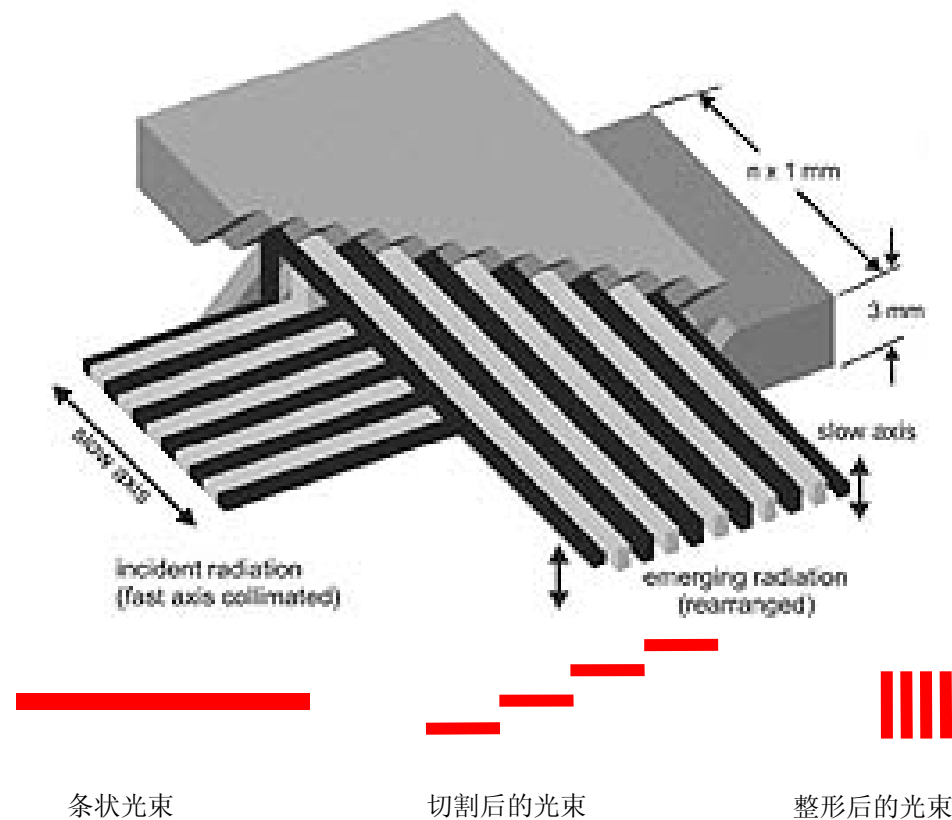
快轴整形用的柱面透镜



用于慢轴整形的透镜结构



半导体激光器的光束整形



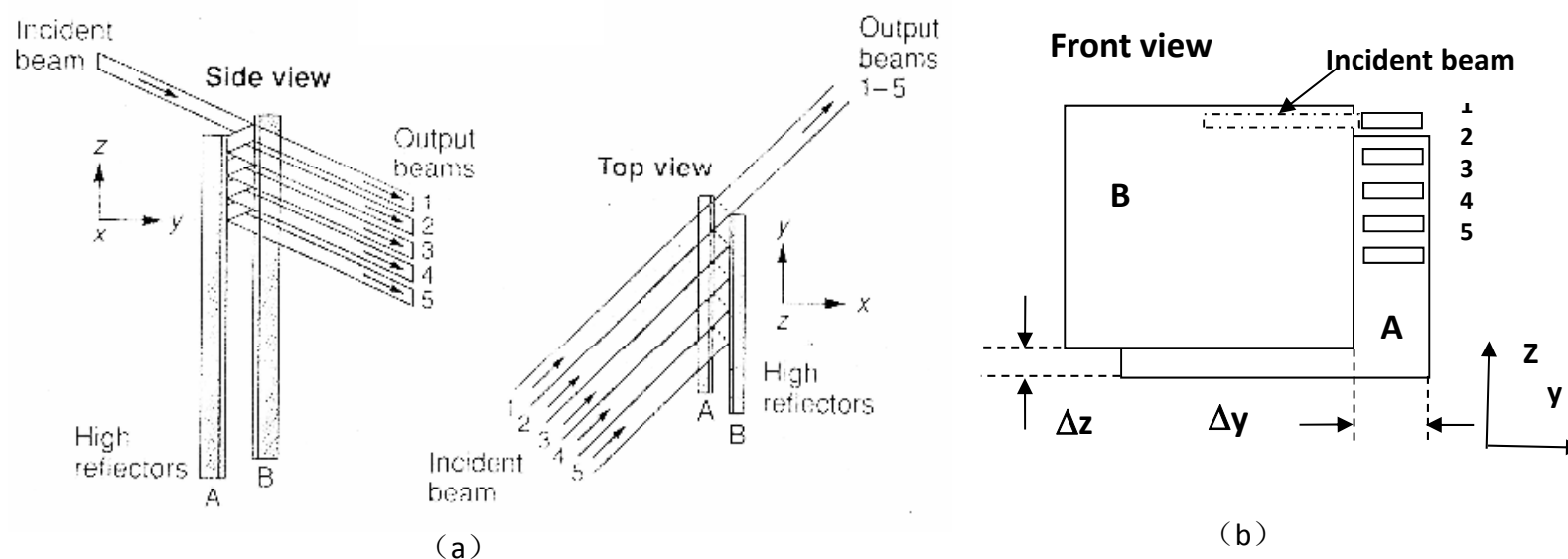
阶梯反射镜组光束整形装置
德国夫朗和费激光技术研究所.



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

半导体激光器的光束整形

双平面镜整形方法



英国南安普敦大学

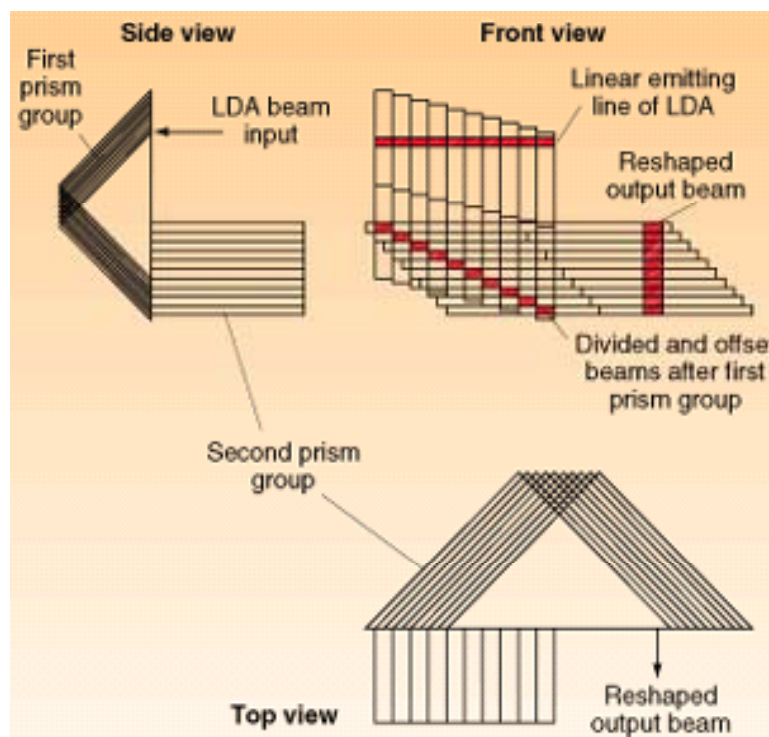
优点：简单、方便、实用，适合于任何正交方向上光束质量因子相差很大的非衍射极限的光束整形



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

半导体激光器的光束整形

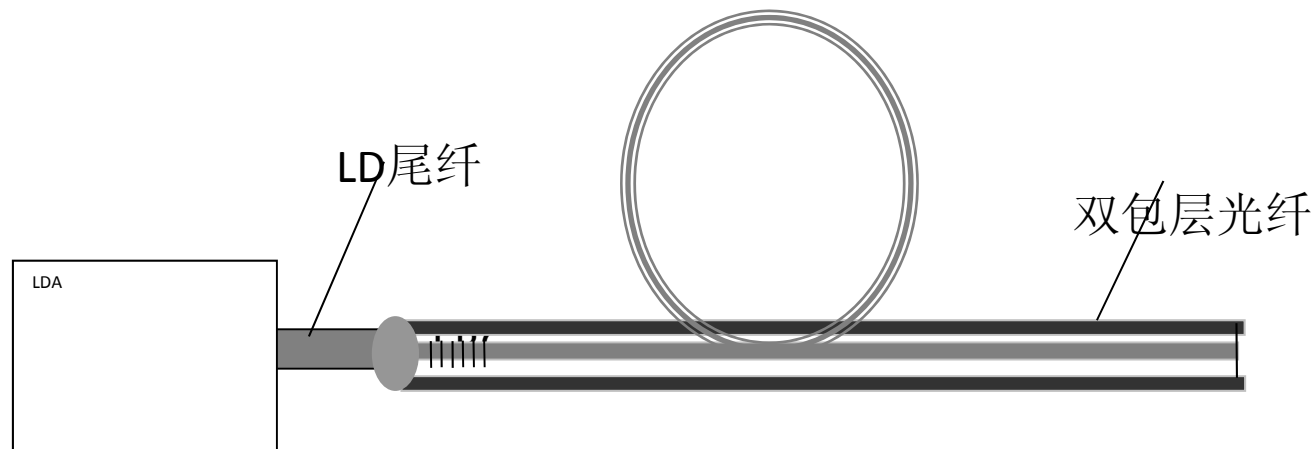
棱镜组光束整形方法



王之江院士设计的一种方法，可用较少的元件把大功率半导体激光器列阵所发出的条形光束整形成一个方形光束。



端面泵浦



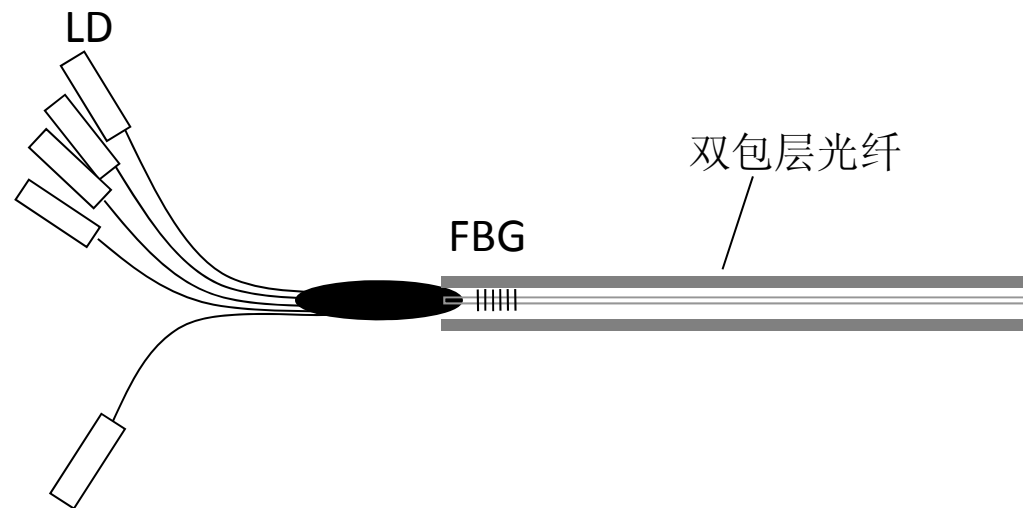
大功率LD尾纤与DCF端面熔接耦合

优点：全光纤双包层光纤激光器，结构牢固，输出功率一般为数至数十瓦，可作商用激光器

缺点：源大功率LD列阵须用半导体制冷，所发出的激光需要经过光束整形、准直、非球面镜聚焦耦合到直径为几百微米的光纤中，因此整机体积较大，构造复杂，成本较高。



端面泵浦

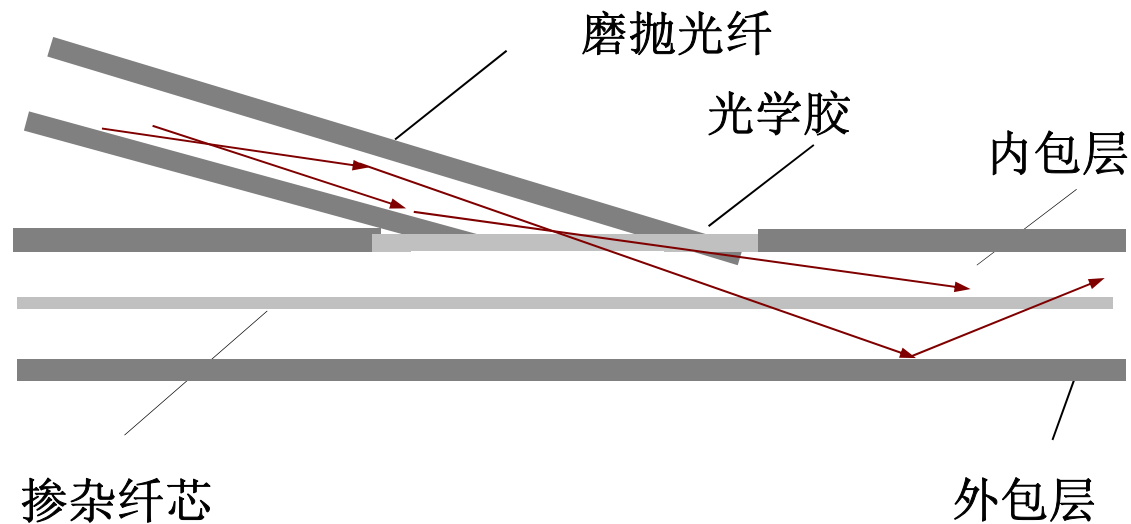


小功率LD光纤组束端面耦合

优点：光纤熔融拉锥的耦合效率可达90%以上。由于采用了小功率LD，不需半导体制冷，只需简单风冷，这种泵浦方法可制成体积小、重量轻、结构坚固、稳定性好的光纤激光器。该泵浦方法非常有利于泵浦光功率的扩展。



侧面泵浦



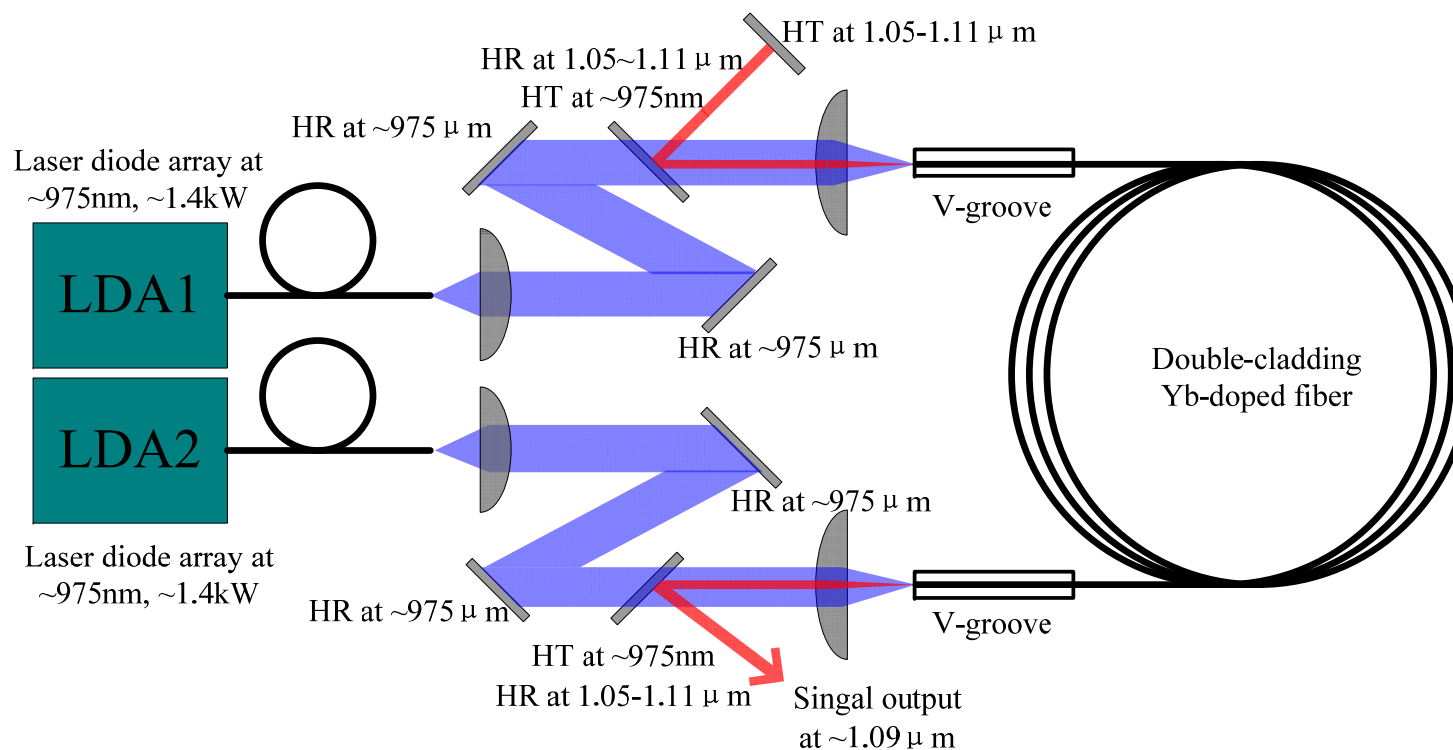
光纤端面磨抛侧面胶合

优点：可以获得高的耦合效率(90%以上)，进行多点抽运

缺点：光纤端面的角度 ($\sim 8^\circ$) 磨抛较为困难。



双端泵浦光纤激光装置



采用双端泵浦，以长的国产大模场面积掺镱双包层光纤(13m)为放大介质，2.28kW泵浦下实现了连续谱1.75kW高功率输出。其中心波长为 $1.09\mu\text{m}$ ，斜效率达到76%，光光转换效率达到74%。



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

高功率光纤激光器的热效应

主要热源

(a) 泵浦光与上激光能级之间的光子能量差以热的方式散逸到基质晶格中，造成所谓的量子亏损发热；

(b) 与此类似，下激光能级与基态之间的能差转化为热能；

(c) 因为激光跃迁荧光过程的量子效率小于1，所以除了产生激光能量以外，其余的能量由于激光淬灭而产生热。

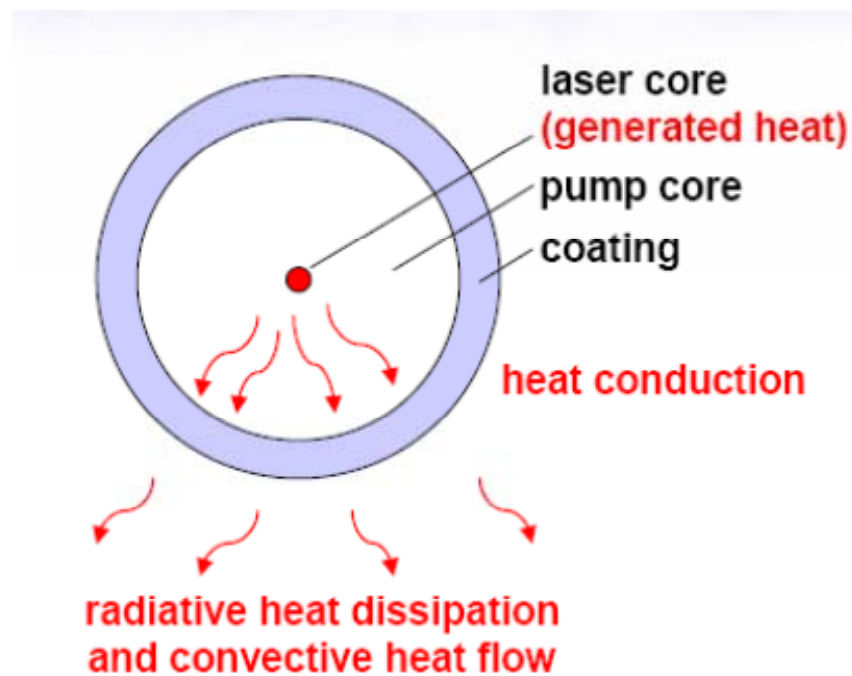


高功率运作时可能造成光纤损伤

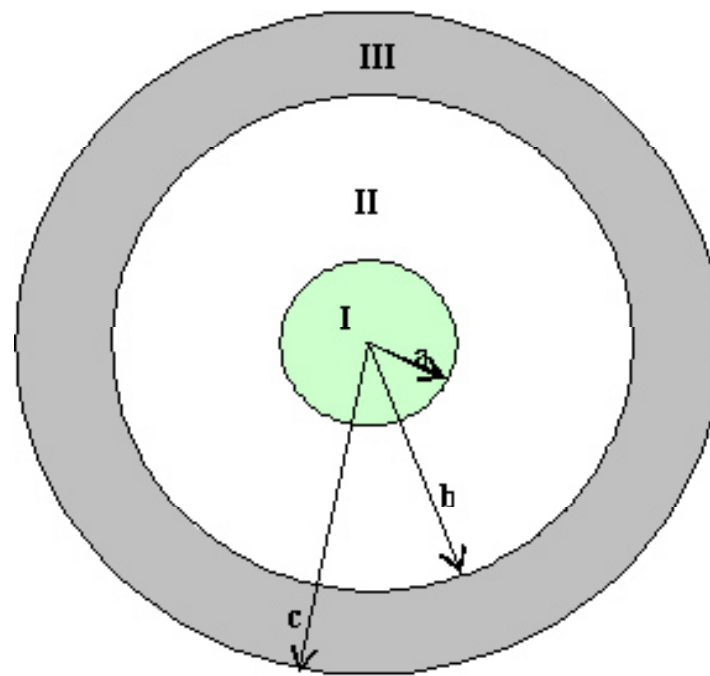


中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

光纤在高功率泵浦下温度特性及冷却技术



热扩散示意图



温度分布模型

光纤温度分布模型

纤芯温度

$$T_0 = T_c + \frac{q_1 a^2}{2hc} + \frac{q_1 a^2}{4k_1} + \frac{q_1 a^2}{2k_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{q_1 a^2}{2k_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right)$$

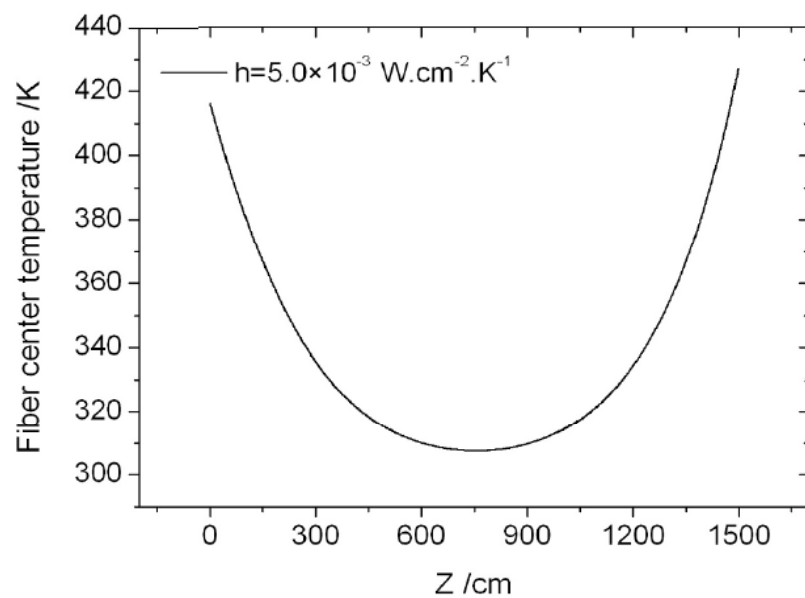
T_c : 制冷温度

q_1 : 纤芯热功率密度

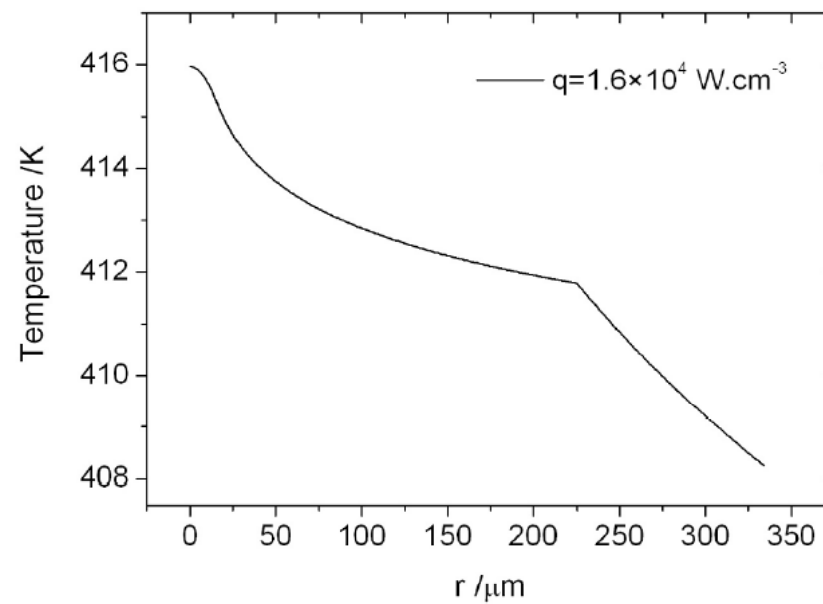
k : 导热系数

Parameter	Value
a	15 μ m
b	225 μ m
c	325 μ m
k_1	1.38 W. m ⁻¹ . K ⁻¹
k_2	1.38 W. m ⁻¹ . K ⁻¹
k_3	0.2 W. m ⁻¹ . K ⁻¹
h	50 W. m ⁻² . K ⁻¹

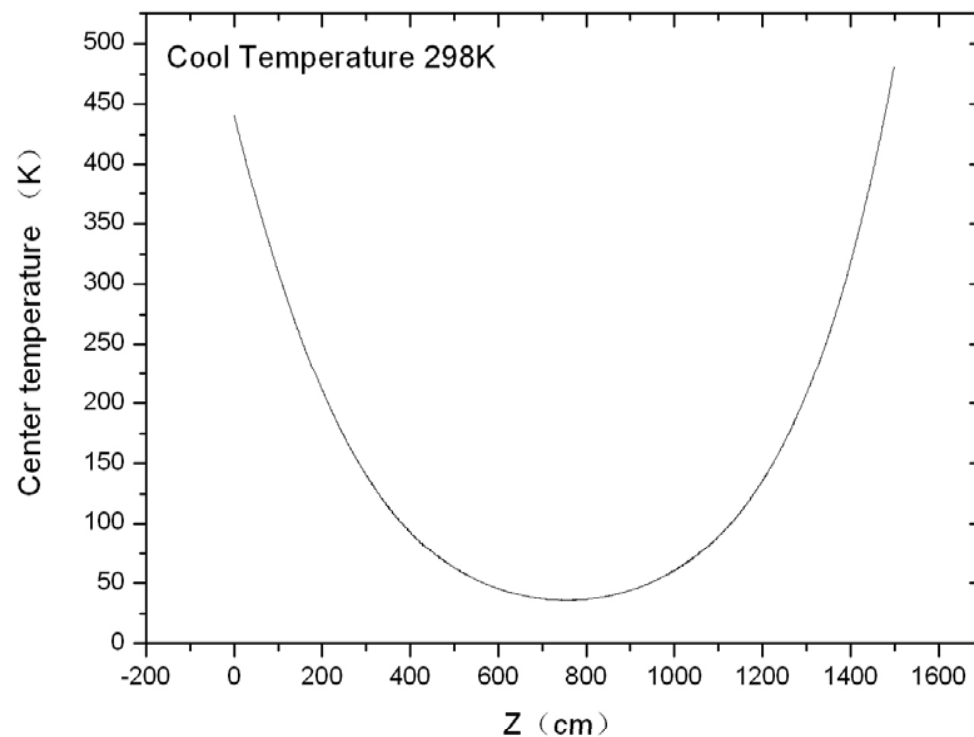




双包层光纤纤芯纵向温度分布图



双包层光纤径向温度分布图



采用求解速率方程和光线追迹法，研究了端面泵浦光纤激光器的热问题。

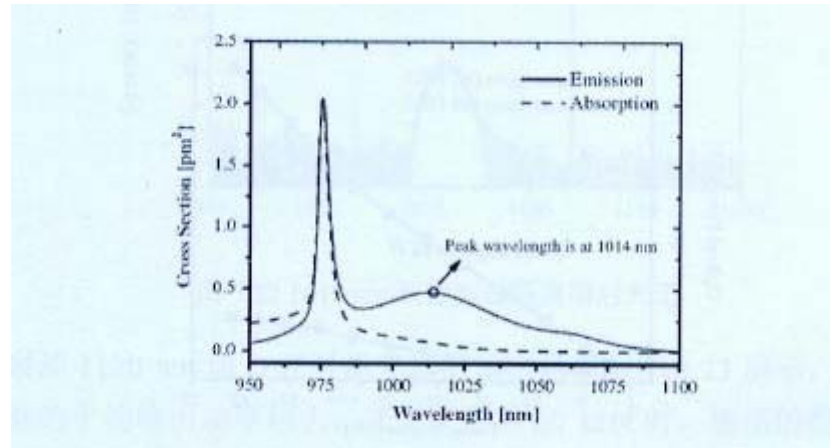
光纤泵浦端的热问题的处理是高功率光纤激光器必须解决的重要问题



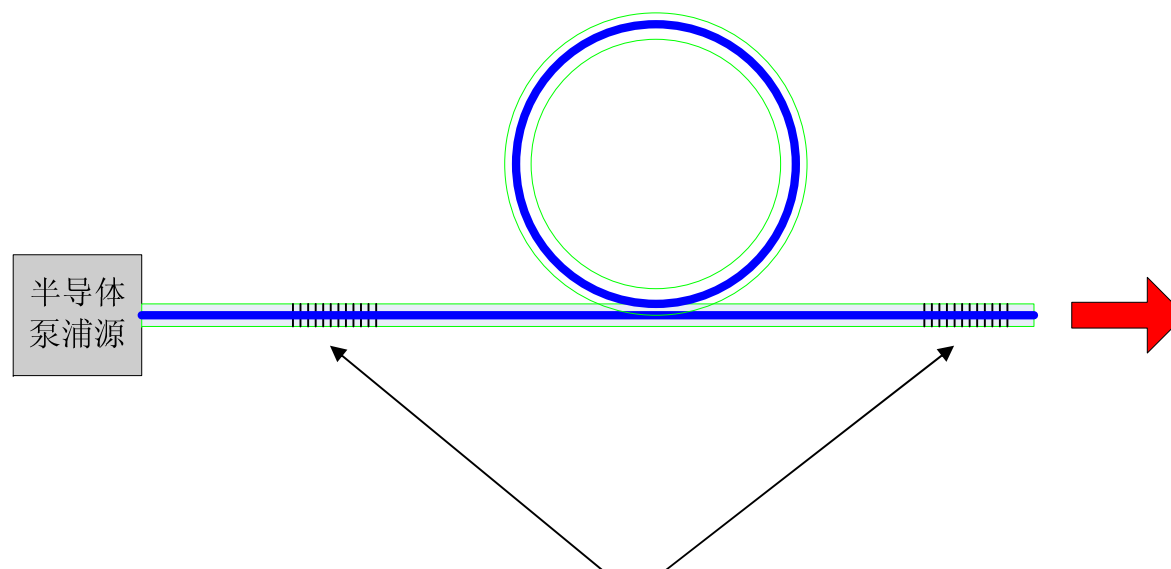
中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

减少量子损失

- 新泵浦波长 从975nm到 1018nm
- $975/1080=0.90$ $1018/1080=0.94$



1018nm 高功率连续光纤激光器



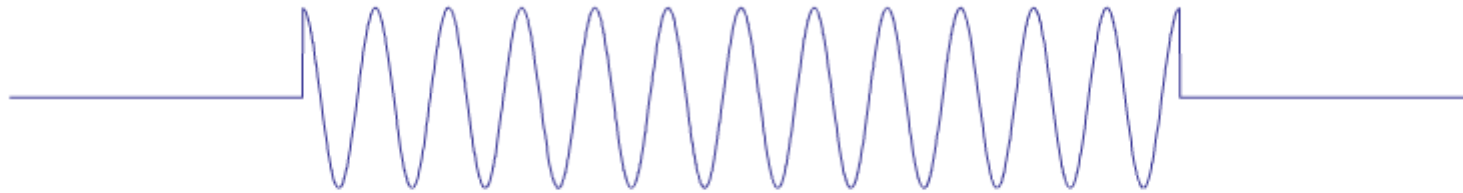
关键器件：光纤光栅



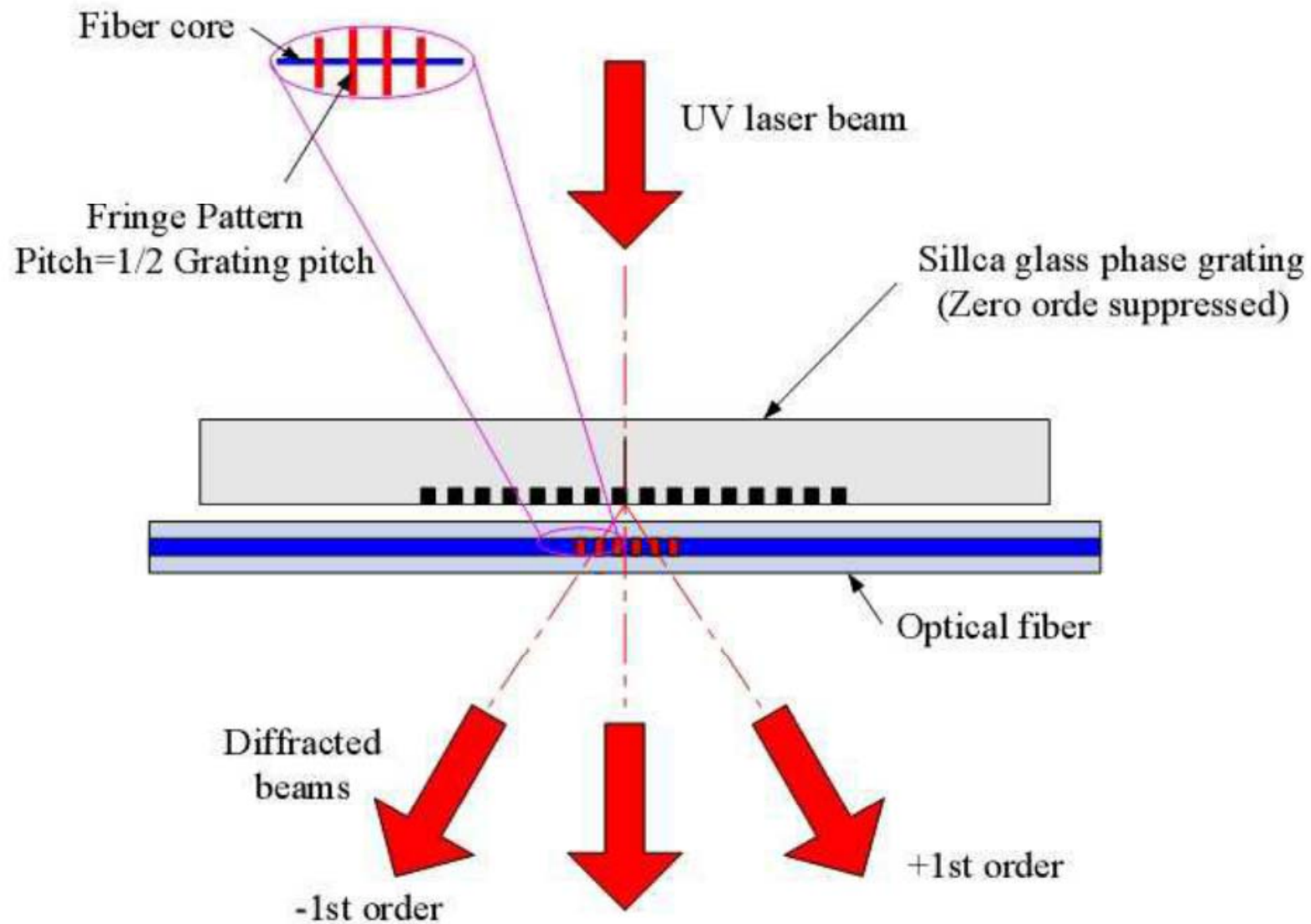
中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

光纤光栅

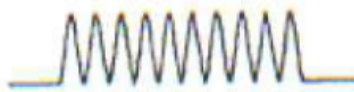
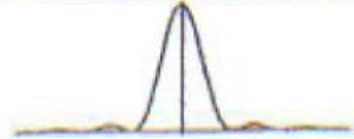
- 光纤光栅是利用光纤材料的光敏性制作的。所谓光敏性是指材料被外部光照射时，引起该材料物理或化学特性的暂时或永久性变化的一种特性。
- 在外部光源照射时，光纤的折射率随光强的空间分布发生相应的变化，变化的大小与光强成线性关系并可被保留下来，成为光纤光栅。
- 光纤光栅的折射率沿光纤的轴向呈现周期性的分布，是典型的折射型衍射光栅。



相位掩膜法制作光纤光栅

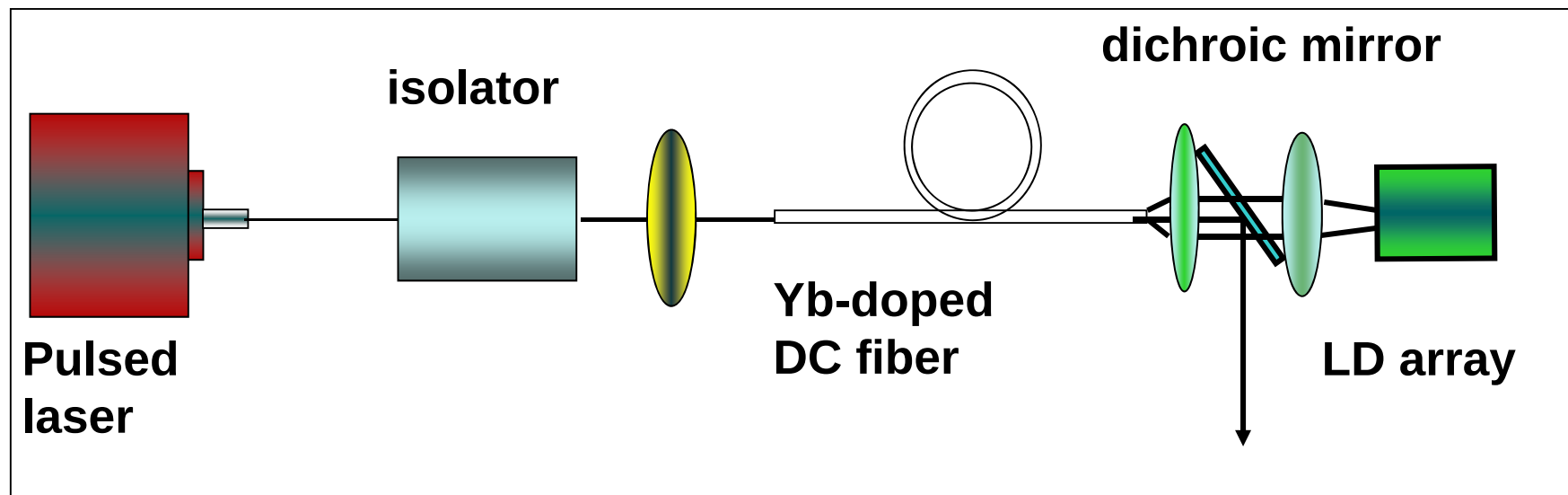


各种折射率分布修正 及其 反射谱

Fiber grating type	Refractive index modulation format	Reflective spectrum
Uniform fiber gratings		
Tapered fiber gratings		
Chirped fiber gratings		
Moire fiber gratings		
Tilted fiber gratings		

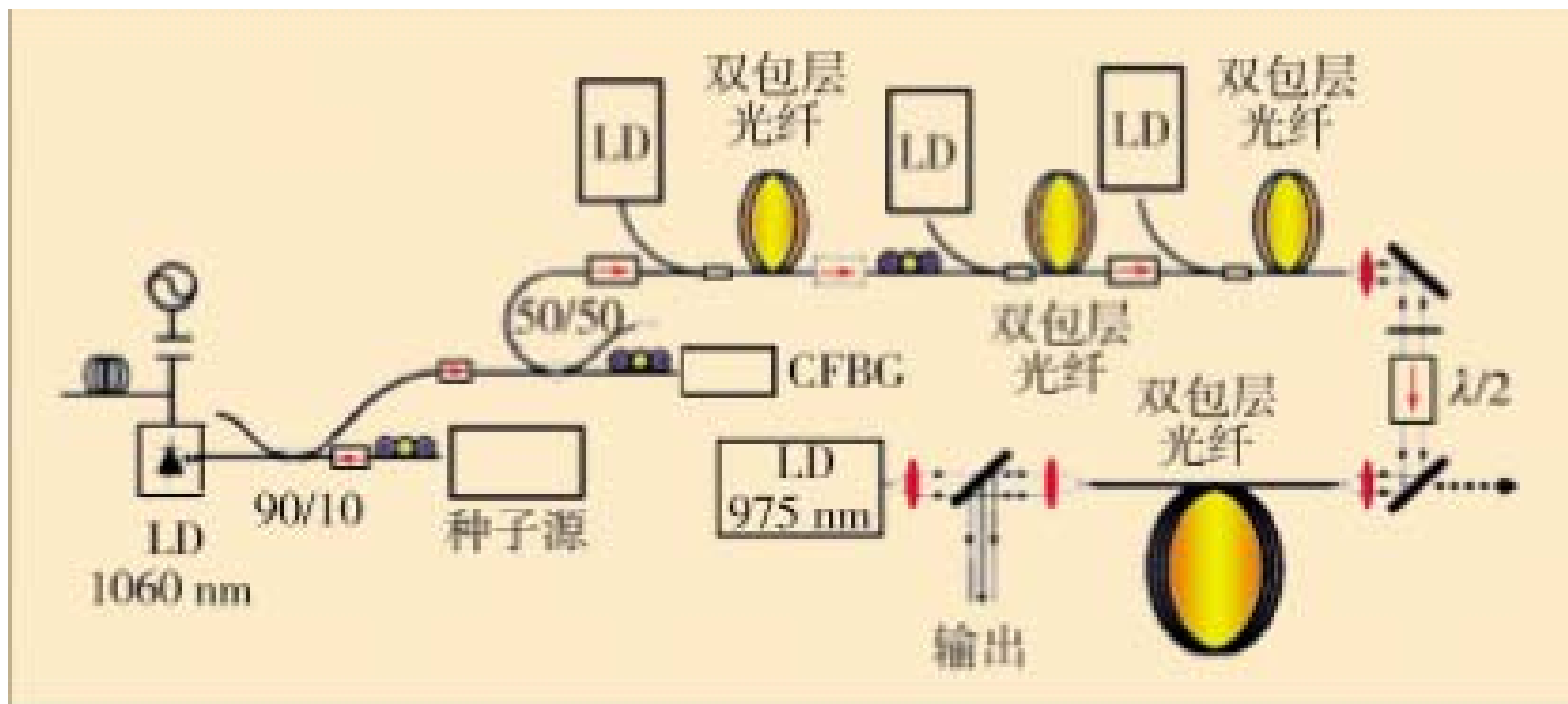
实现脉冲光纤激光的主要方式

种子源主振荡 - 放大 (MOPA) 技术



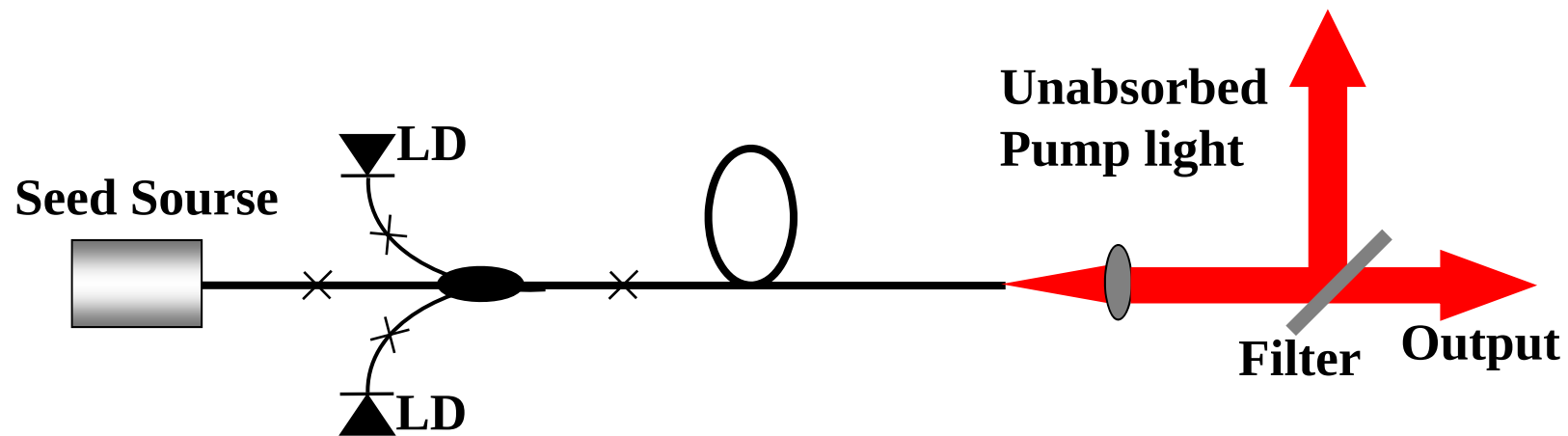
放大光纤激光器的单脉冲能量较高，平均输出功率较大，且脉宽调谐范围广，光束质量好。

实现脉冲光纤激光的主要方式



300 W皮秒级脉冲光纤放大器

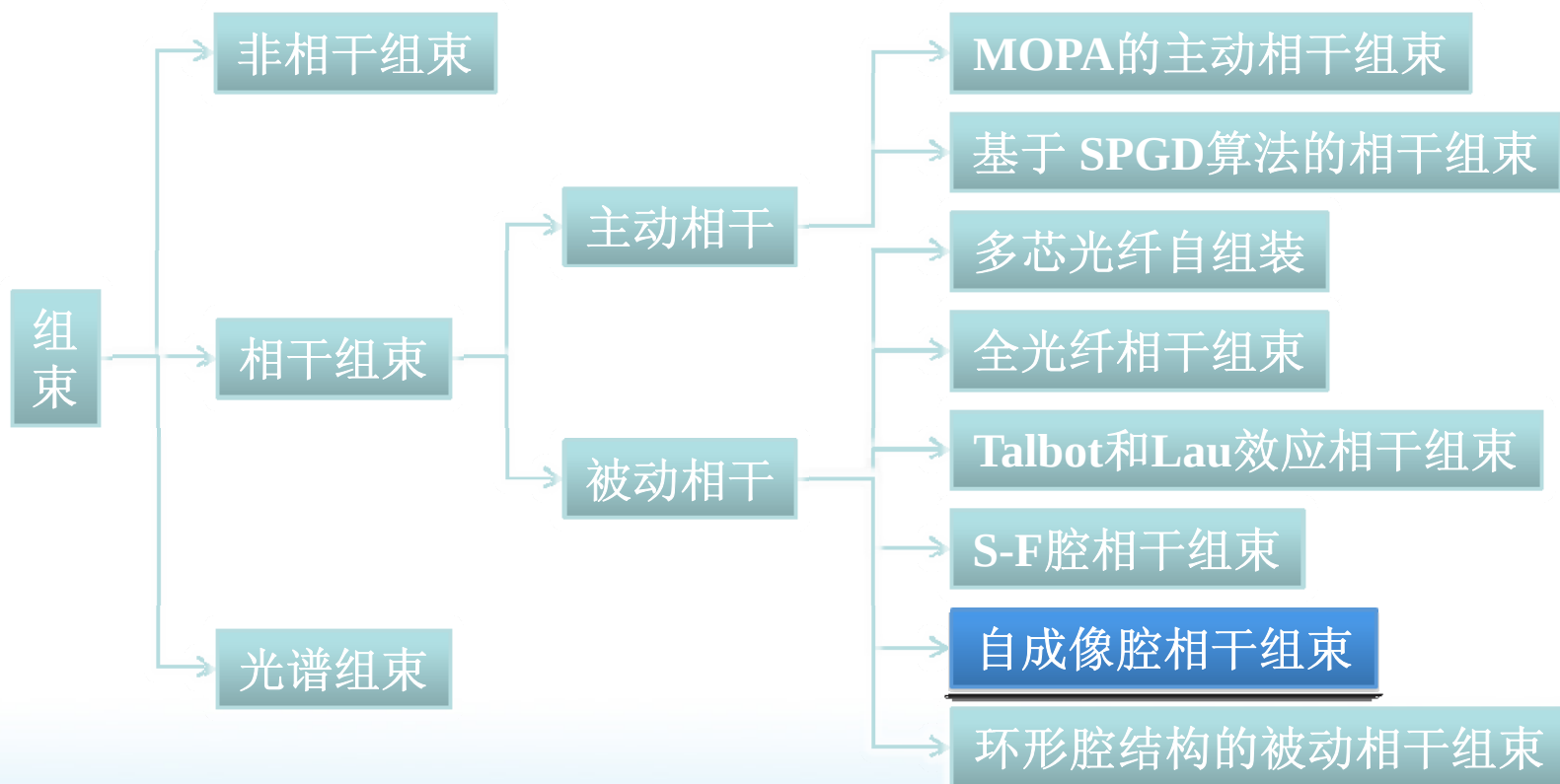
实现脉冲光纤激光的主要方式



100W的全光纤MOPA系统实验装置

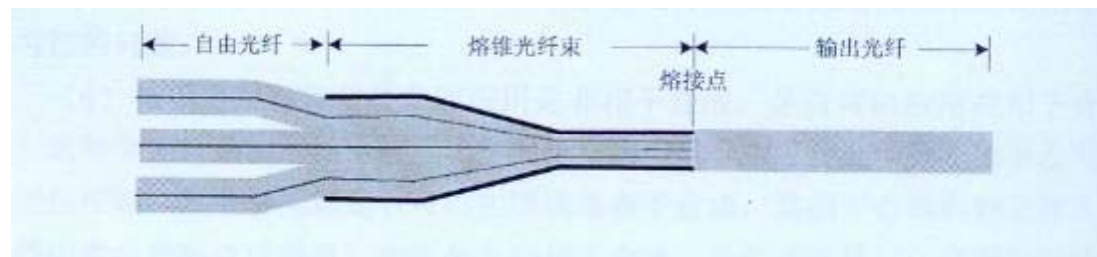
光纤激光组束技术

目的：高功率、高光束质量、高亮度



非相干组束

- 合束器



非相干组束

- 光纤合束器

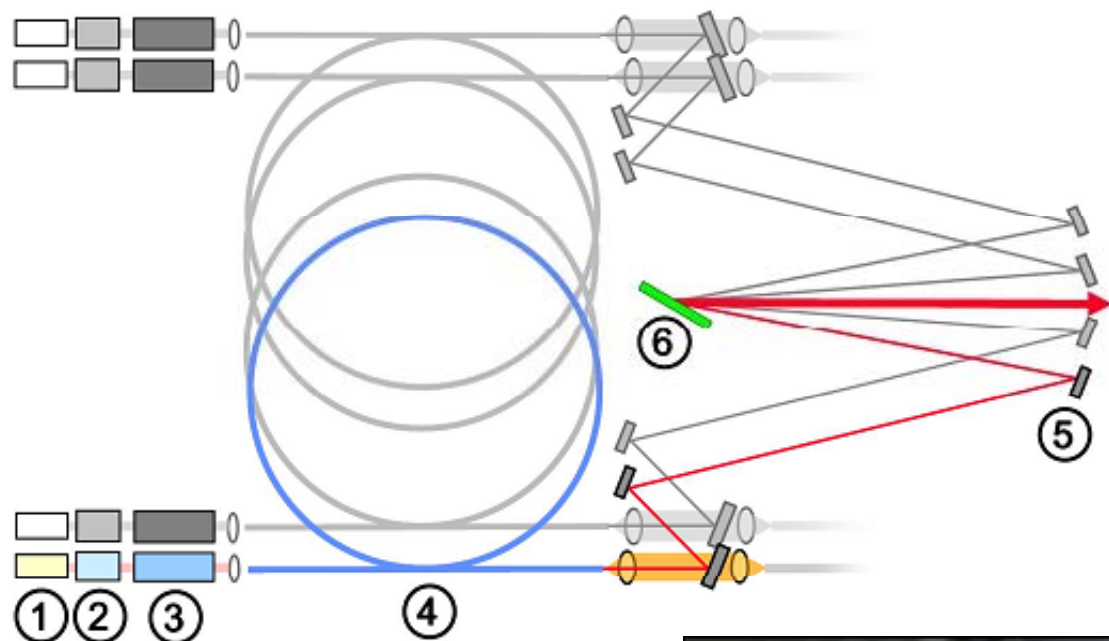
• 光纤直径	BPP	M2	功率 kw
• 50 um	2,3 mm mrad	7	7
• 100um	5	15	20
• 200	10	30	50

- 武汉 raycus 已达万瓦

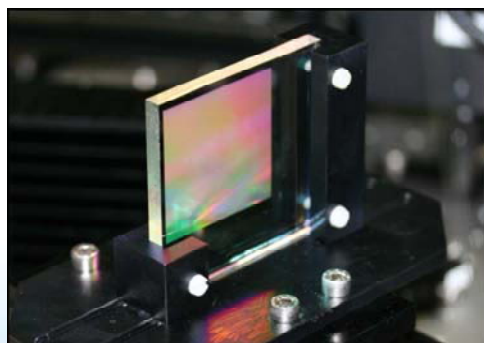


光谱组束

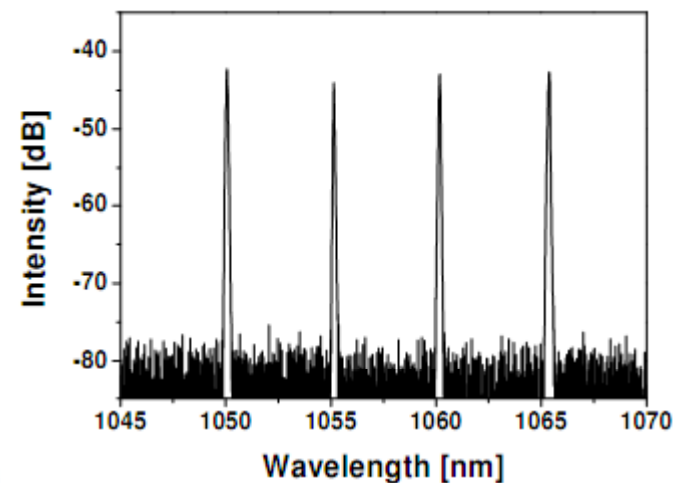
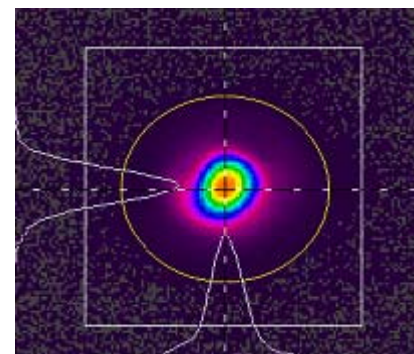
德国, Yena, 2kW非相干光谱组束



- ① 种子源
- ② 一级预放
- ③ 二级预放
- ④ 主放
- ⑤ 折叠镜
- ⑥ 反射性衍射光栅 (960lines/mm)



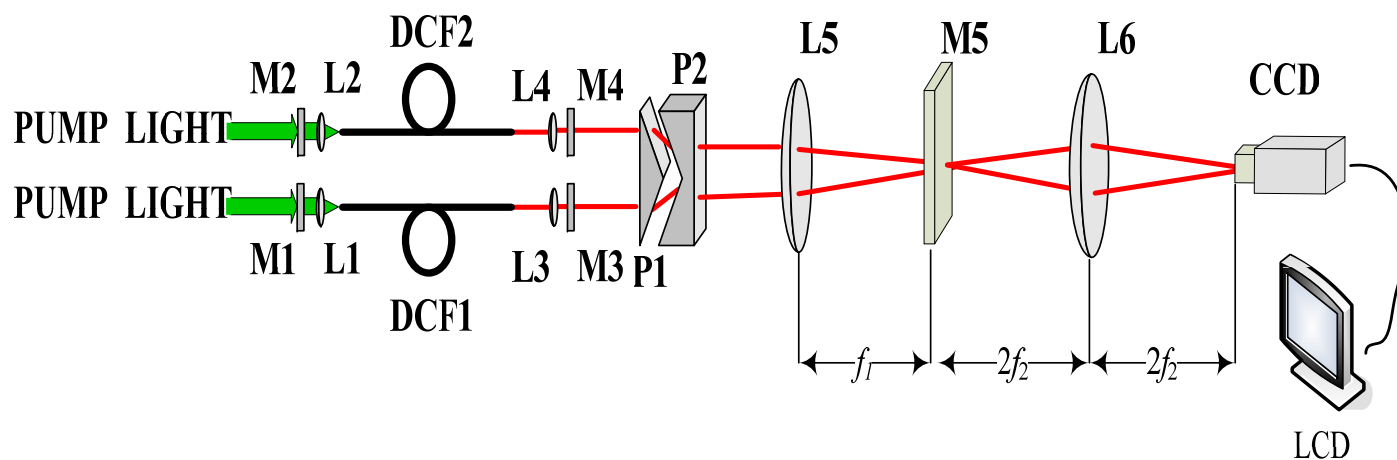
$$M_x^2=2.0, M_y^2=1.8$$



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

相干组束激光远场光强分布研究

占空比变化对相干组束影响的分析研究

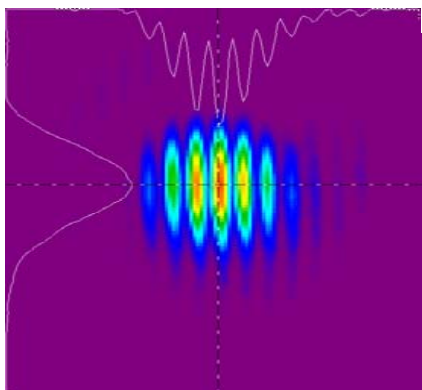


一维二路占空比实验装置示意图

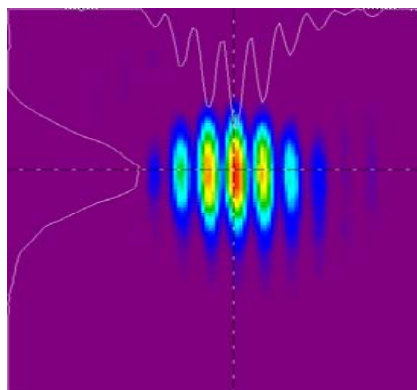


相干组束激光远场光强分布研究

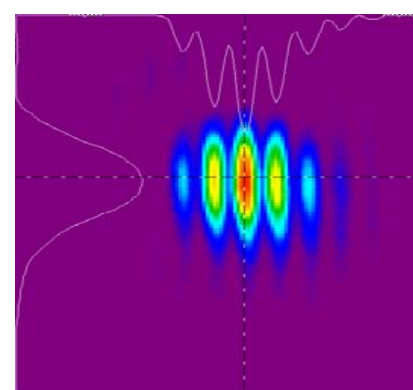
占空比变化对相干组束影响的分析研究



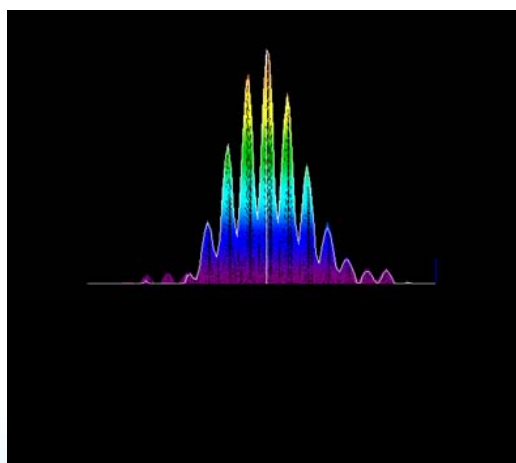
a1



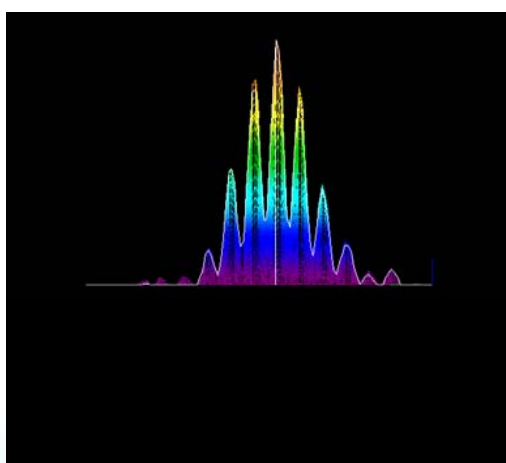
a2



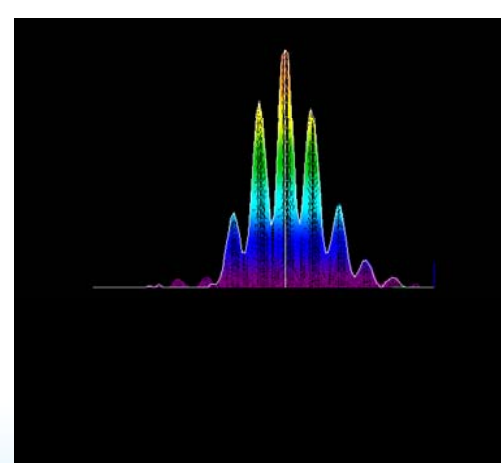
a3



b1



b2



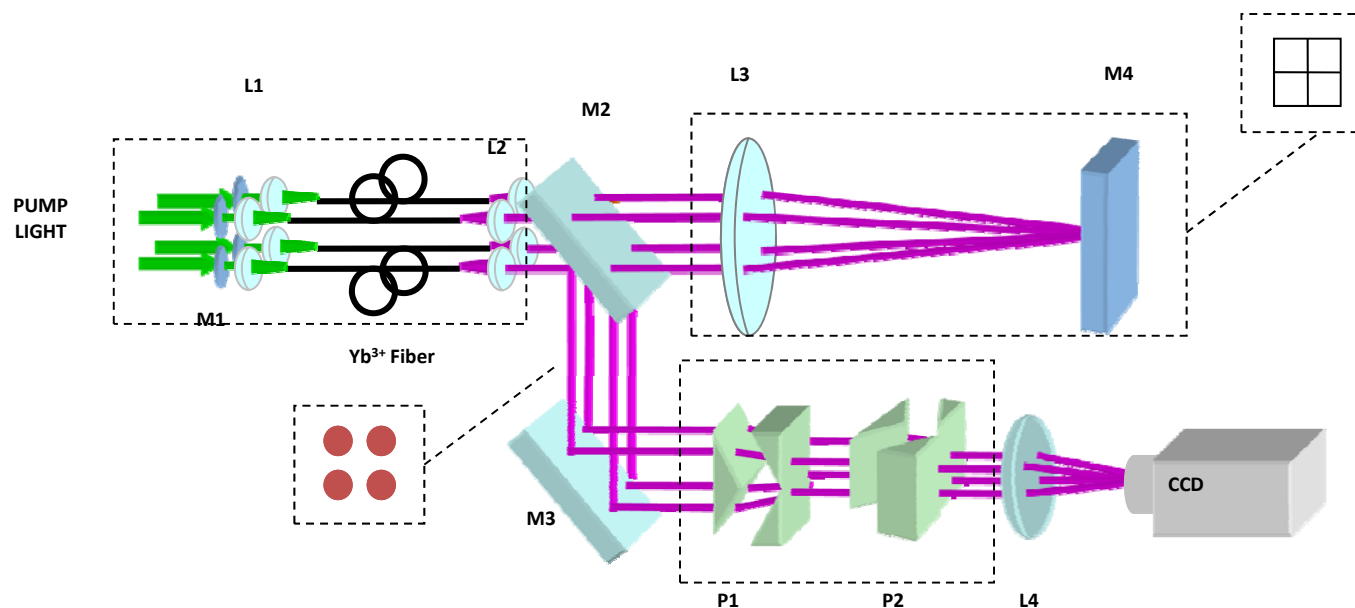
b3



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

相干组束激光远场光强分布研究

占空比变化对相干组束影响的分析研究



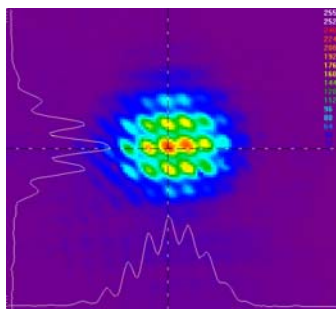
二维四路占空比实验装置示意图



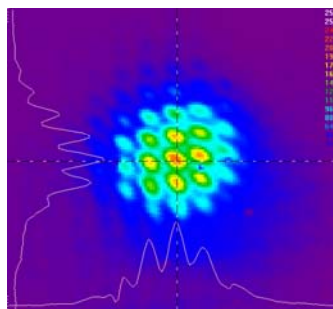
中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

相干组束激光远场光强分布研究

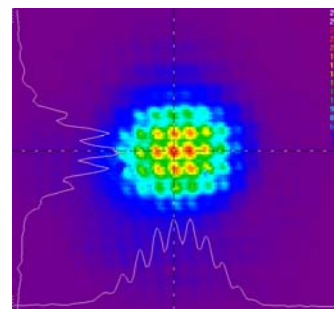
占空比变化对相干组束影响的分析研究



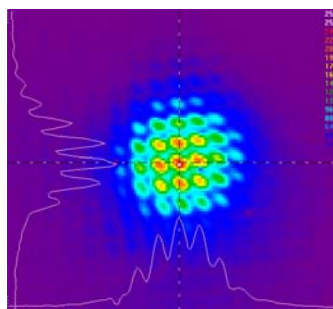
a



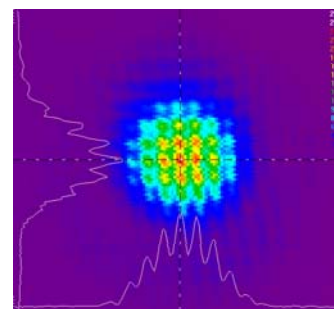
b



c

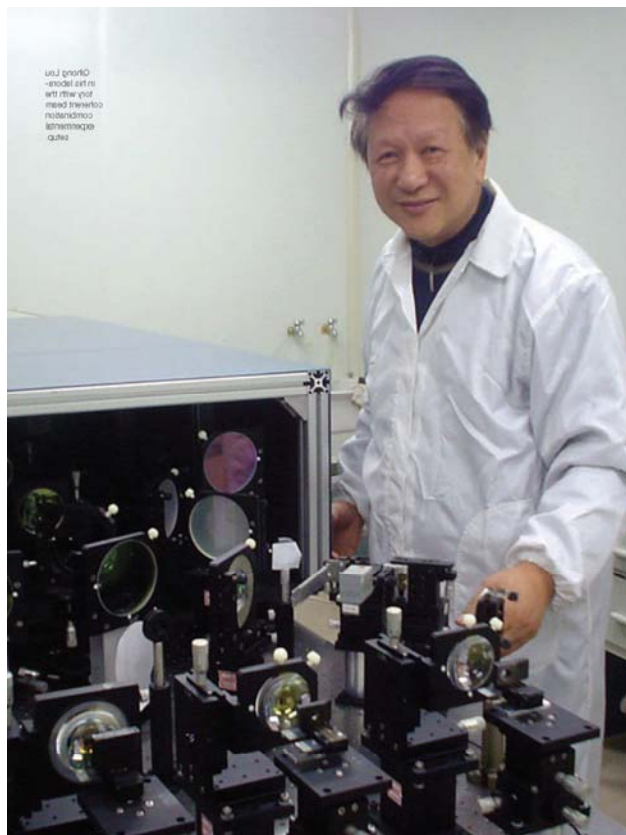


d

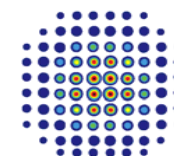


e





Optics and photonics News (OPN) 2008.5



Fiber Lasers and Their Coherent Beam Combination

Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He and Hongming Zhao

With high efficiency and exceptional beam quality, fiber lasers hold great promise for a wide range of applications. They are truly solid state with a minimum of exposed optical interfaces, and the 1- μm wavelength makes it possible for them to replace both diode- and lamp-pumped Nd:YAG lasers in the micromachining, automotive and biomedical markets.

Fiber lasers with up to kW-level output power are now technologically sophisticated, and fiber-based laser systems for industrial applications have hit the market. These lasers are being developed not only for continuous-wave and long-pulsed-mode operation but also in the picosecond pulse mode.

Although kW-level systems were realized in the lab several years ago, it has taken a while for them to make the leap into industry for several reasons, including diode bar lifetime and diode price. However, diode-pumped fiber lasers offer many advantages, including high efficiency, stable emission, a long lifetime and low energy consumption. Their key parameters are described as follows.

Beam quality

Besides output power, the most relevant parameter of a laser system is the beam quality, which is characterized by the beam propagation factor M^2 . Beam quality is defined as the product of second intensity moments, measured in the near and far field. For double cladding high-power fiber lasers, the $M^2 = 1.1-1.3$, with a core diameter of less than 10 μm . For large core double cladding with a core diameter between 20 and 40 μm , the M^2 is increased to 1.5-3.0.

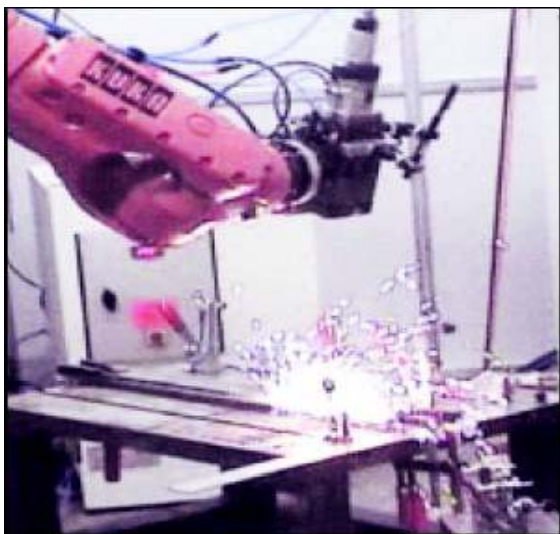
Courtesy of Zhongyong Lou

OPN May 2008 | 47



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

光纤激光器有着广泛的应用



材料加工



定向能武器



打标雕刻



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

激光加工对激光器的要求

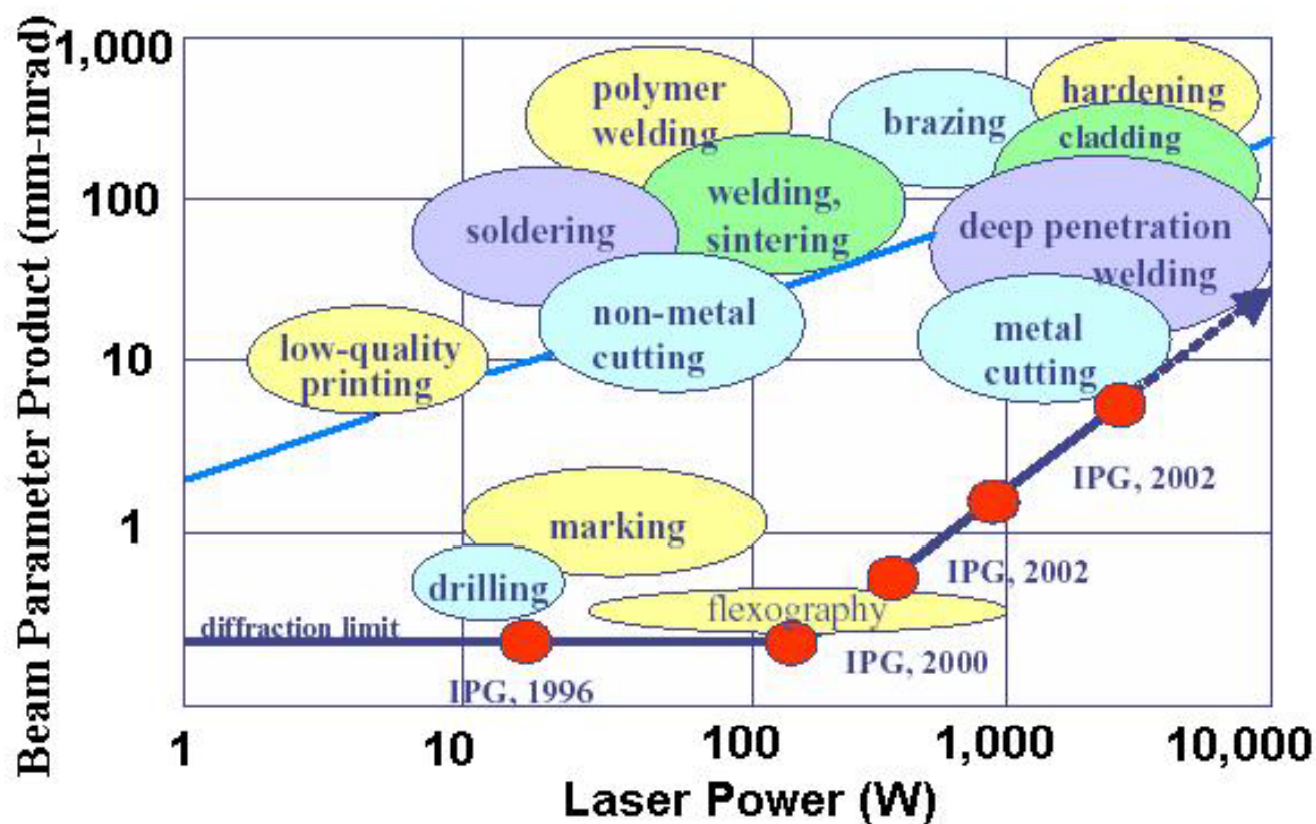
激光加工激光束作用于物体的表面而引起的物体的变形，或物体的性能的改变的加工过程。按光与物质相互作用机理，大体可将激光加工分为激光热加工和激光光化学反应加工（冷加工）两类。

优点：热影响小，不受电磁干扰，易于导向、聚焦和发散。

激光热加工的光源主要采用红外激光器，如CO₂激光器、和Nd:YAG激光器，现在主要用于汽车工业、钢铁工业、轻纺工业和电子工业的各类加工。激光光化学反应加工的光源主要采用紫外激光器，如准分子激光器，迄今已成功地应用于半导体工业。



不同的应用对光束质量的要求



工业应用

- 德国宇航公司 空中客车 光纤激光焊接替代铆钉 进行铝合金焊接 减轻飞机重量 20%
- 提高强度20%
- IPG 公司 2010 年 2,5mm 304不锈钢 焊接 20kw 焦斑 0.42mm 85cm/min
- 1.8mm 200cm/min
- 2010 日本 长崎 10kw 激光 电弧复合焊接 用于 造船工业
- 2011年 美国通用汽车 20kw 激光电弧复合焊接 (hlaw) 厚度大于 0.5 英寸



高功率光纤激光器应用

- **低功率光纤激光器** ($<50\text{W}$)，主要应用于微加工、打标、调阻、精密钻孔、喷码、金属雕刻等；
- **中功率光纤激光器** ($>50\text{W}, <500\text{W}$)，主要应用于薄金属板的切割，打孔，焊接和表面处理。
- **高功率光纤激光器** ($>1000\text{W}$)，主要应用于厚金属板材的切割，特殊板材的三维加工，金属表面的熔覆等。

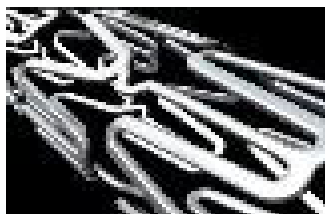


低功率光纤激光器的应用

50W以下的低功率光纤激光器，已成功地在喷码、打标以及特殊的医疗市场上崭露头角。



上光所研制的SF-1光纤激光打标机



心血管支架



放入支架后的血管



a



b



c



d

a电镀金属零件，
b表面染色的铝制品，
c抛光的不锈钢片，
d表面有色涂层的铝片

a集成电路芯片，
b塑封的晶体管，
c皮革制品，
d塑料日用品等。



a



b



c



d



a



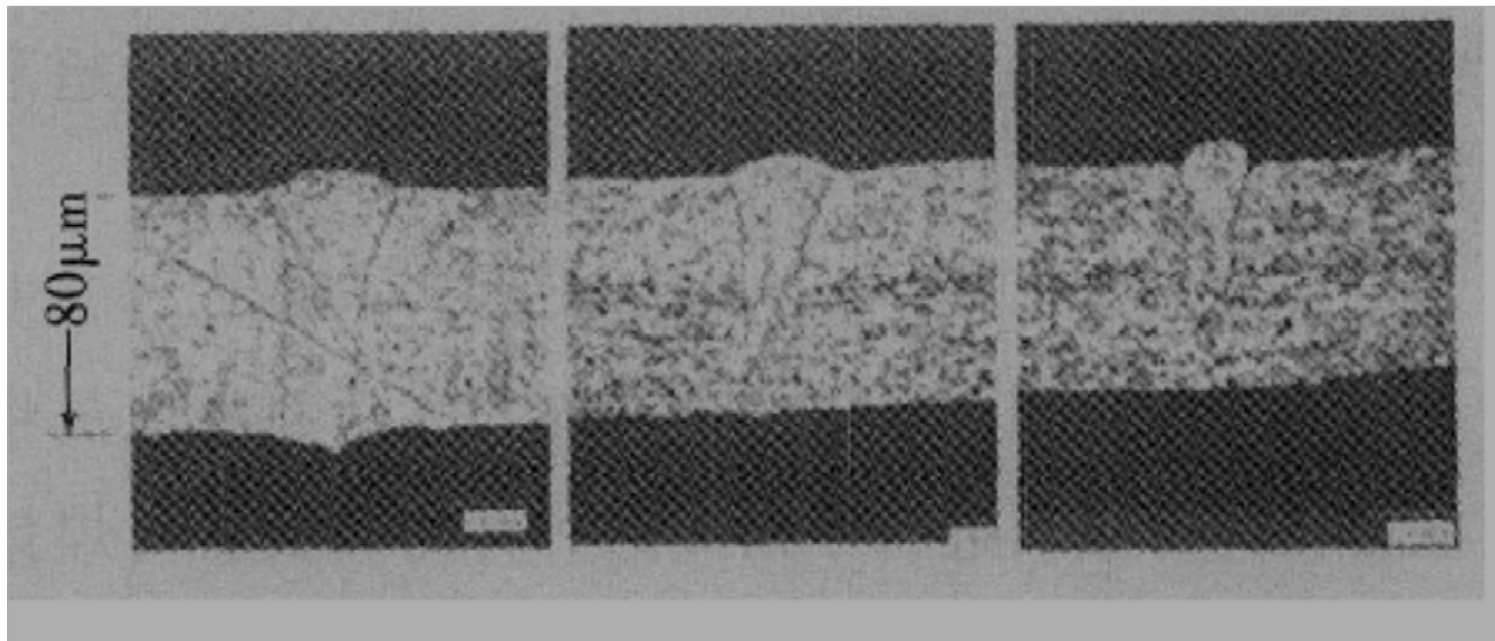
b

金属软边光阑（提供中国原子能科学研究院等单位）
小孔阵列（提供上海大学）



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

低功率光纤激光器的应用



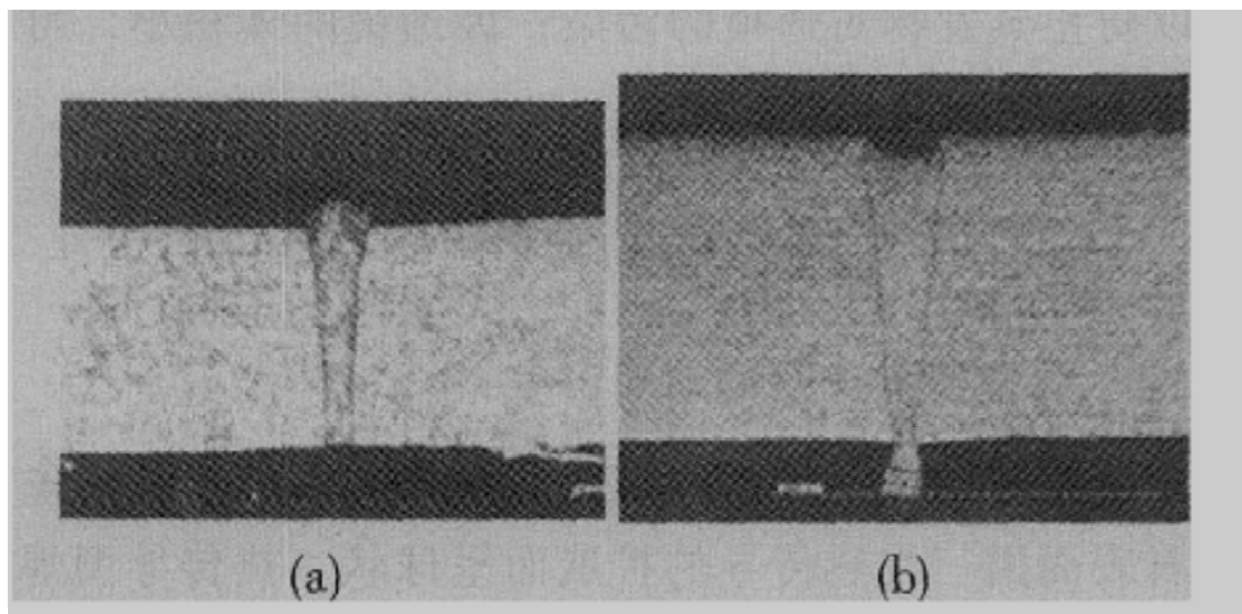
用单模光纤激光器焊接**SUS304**不锈钢箔焊缝的截面图。
功率等级为**25W**，（a）焊接速度为**310mm/s**；（b）焊接速度**400mm/s**；
（c）焊接速度**910mm/s**。



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

中功率光纤激光器的应用

50-500瓦级单模光纤激光器可精密焊接更厚的金属钢板。



用200W单模光纤激光器对不锈钢板进行焊接。

(a) 以500mm/s的速度焊接厚度为300 μm 的不锈钢板;

(b) 以70mm/s的速度焊接厚度为800 μm 的硅不锈钢板。



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

光纤激光器用于不锈钢板焊接实验研究

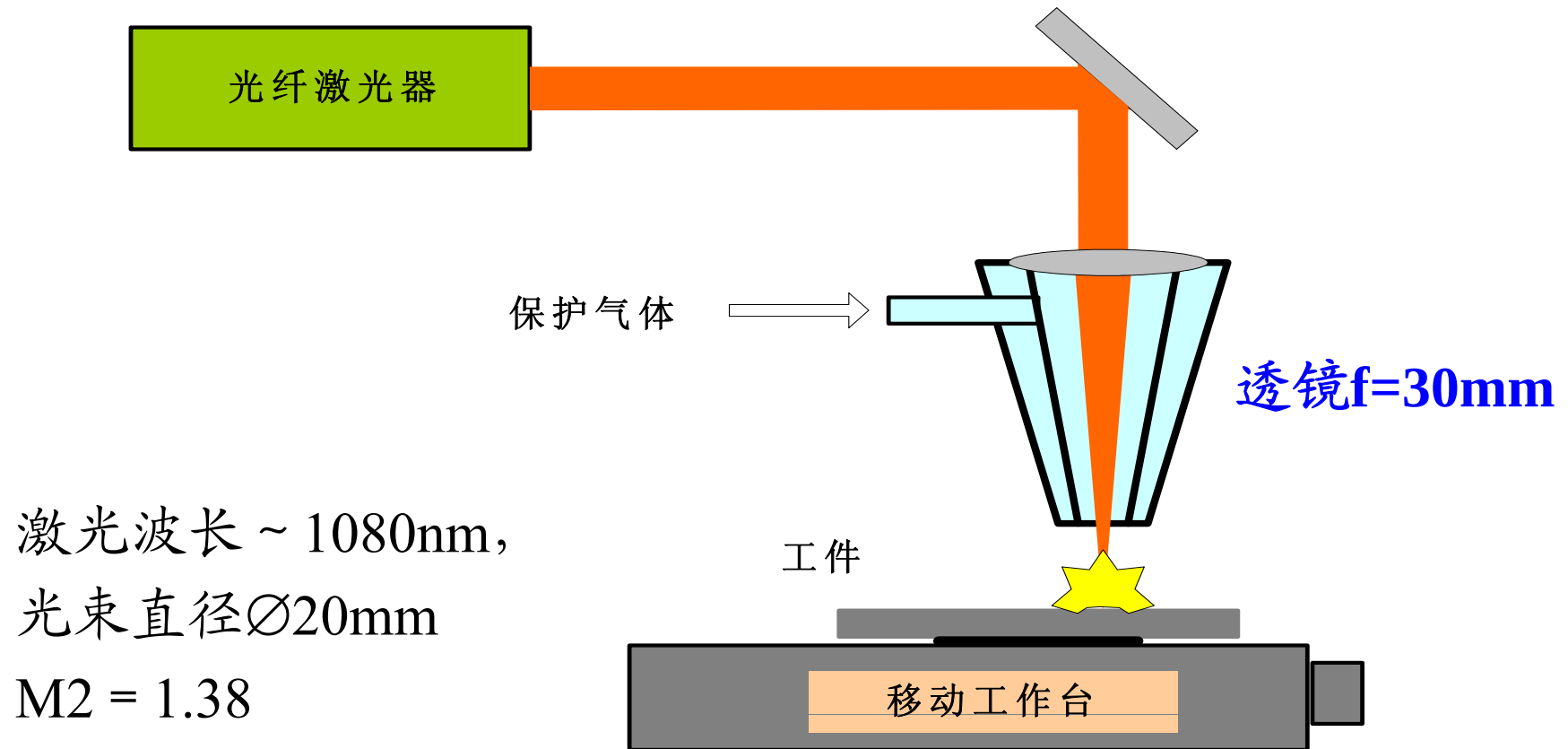
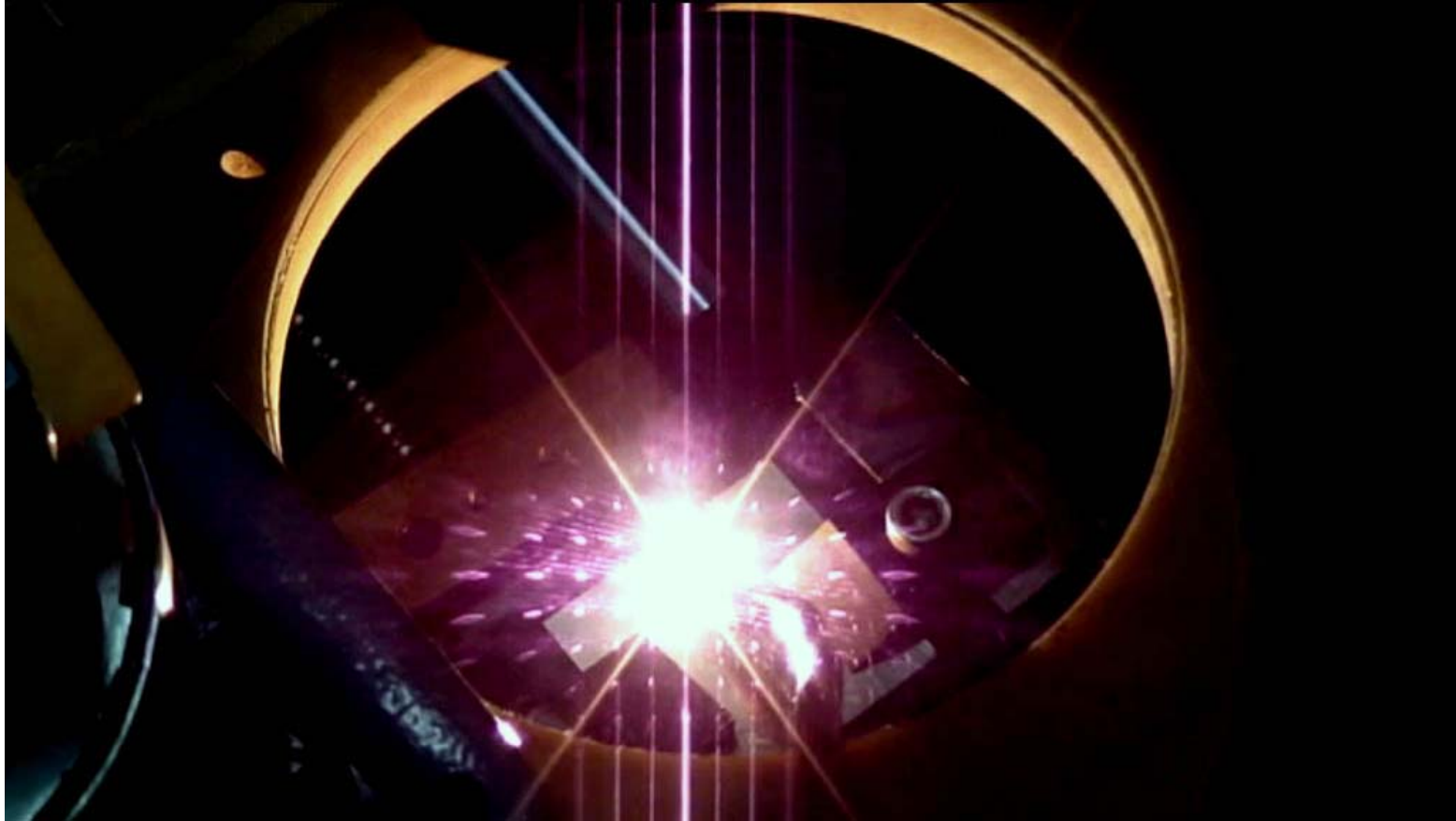


图1：光纤激光焊接示意图



光纤激光器用于不锈钢板焊接实验研究

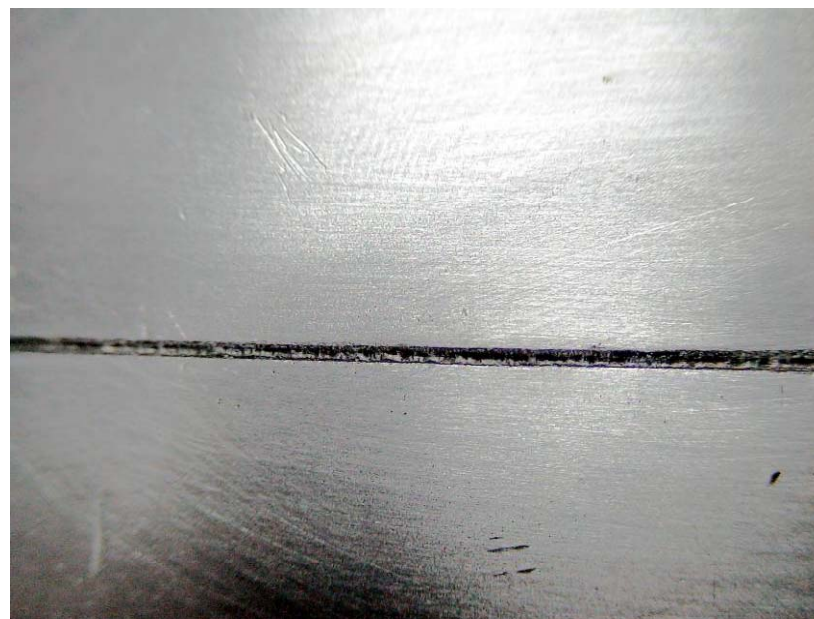


光纤激光焊接现场照片



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

光纤激光器用于不锈钢板焊接实验研究



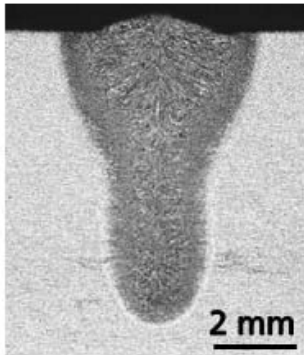
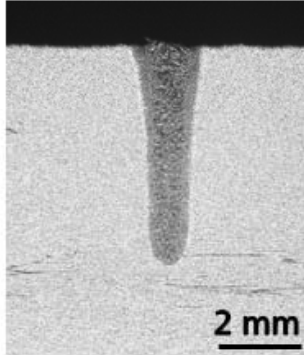
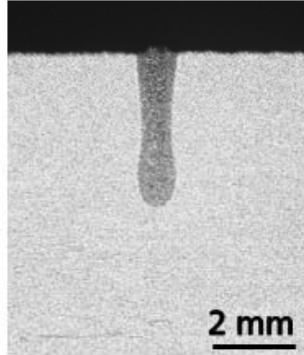
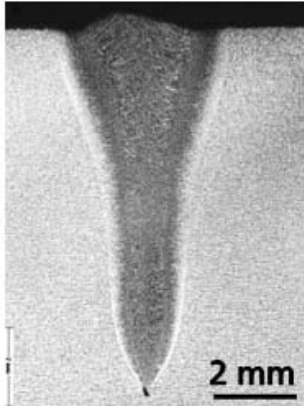
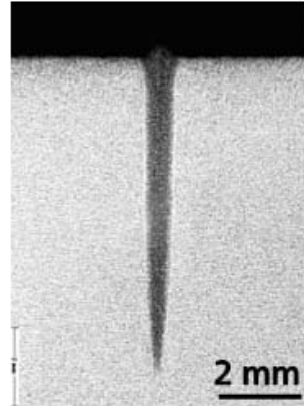
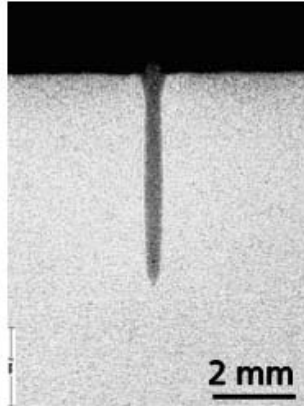
不锈钢板焊接样品照片

钢板厚度1.5mm，激光功率200W



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

高功率光纤激光器应用

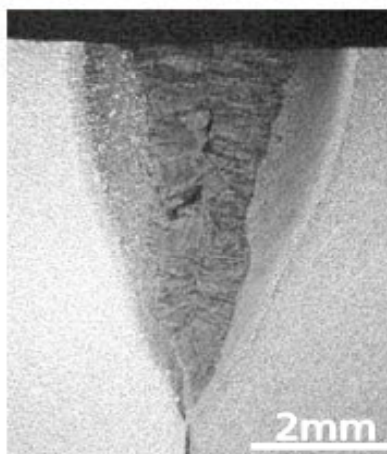
Laser type	$v_s = 1 \text{ m/min}$	$v_s = 4 \text{ m/min}$	$v_s = 8 \text{ m/min}$
Disc laser HLD 4002 4 kW $f = 200\text{mm}$ $d_f = 200\mu\text{m}$ Source: [TRUMPF]			
Fiber laser YLR 4000 4 kW $f = 300\text{mm}$ $d_f = 125\mu\text{m}$			

Material: mild steel

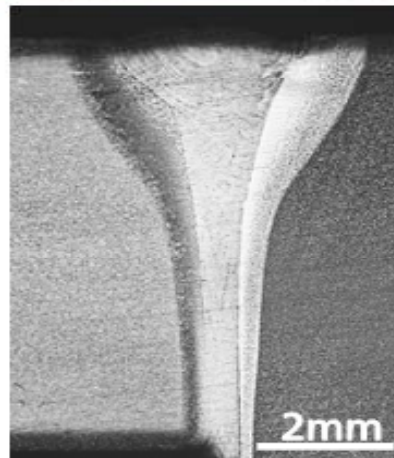


高功率光纤激光器应用

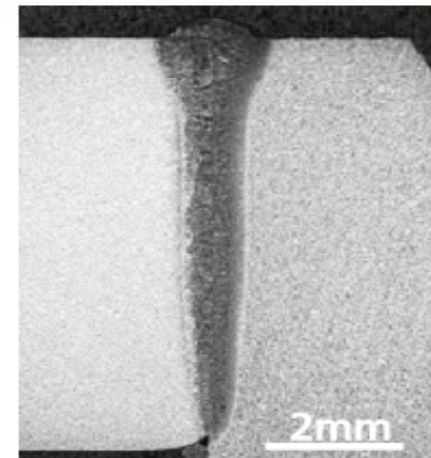
CO₂-laser



electron beam



fiber laser



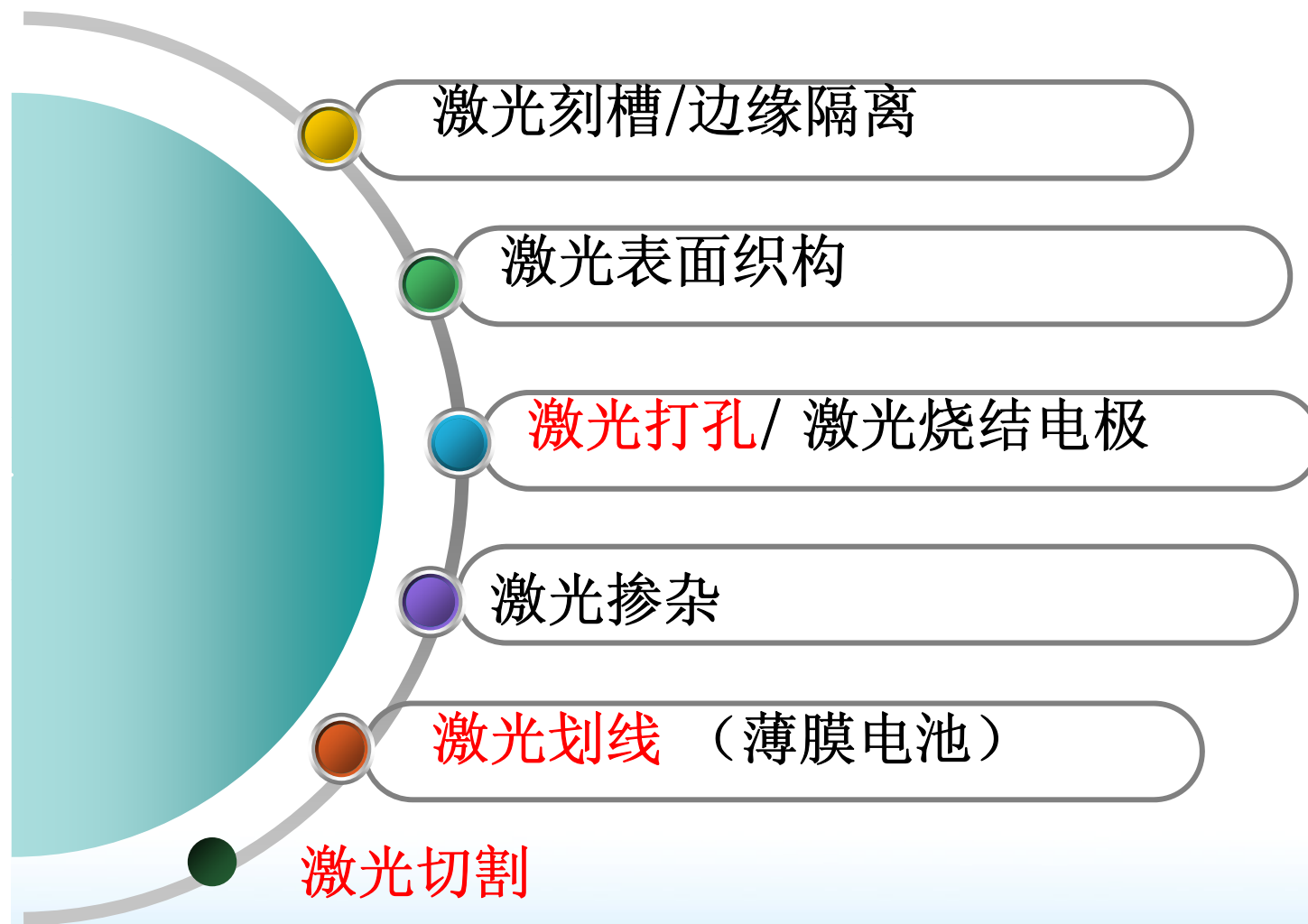
激光技术在光伏太阳能产业的应用



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光技术在光伏太阳能产业的应用

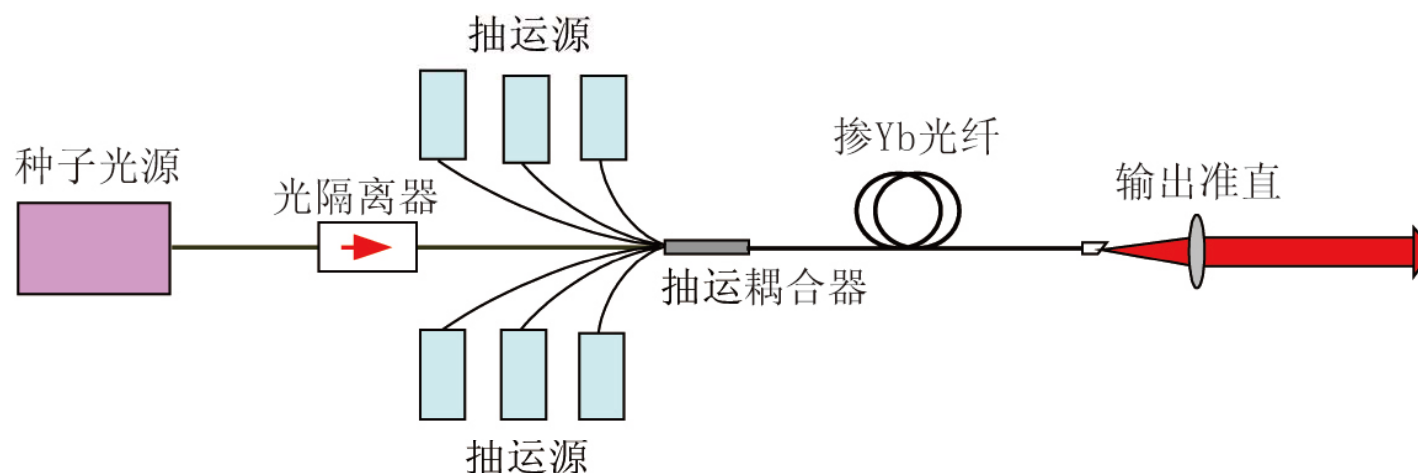


中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光技术在光伏太阳能产业的应用

下面以高重频脉冲光纤激光器在太阳能电池领域的应用为例介绍



种子光--高性能小功率激光器

- 1、脉冲调制的单模LD、
- 2、固体激光调Q、
- 3、光纤激光声光调Q

振荡放大（MOPA）结构

双包层光纤做为功率放大器

主要优点：脉冲参数可调
(重频、脉宽、波形、脉冲能量)



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光技术在光伏太阳能产业的应用

激光在硅片上打孔: Why?

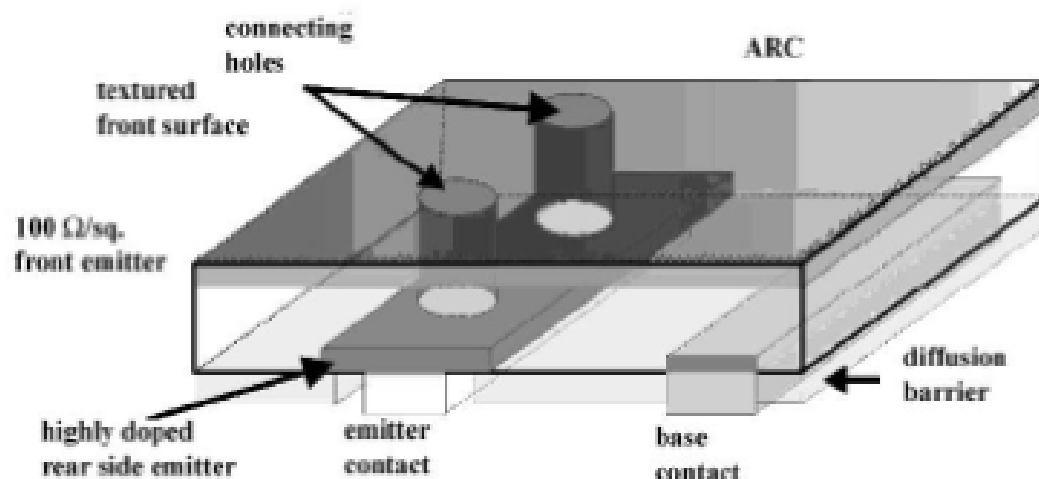
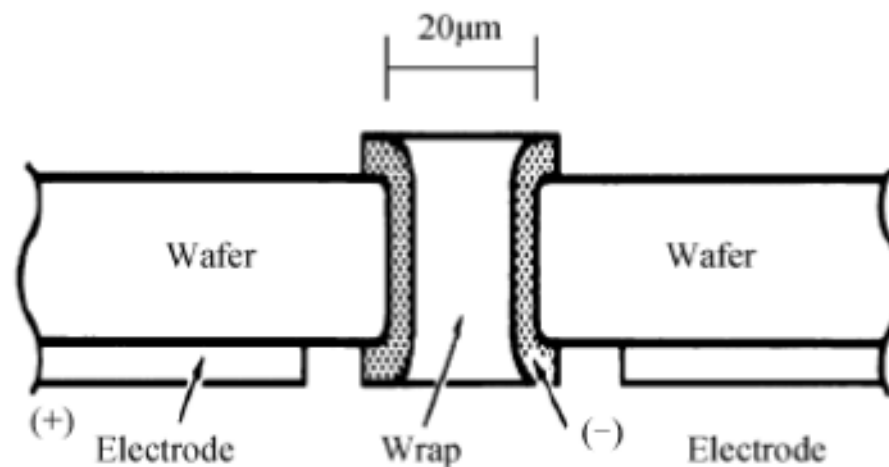
背接触型硅电池

EWT、MWT

3000个/s

15~20个脉冲/孔

目标: $\eta > 20\%$



通过孔 连通发射极或前电极与金属背电极, 进一步降低屏蔽损耗, 提高光-电转换效率。



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine

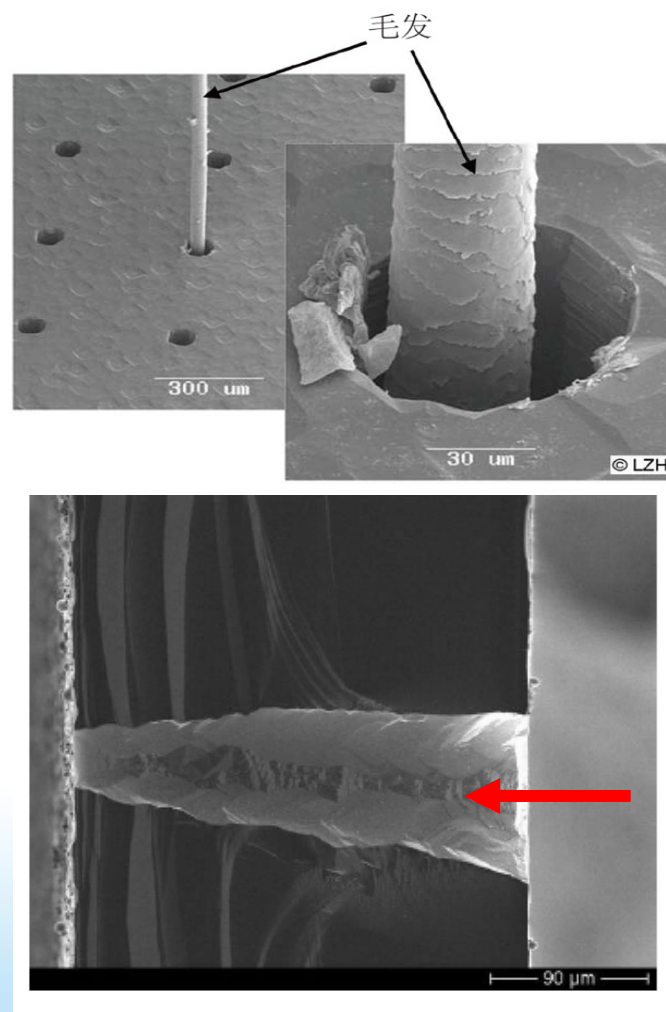


激光技术在光伏太阳能产业的应用

光纤激光器在硅片上打孔

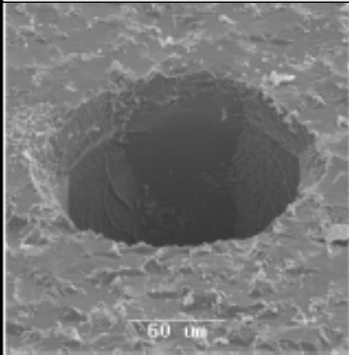
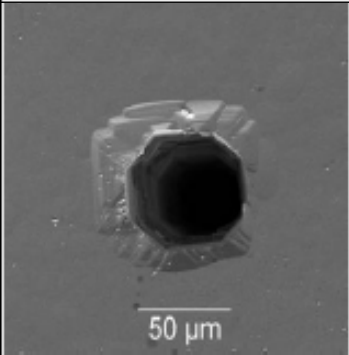
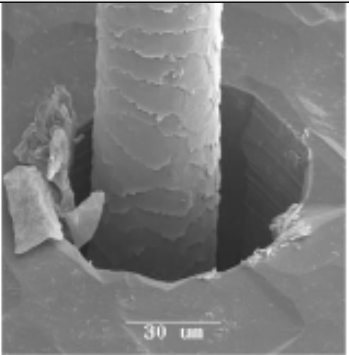
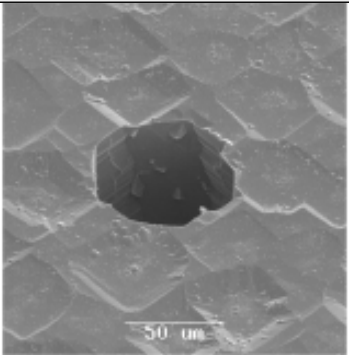
平均功率80 W，
重复频率80 kHz，
脉冲宽度700 ns的
脉冲光纤激光器

以上输出脉冲参数
可按需要精确调节。



激光技术在光伏太阳能产业的应用

激光在硅片上打孔: Laser Zentrum Hannover, Germany

laser para- meter	LPSS	disc laser	fibre laser	DPSS
λ [nm]	1064	1030	1075	1047
t_p	100 μ s	≈ 1 μ s	700 ns	50 ns
E_p [mJ]	50	4	1	0.25
# pulses	1	6-8	15-20	80-100
image				
# / s	750-1000	4000-5000	4000-5000	1250-1500
quality	laser induced damage	OK	OK	OK

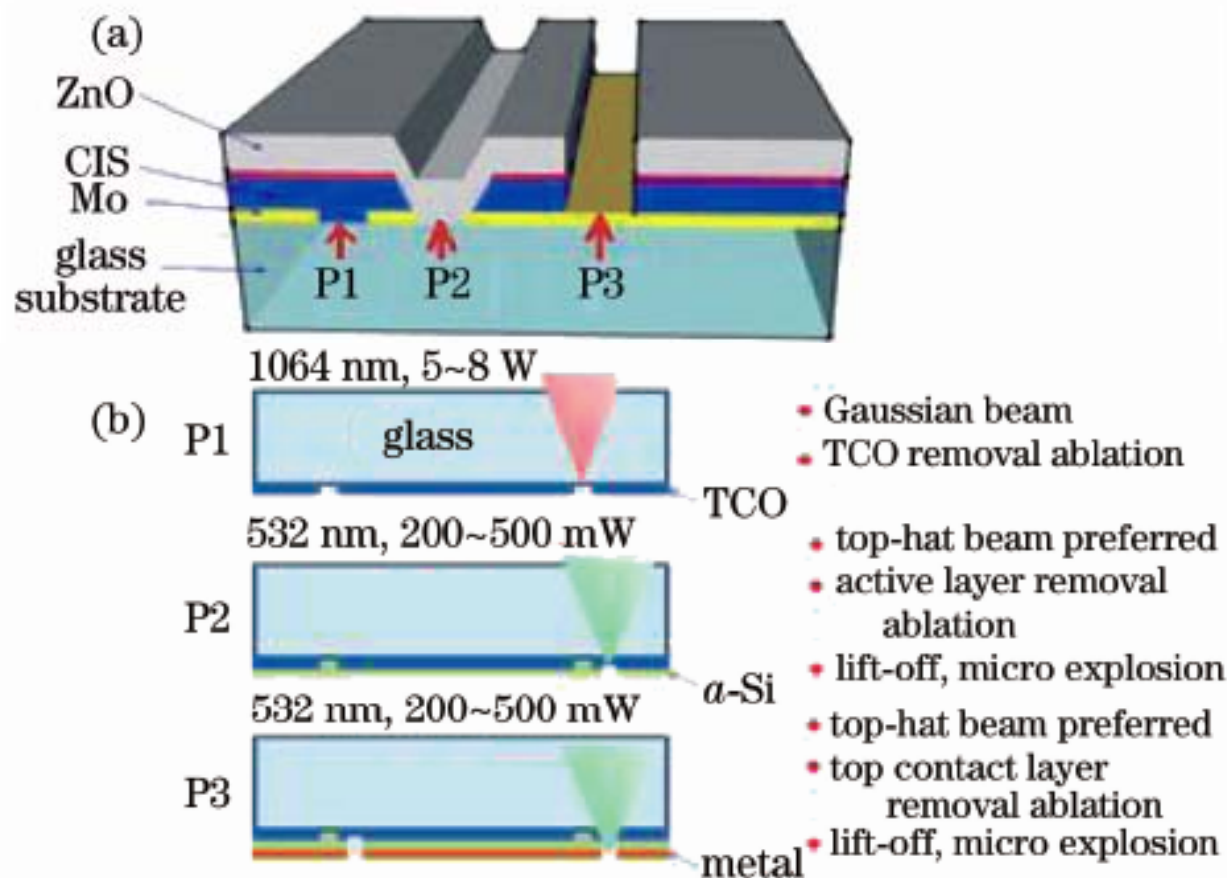


中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光技术在光伏太阳能产业的应用

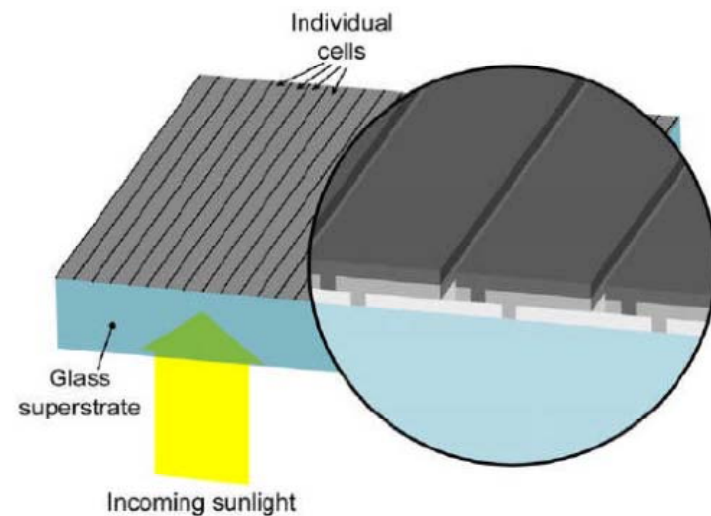
激光在薄膜电池上划线



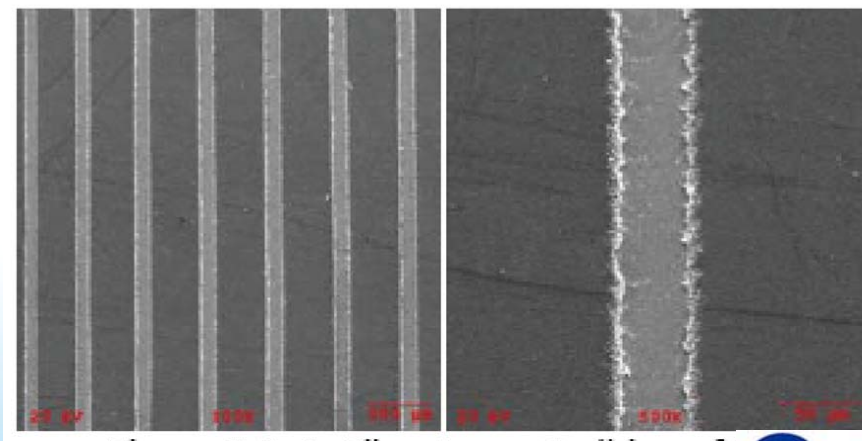
激光技术在光伏太阳能产业的应用

光纤激光在薄膜电池上划线

高重复频率的脉冲光纤激光及其倍频绿光激光的光束质量好，聚焦光斑小，易于实现50 μm 的线宽要求，在大型阵列互联型电池板的制备方面优势明显。

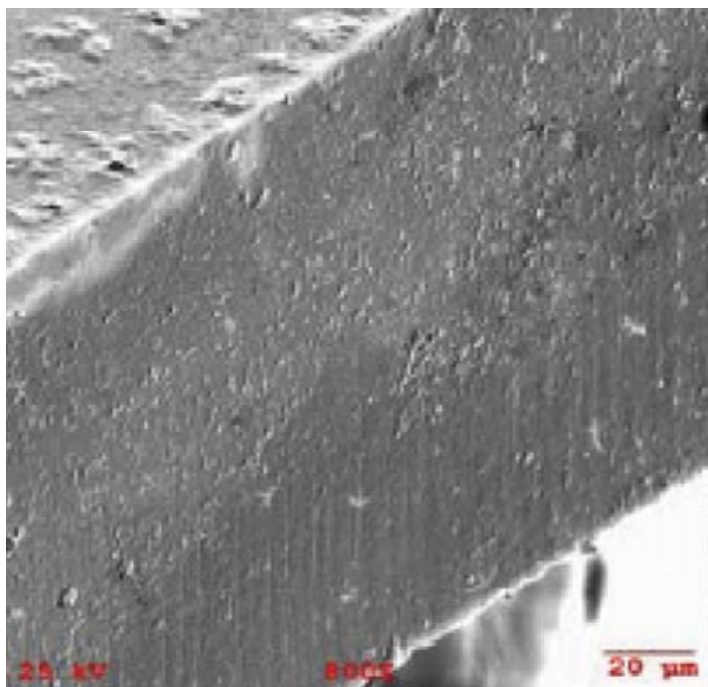


20 W脉冲光纤激光器在玻璃上的钼层(用于CIGS背电极)高速扫描显微图

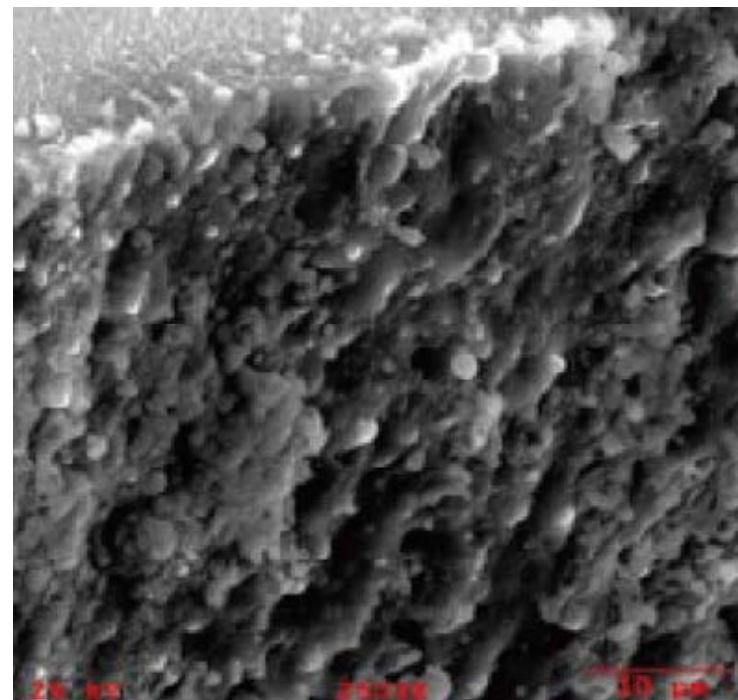


激光技术在光伏太阳能产业的应用

光纤激光切割硅片 SPI



50W CW、250μm、2.5m/min



20W Pulse、100μm、
0.25/min、200ns、25kHz



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光技术在光伏太阳能产业的应用

光纤激光切割硅片SPI

厚度 mm	材料	功率 W	速度 m/min
0.25	单晶硅衬底	200	>6
0.65	单晶硅衬底	200	>3
0.85	单晶硅衬底	200	3
1.2	单晶硅衬底	200	1
1.4	单晶硅衬底	200	0.7
0.25	多晶硅带	50	2.5
0.84	有图案的晶圆	100	5

SPI 连续光纤激光器切割参数



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine



激光炮这种好莱坞电影中才会出现的新武器，美国海军已经取得了阶段性的研究成果。美国《海军时报》8日报道称，美国海军宣布研制出一种具备足够精度和功率，能有效击落无人机并使小型船艇失能的激光炮，并打算在8个月后将部署到阿拉伯湾进行进一步测试。

报道称，去年8月美国海军在“杜威”号驱逐舰上完成首次测试，当时这艘驱逐舰的飞行甲板被巨大的白色整流罩堵得水泄不通，而整流罩内包括了激光炮塔和用于驱动的发电机。在测试中，激光束击落了多架低空飞行的无人机，并且穿透了小艇，表现出色。不过，美国海军对于这种新式武器的具体性能讳莫如深。报道称，在记者会上，海军研究人员对激光器的射程、激光强度和针对其他目标的效果等问题闭口不谈。海军研发办公室的固体激光器项目负责人彼得·莫里森将这种武器的杀伤效应比作“吹灯”，并说海军的激光器可“具备高能烧穿能力，足以摧毁目标最关键的部分。”

美公布舰载激光炮研制进展

文章称，该项目历时6年，耗资约4000万美元，每套安装在舰艇上的系统预期价格将达到3800万美元，这只是其他军用激光器成本的一小部分，并且每次射击成本不超过1美元，而普通机炮一次射击动辄几百上千美元，而导弹则达到数万、数十万美元。

将部署海湾，验证实战能力

报道称，下一阶段的测试将在2014年年初进行，届时激光器将被安装在“庞塞”号两栖船坞运输舰的前部平台上，并打算在危险的阿拉伯湾进行为期数月的测试。“庞塞”舰舰员将在舰艇的

具备高能烧穿能力 可防近程导弹攻击

美军舰载激光炮欲部署海湾

本报特约记者 章节 侯涛



安装在军舰甲板上的激光炮。

作战信息中心控制激光器，很像他们操纵“密集阵”这样的末端防御系统，该系统可通过雷达跟踪目标，或通过操纵员的控制瞄准目标。

美国有线电视新闻网8日报道称，美国防部一名官员说，这种武器的快速反应能力“匹配我们在海湾所看到的潜在目标”。另一名国防部官员也说，虽然这种激光武器是首次部署，但它完全能够被用来对付威胁。

有分析认为，美军的这一安排让人们很容易联想到舰载激光炮是用来对付伊朗快艇的狼群战术和无人机的。不过，中国军事专家认为，美国海军将尚处于测试阶段的舰载激光炮部署海湾地区，主要考虑测试其在恶劣海况下的适应性和可靠性，以及不同地区大气环境对激光传输的影响，为完善设计以及今后在该地区可能的作战行动积累

更多数据和经验。

会改变未来海战规则吗？

美国国会研究中心前不久发布的一份报告称，舰载激光武器是海战中潜在的“改变游戏规则者”，可以媲美上世纪50年代舰载导弹的出现。一些军事专家称，激光武器不需要“独特的平台”，可以部署

到不同的舰船上。今后，将有更强大的舰载激光器问世，其作战范围有望达到10公里，这种更强大的激光器可以为水面舰艇提供终端防御能力，抵御某些弹道导弹，包括反舰弹道导弹。

但也有专家认为，激光武器存在一定的局限性。有分析认为，舰载激光炮的主要用途仍是防空，其反水面舰艇能力仍然有限。美国军方虽宣称该激光器能让小艇瘫痪，但并未说明作为靶标的

小艇的壳体材料和厚度。由于该激光器形成的光斑仍然不大，除非攻击关键部位，否则只是在舰艇壳体上烧一个小洞，并不足以使其受到严重损伤。而且，受到海水影响，激光器也

较难对水线以下部位实施有效攻击，如果舰艇的壳体材料较厚，也会大大延长照射时间，提高照射成本，使其相对普通弹药的优势降低。依靠瞄准即摧毁的优势，激光炮仍然主要用于对付相对较为脆弱但是更为快速的空中目标，如战斗机和反舰巡航导弹等。

对于激光炮的未来定位，一名中国军事专家认为，发展成熟后的激光炮，将首先代替近程防空导弹和“密集阵”这类末端防御系统，几乎可以对付任何空中和水面来袭目标，特别是导弹。此外舰艇可以用激光器发出警告信号，例如将激光打在飞机机身上，如果飞机不改变自己的航线，则加大功率予以击落。此外，这种激光炮还能作为一种C-RAM（反火箭弹迫击炮弹）武器，用来保护军事基地免遭炮火的袭击。当然，该系统目前还并不完美，《海军时报》也承认，该系统的最大的障碍还是如何在海上，在各种水汽的影响下，保持激光束聚焦于目标的某一处。而进一步减小体积和功耗，提高功率，也是其下一阶段的发展重点目标。▲

波音披露六代战机概念图

据美国“全球飞行”网站8日报道，美国波音公司在华盛顿举办的美国海军联盟海空会议上，披露了最新版本的F/A-XX第六代战斗机概念图（右图）。波音公司表示，这种新型战斗机的设计采用双引擎，



军事应用 海军



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

结束语

- 从大功率光纤激光器的发展来看，目前已从实验研究走向实用阶段。
- 光纤激光器工作在更高功率状态下，还有很多诸如热效应、模式控制的问题，以及相关物理机制和关键技术有待解决。
- 从半导体二极管泵浦源，光纤光栅，大模场光纤，光纤耦合器和种子光源等关键器件入手研究，从材料的制作工艺到系统稳定工作，全面提升我国在这一领域的科技水平。



谢谢大家



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS