

# 高功率全固态激光器 及其应用研究

林学春

中国科学院半导体研究所

2013年11月1日

# 报告提纲

一、高功率全固态激光器概述

二、研究背景和发展现状

三、我所高功率全固态激光器

四、高功率全固态激光器应用研究

# 高功率激光器的优劣势比较

## 气体激光器

——功率高、体积大、寿命短

## 化学激光器

——功率高、体积大

## 灯泵固体激光器

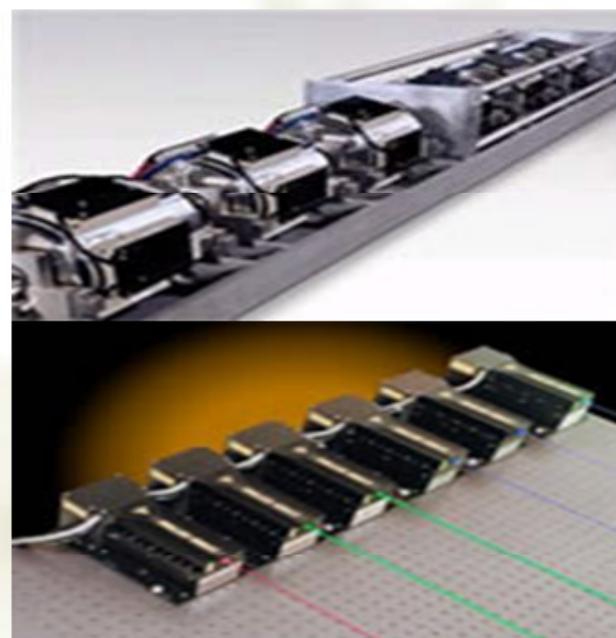
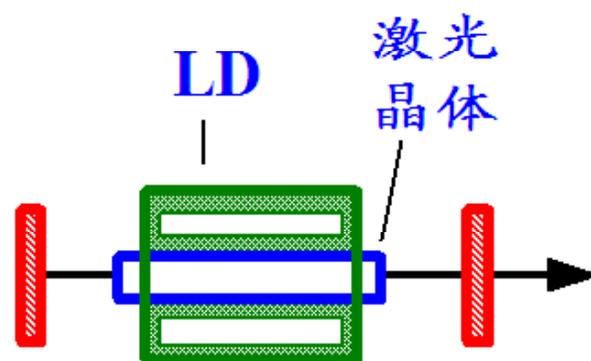
——功率高、光束好、寿命短、体积大

## 半导体激光器

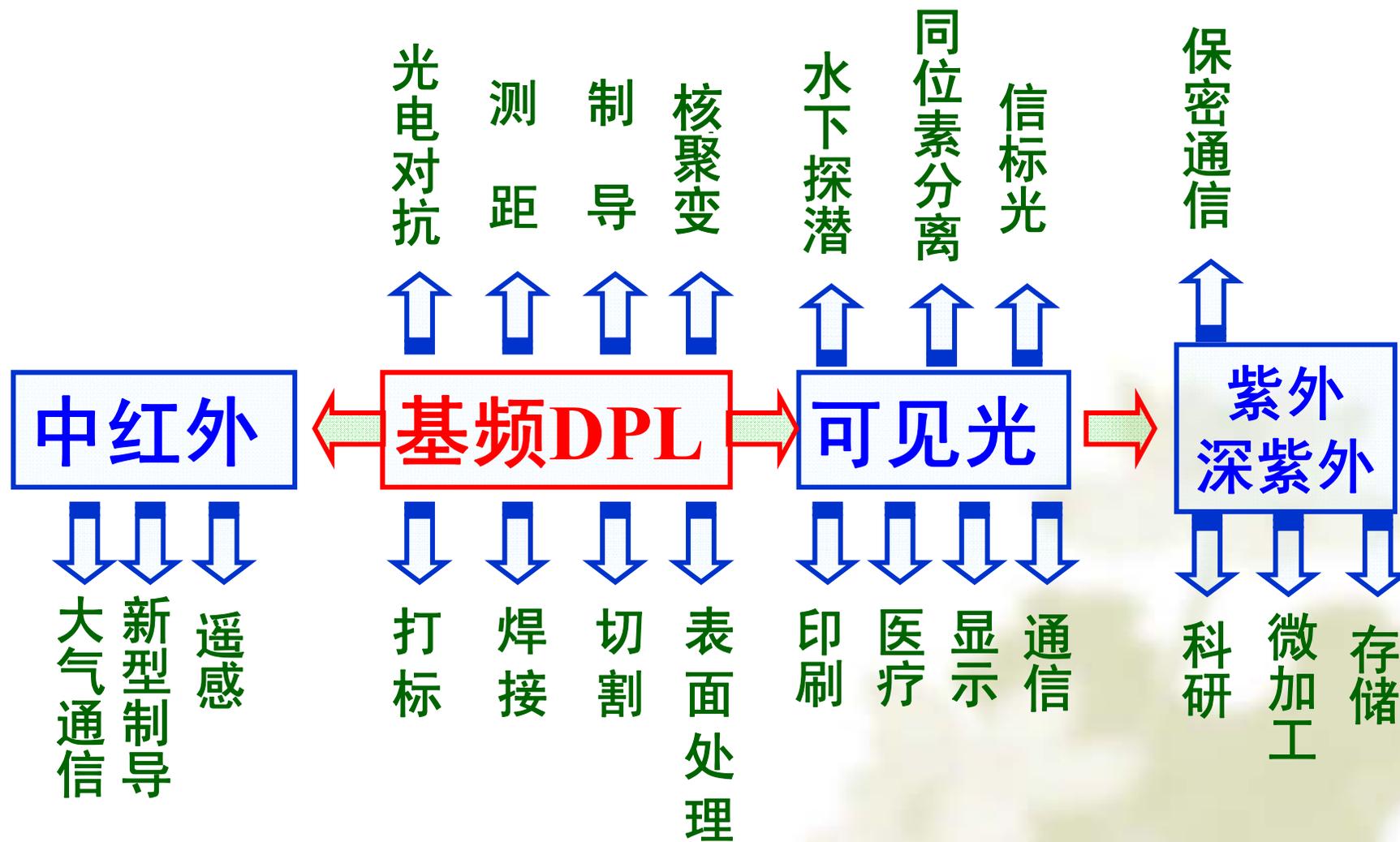
——功率高、体积小、寿命长、光束差

## 全固态激光器

——功率高、体积小、寿命长、光束好



# 全固态激光器概述



# 全固态激光器概述-典型军事应用



激光制导



激光测距



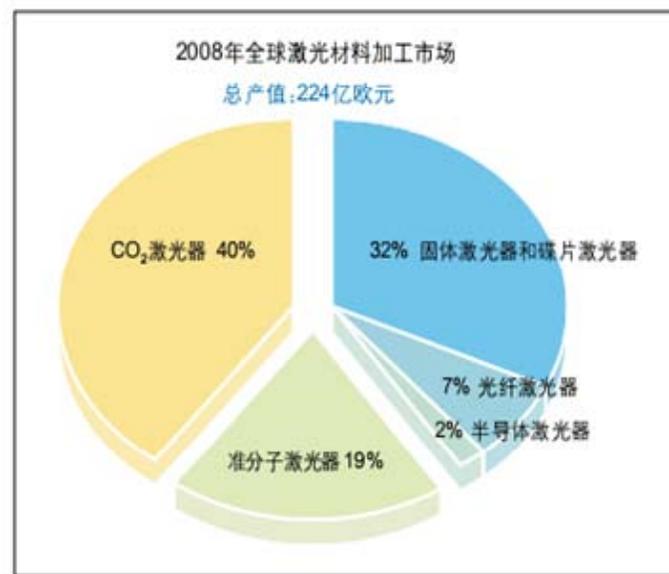
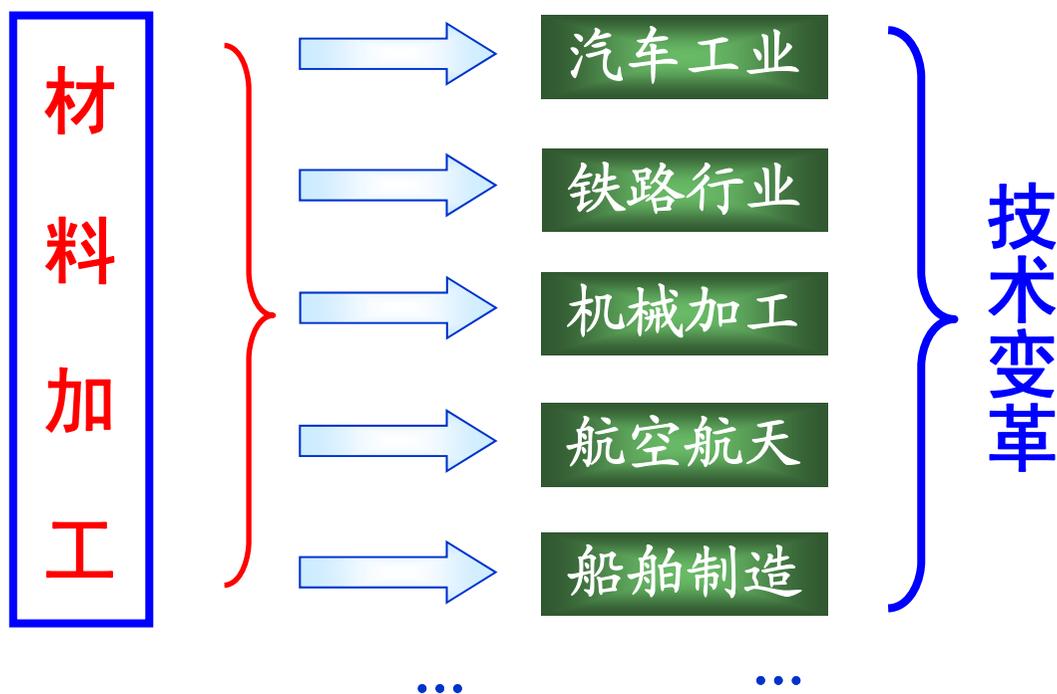
战场保密通讯



激光致盲

# 全固态激光器概述-材料加工

## 先进制造技术——激光加工



发展全固态激光材料及器件核心关键技术、开发成套装备，将显著提升我国先进制造业的技术创新能力和国际竞争能力。

# 全固态激光器概述-材料加工



汽车车身焊接



飞机涡轮修复



轮轨熔覆

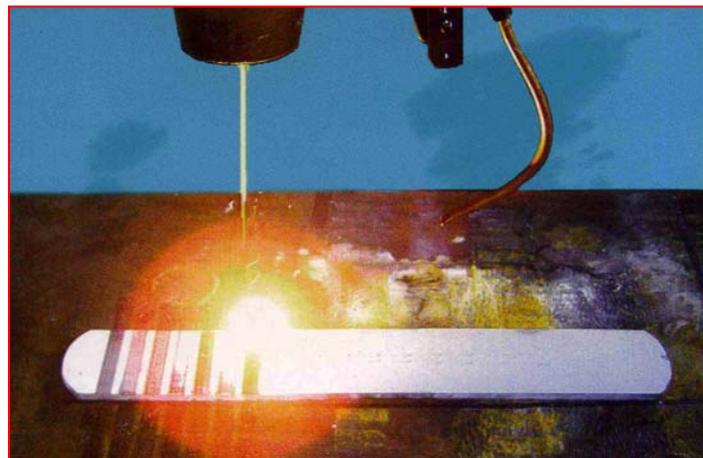
全固态光源实验室



船舶激光焊接

# 全固态激光器概述-材料加工

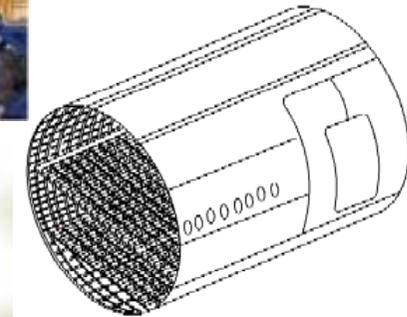
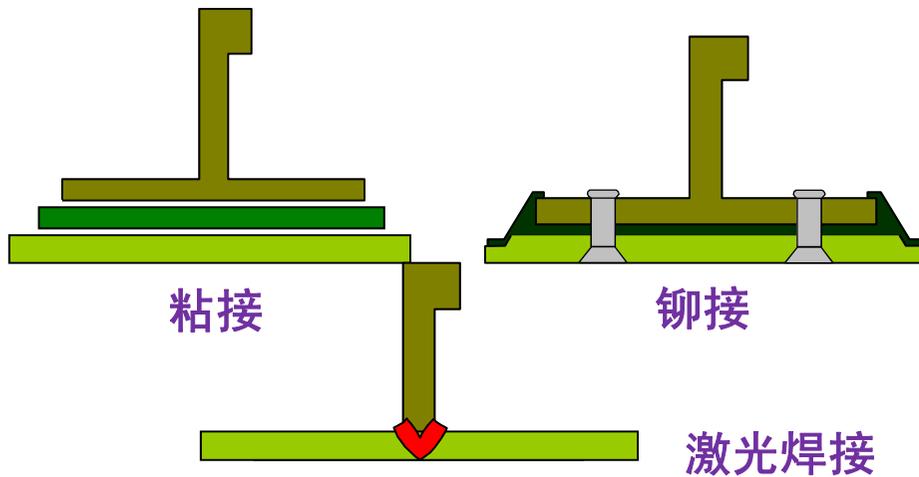
## 铁路轮轨激光表面处理



激光淬火：淬硬层均匀、冷却速度快、工件变形小、加热层深度与轨迹易控制、易实现自动化等。

# 全固态激光器概述-材料加工

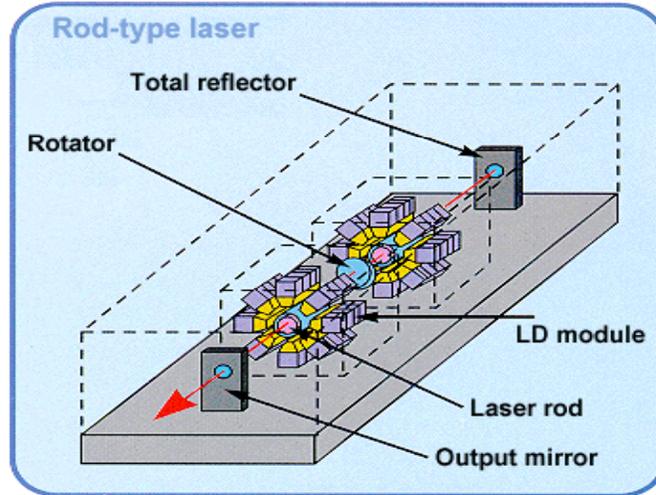
## 飞机蒙皮与筋板的焊接



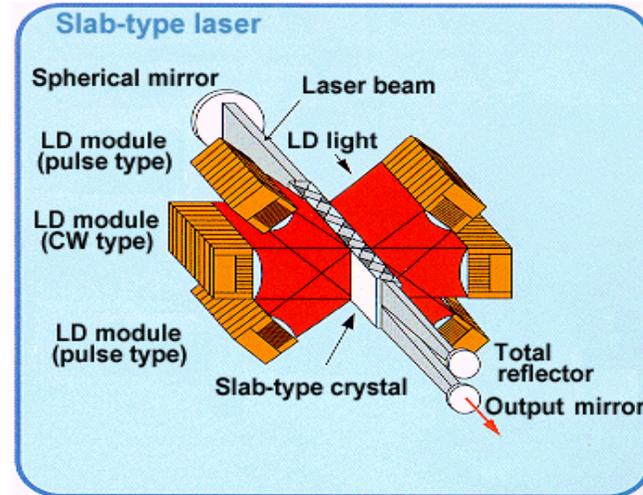
- 简化机身制造工艺
- 机身重量减轻~20%
- 制造成本下降~25%

激光飞机蒙皮与筋板焊接技术是飞机制造业的一次技术革命

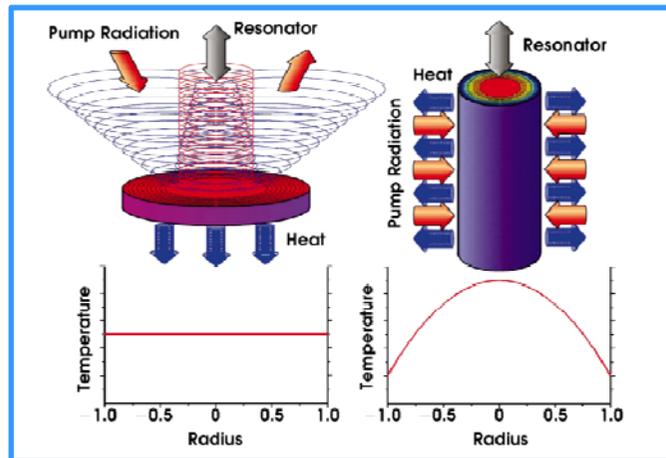
# 全固态激光器概述—分类



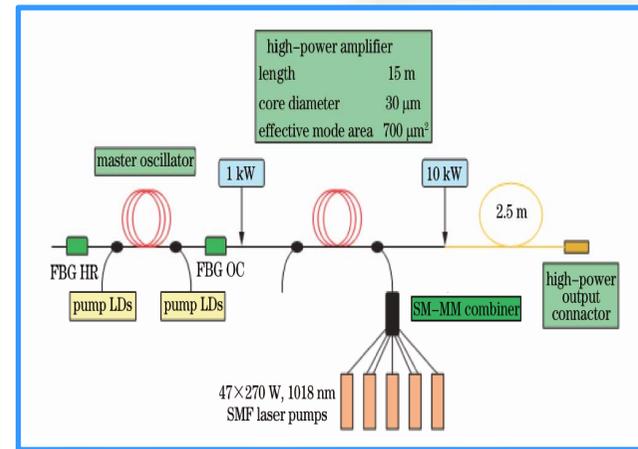
Rod激光器



Slab激光器



Disk激光器



Fiber激光器

# 报告提纲

一、高功率全固态激光器概述

二、研究背景和发展现状

三、我所高功率全固态激光器

四、高功率全固态激光器应用研究

# 国内外研究背景和发展现状

鉴于全固态激光在国民经济和国防领域不可替代的重大支撑作用，世界各发达国家纷纷出台国家级规划以抢占未来高技术的制高点：

美国：制定了21世纪激光科学与工程的发展规划—哈里森光学计划

日本：制定了光科学与工程的发展规划—光世纪

德国：制定了光技术促进计划

北欧诸国：制定了新概念工厂计划等

# 国内研究背景和发展现状

## 国内现状

全固态激光技术与应用已经得到了党和国家、科学界的关注。

2004年，《国家中长期科学技术发展规划》对全固态激光的关键支撑作用、发展重点以及产业布局等战略步骤进行了长远规划。

国家16个重大专项之一，科技部863计划十一五给予了重点支持，并取得了重要进展。

为全固态激光产业化铺平了道路、奠定了良好的基础

# 国内高功率全固态激光器研究现状

国家	单位名称	激光器类型	输出功率	备注
中国	清华大学	角泵浦板条	1kW	
	九院十所	薄片	10kW	热容
	中科院理化所	Nd:YAG	CW:3kW QCW:3.8kW	
	中科院上光所	光纤	1.8kW	
	中电十一所	薄片	8.7kW	热容
		光纤	1.2kW	
	武汉锐科	光纤	10kW	
	中科院 半导体所	Nd:YAG	7.1kW	50.3mm·mrad

# 报告提纲

一、高功率全固态激光器概述

二、研究背景和发展现状

三、我所高功率全固态激光器

➤ 关键技术研究

➤ 千瓦级连续波激光器

➤ 千瓦级准连续波激光器

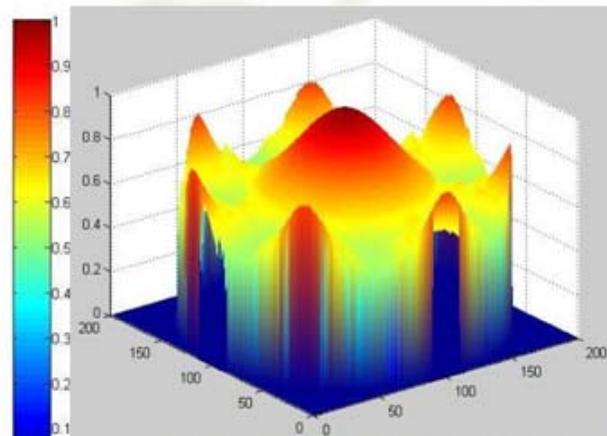
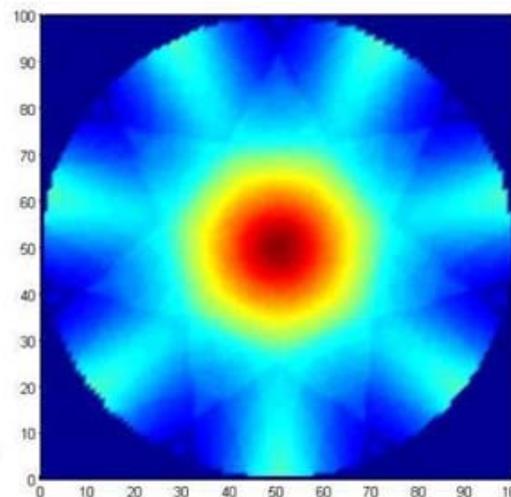
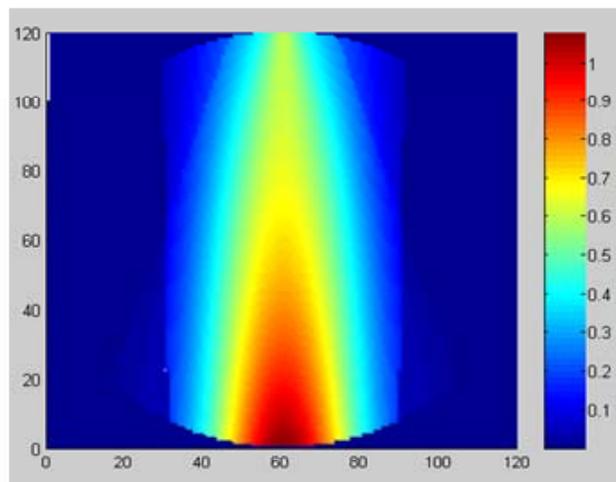
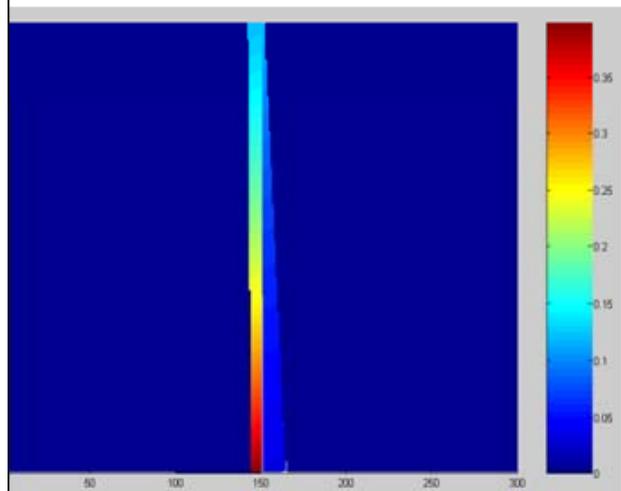
四、高功率

# 高功率激光模块技术

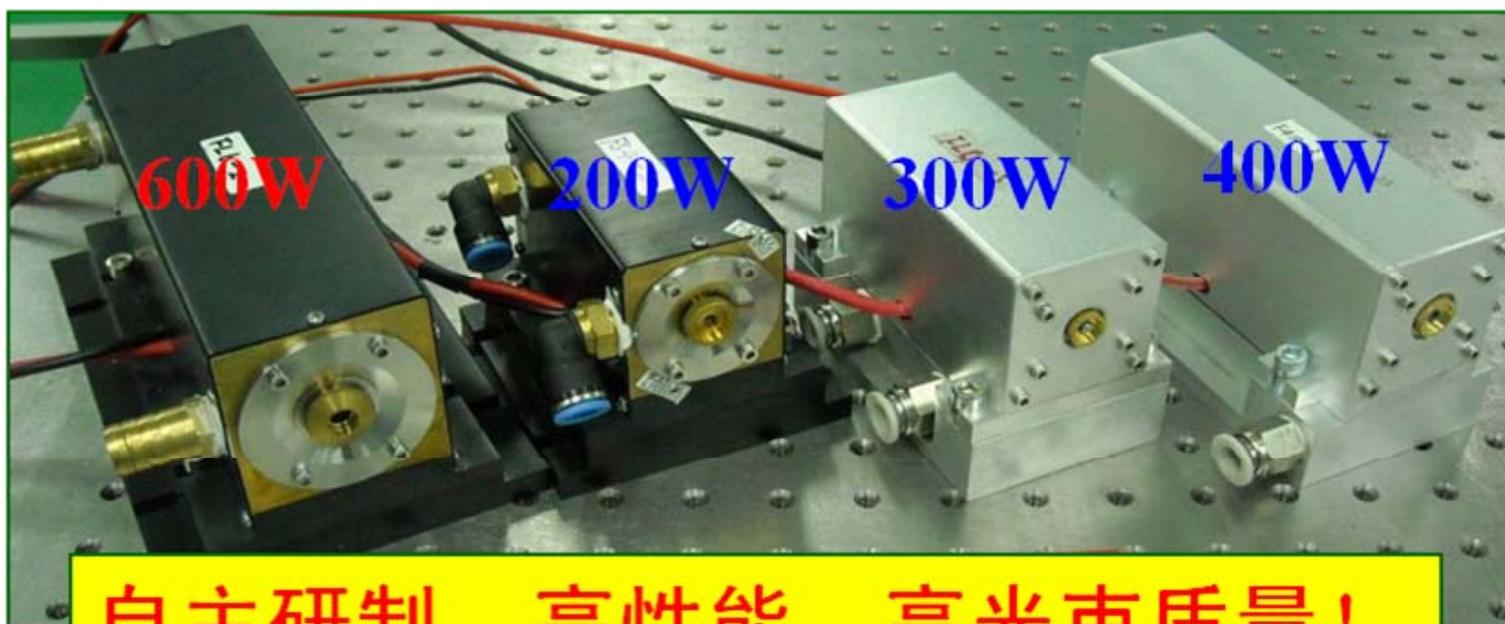
LD特性分析

增益模拟

理论设计



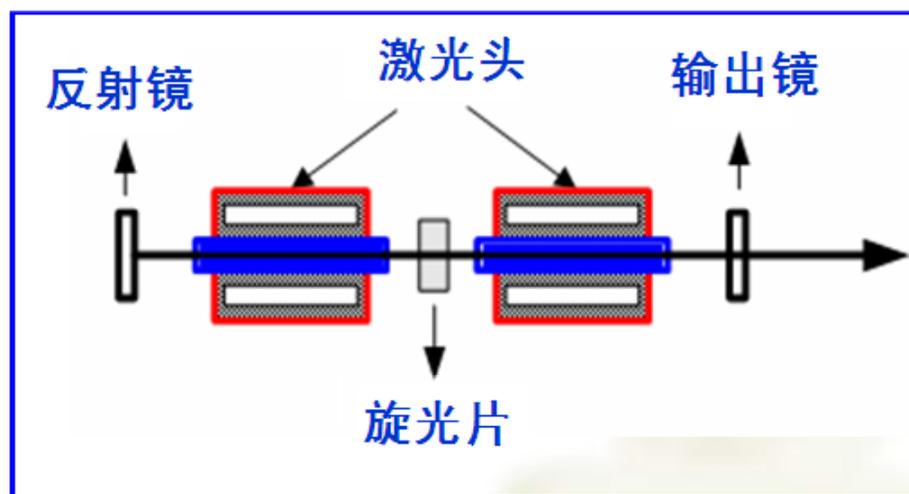
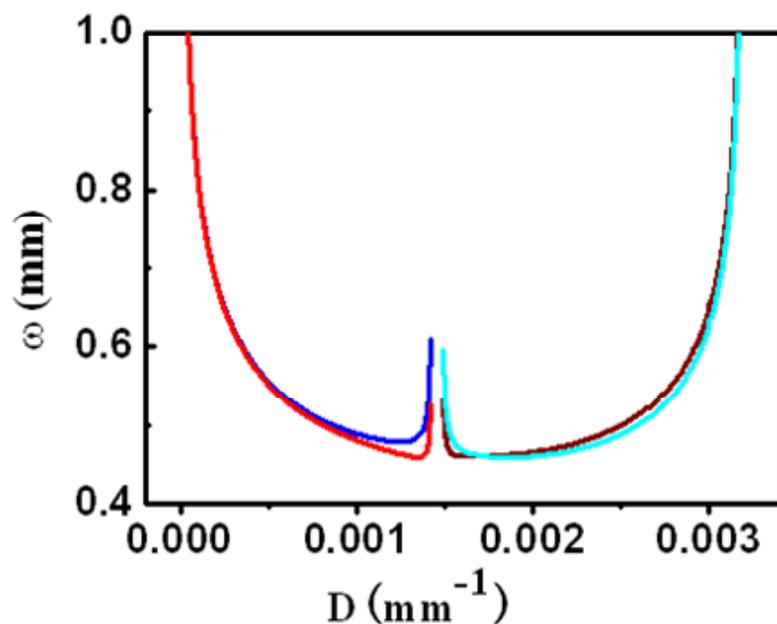
# 高功率激光模块技术



自主研发，高性能、高光束质量！



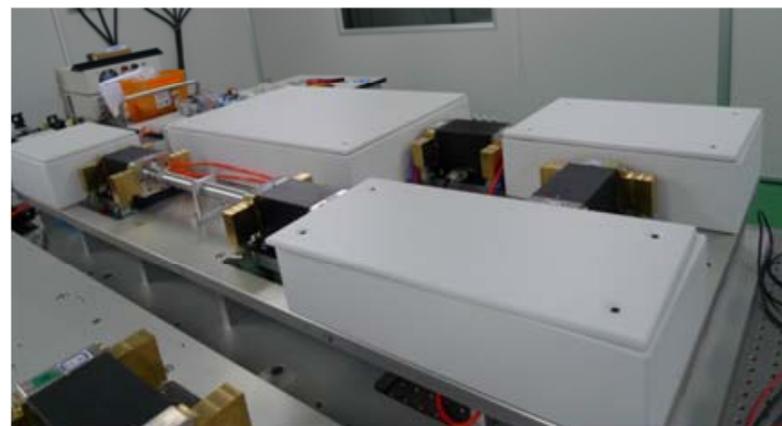
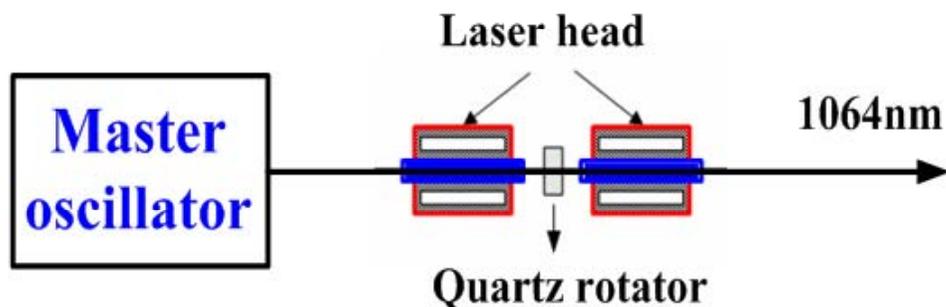
# 多头串接技术



多激光头串接能成倍的提高输出功率，且不会改变光束质量，是增加输出功率的有效途径。

合理设计谐振腔及采用有效的串接技术，实现振荡级输出2.0kW激光，光束质量 $18\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

## 定标放大技术

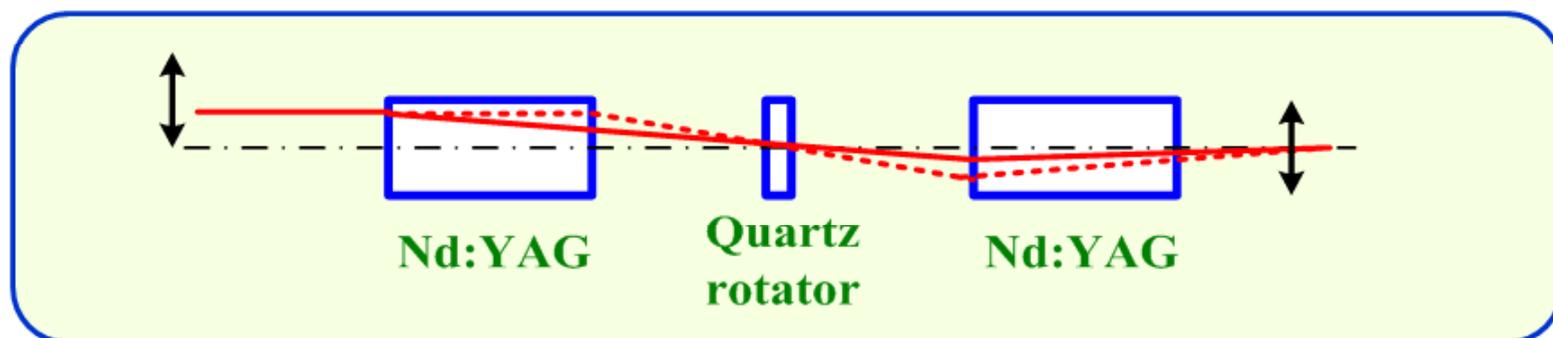


- 放大器的增益控制技术
- 高效的提取效率设计
- 波前畸变的减弱技术
- 自激振荡的消除技术

振荡级	两级放大	四级放大
1.86kW	3.52 kW	5.26 kW
18.4mm•mrad	19.1mm•mrad	20.8mm•mrad

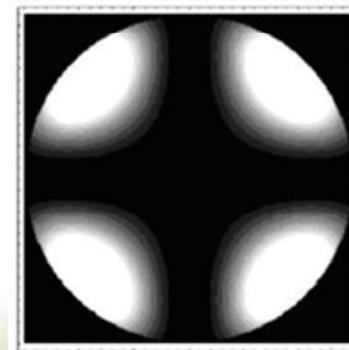
保持优良的光束质量的同时，使得功率成倍增加

# 热退偏补偿技术



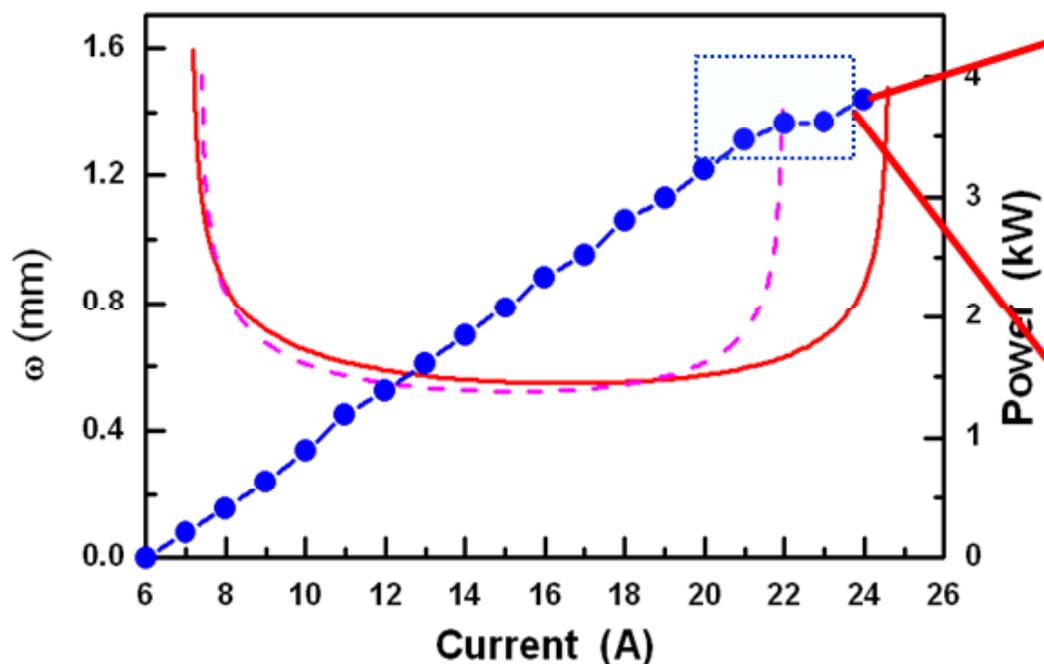
$$\beta_r = -\frac{P}{2\pi K_s R_0^2} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_r \right) \quad \text{径向}$$

$$\beta_\phi = -\frac{P}{2\pi K_s R_0^2} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_\phi \right) \quad \text{切向}$$



采用90度旋光片等措施，补偿热致双折射引起的退偏效应，效率提高10%。

# 光束质量控制技术



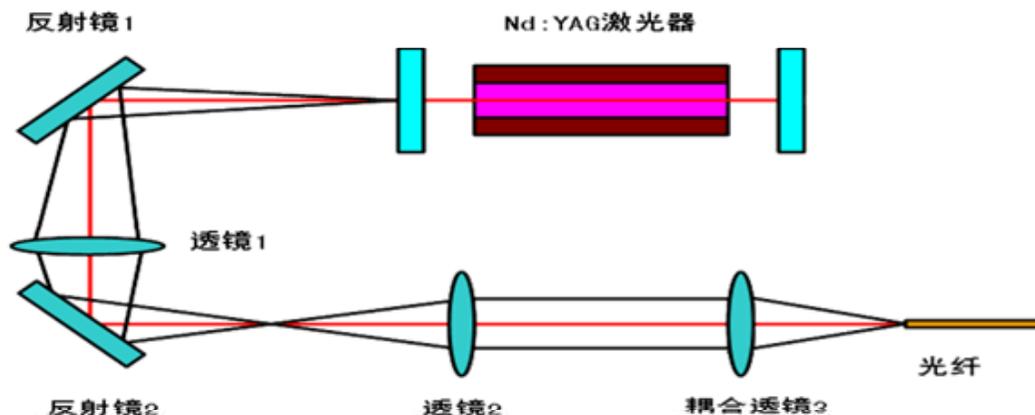
3.5 kW  
19mm\*mrad

可耦合到 400 $\mu$ m 光纤，  
满足高功率焊接需要

在稳区边缘运行  
□ 大基模体积  
□ 高光束质量  
□ 稳定性好

大模体积腔设计，热近非稳腔工作，  
高功率，高光束质量，高效率，高稳定性

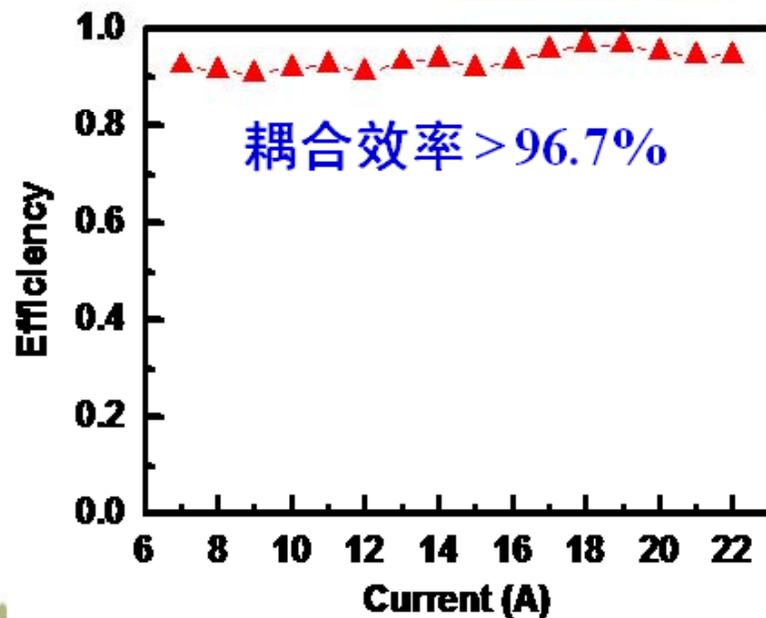
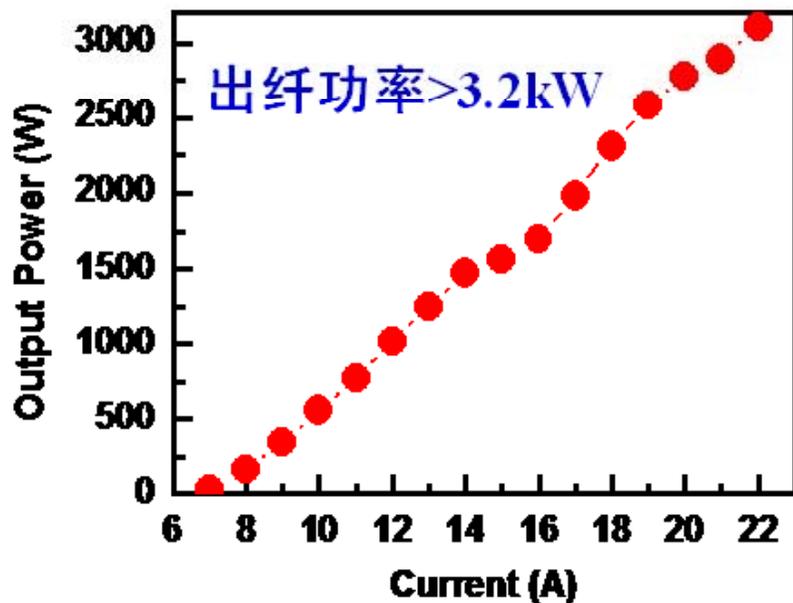
# 高效光纤耦合技术



独特耦合系统设计

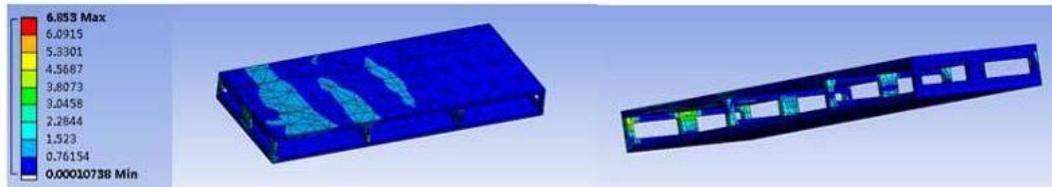
高效率、高功率

高可靠

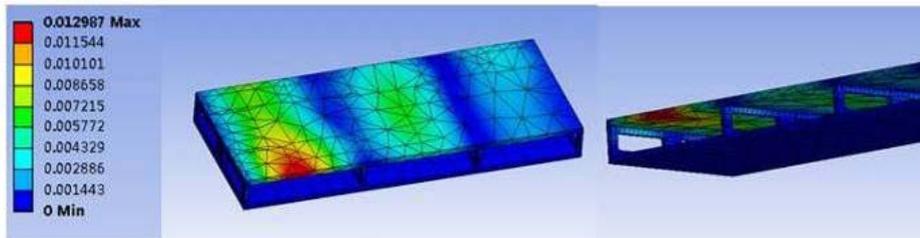


## 光学部件结构稳定性优化

应力：无较大受力，小于材料屈服强度



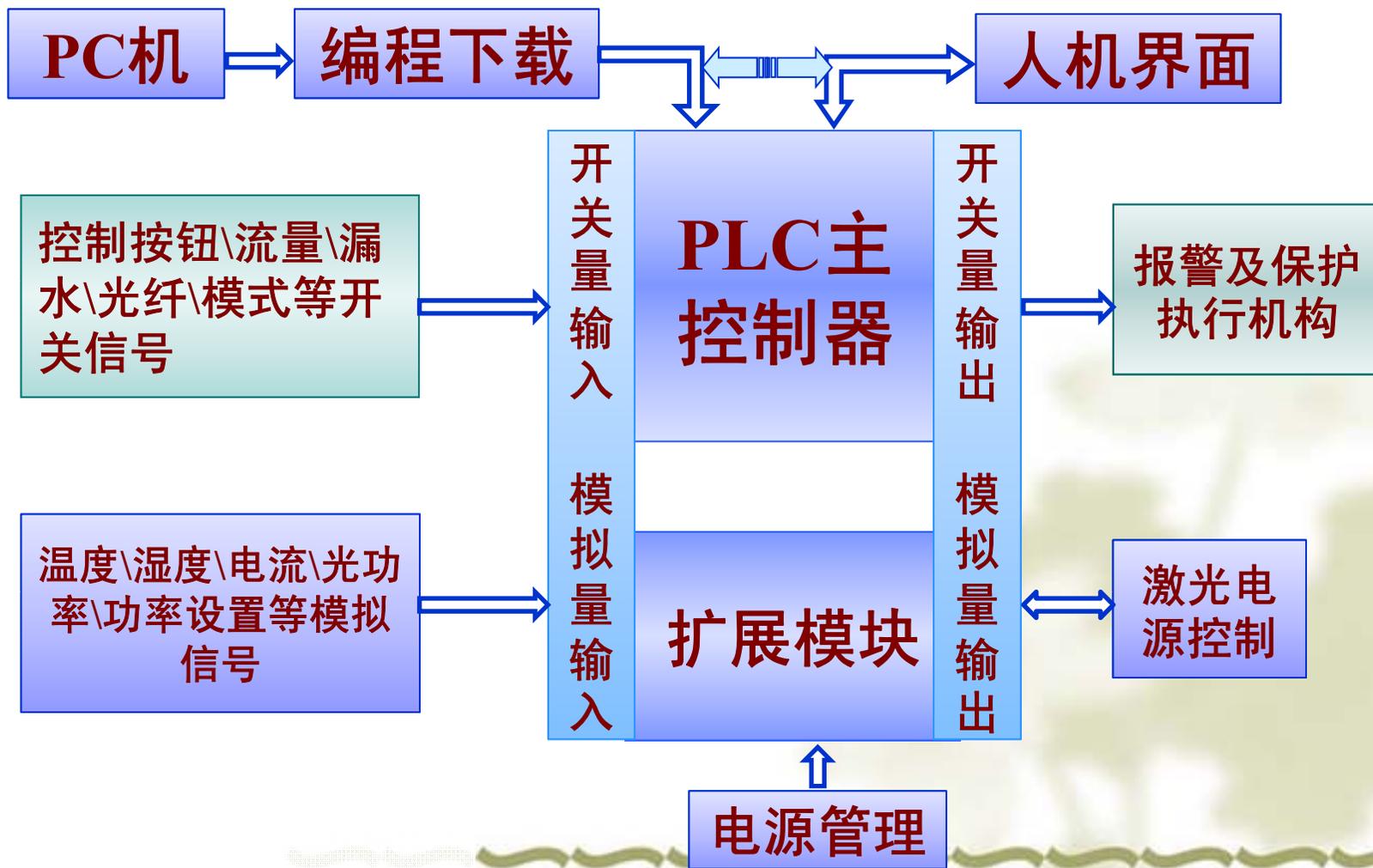
形变：形变可忽略不计



- 增加稳定性
- 减轻重量
- 降低成本
- 提高保护

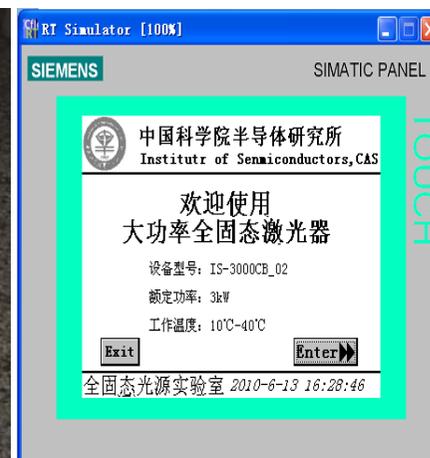


# 激光器PLC控制系统



# 多种状态监控、反馈与自调校

- 基于西门子PLC的控制系统设计，高稳定性、可靠性、安全性的实时监测与控制；
- 友好灵活的人机交互界面，通过触摸屏显示与控制；



## 外观优化设计



型号	波长	工作模式	光纤芯径/ 数值孔径	额定输出 功率	功率稳定性 (额定功率)	电光效率
ZKSX 0501	1064nm	连续 (CW)	100 $\mu$ m/0.2	0.5kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$
ZKSX 1002	1064nm	连续 (CW)	200 $\mu$ m/0.2	1kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$
ZKSX 1004	1064nm	连续 (CW)	400 $\mu$ m/0.2	1kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$
ZKSX 3004	1064nm	连续 (CW)	400 $\mu$ m/0.2	3kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$
ZKSX 3008	1064nm	连续 (CW)	800 $\mu$ m/0.2	3kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$
ZKSX 5008	1064nm	连续 (CW)	800 $\mu$ m/0.2	5kW	$\pm 1\%$	$\geq 15\%$

# 千瓦级连续波激光器

## 里程碑

功率：3.07kW  
不稳定性：1.2%

中国科学院半导体研究所集成技术中心研制的高功率全固态连续波激光器，输出最大功率为3.071千瓦，激光器的稳定性为1.2%。

测试组组长签字：

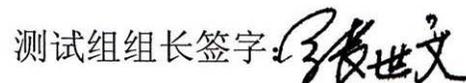


2006年5月15日

功率：4kW  
不稳定性：±0.3%

中国科学院半导体研究所集成技术中心研制的高功率全固态连续波激光器，输出最大功率为4.008千瓦，功率不稳定性为±0.3%。

测试组组长签字：

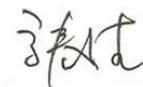


2006年11月2日

功率：6.0kW  
不稳定性：0.46%

中国科学院半导体研究所集成技术中心研制的高功率全固态连续波激光器，输出最大功率为6.025千瓦，激光器在输出功率为4.48千瓦时的稳定性为0.46%。

测试组组长签字：



2007年4月17日

# 千瓦级连续波激光器

# 工业级5kW激光器

国内首次研制出工业级5kW全固态激光器，多次被科技部列为重大创新成果；入选国家“十一五”重大科技成就展览。



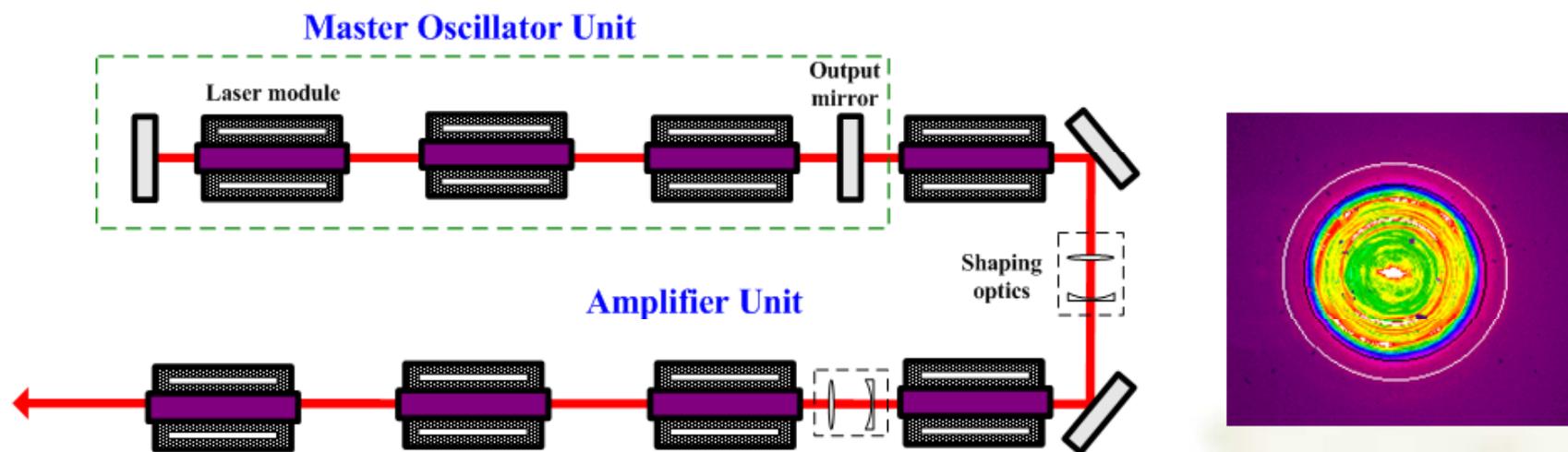
千瓦级连续波激光器

# 全固态激光器成功实现成果转化



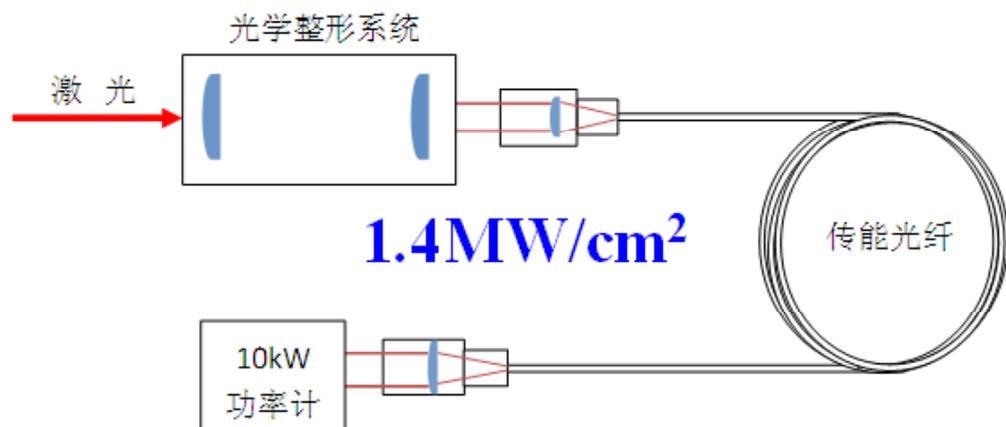
实现1~5kW高功率全固态激光器批量生产

## 工程化7kW全固态激光器

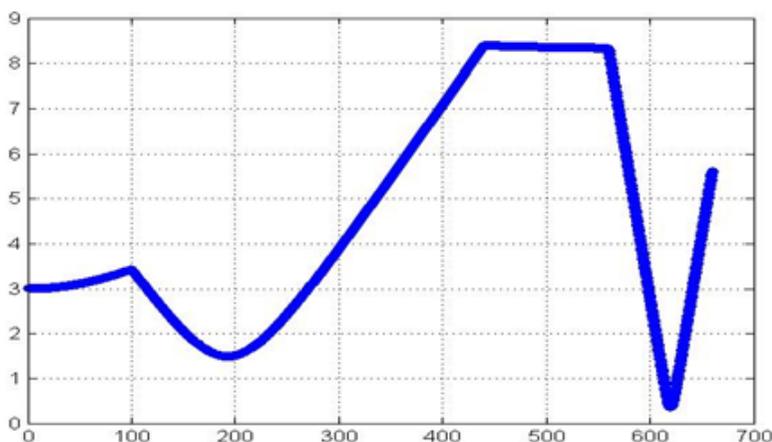


- 采用三级振荡五级放大的MOPA结构
- 重点解决多级串接谐振、多级放大增益饱和、光束质量控制和激光损伤等问题

## 7kW全固态激光器光纤耦合

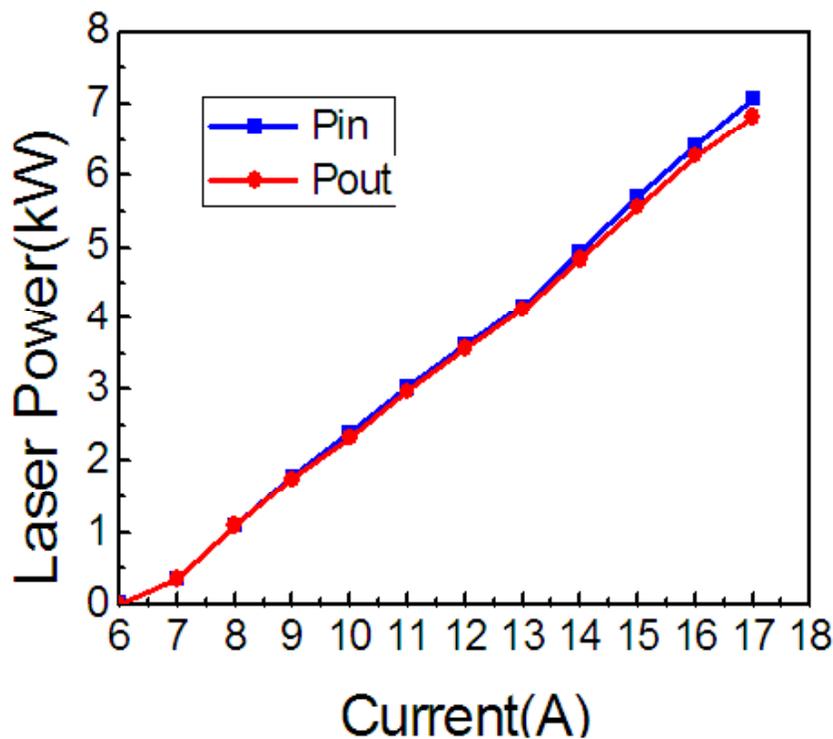


- 自行设计整形系统
- 重点解决光路的像差影响，元件的损耗、损伤，光束调整对准等关键技术

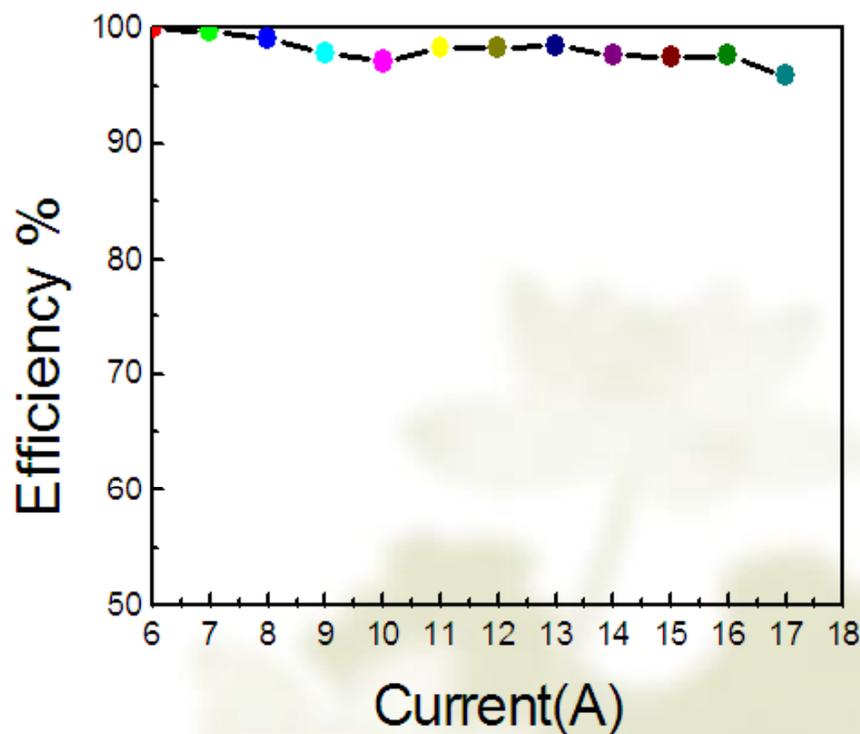


	光斑直径	发散半角
激光束	717 $\mu\text{m}$	0.14
光纤	1000 $\mu\text{m}$	0.22

## 7kW全固态激光器光纤耦合



耦合输出功率 6.8kW



耦合效率均大于95%

# 千瓦级连续波激光器

## 7kW全固态激光器光纤耦合

**一、引言**

全固态激光器兼备了半导体激光束质量好、结构紧凑、寿命长等

时间 (分钟)	10	20
输出功率 (kW)	7.15	7.18
时间 (分钟)	70	80
输出功率 (kW)	7.14	7.14
时间 (分钟)	130	140

**3、电光转换效率测试**

测试仪器：数字钳式万用表 (U)

测量电源输出的电压和电流，其源输出的电流和电压。

激光输出功率  $P_{out} = 7.13$  kW。

通过测量得到：输入光纤的激光功率为 7.17 kW，光纤耦合输出功率为

**8小时平均功率7.13kW，稳定性 ±0.98%，电光效率18.4%**

成功实现了功率大于 7kW 的稳定

输出功率 (kW)	7.10	7.13
时间 (分钟)	250	260

**五、小结**

经过现场测试，中科院半导体所全固态光源实验室研制的高功率全固态激光器 8 小时平均输出功率为 7.13 kW，功率不稳定性为 ±0.98%，电光转换效率为 18.42%，光束质量为 50.3 mm\*mrad，通过光学整形系统耦合到 1mm 芯径的高能激光传输光纤，当输入光纤激光功率为 7.17 kW 时，光纤耦合输出功率为 6.82 kW，耦合效率为 95.1%。

相对位置 (mm)	0	10	20
光斑半径 ω (mm)	2.64	2.434	2.298

计算出聚焦光斑直径为

远场发散全角:  $\theta = 56$

光束质量光束参数乘积

7kW

**光束质量50.3mm\*mrad**

图 1 - 7kW

时间 (分钟)	370	380
输出功率 (kW)	7.13	7.06

**四、光纤耦合输出功率**

**光纤耦合输出功率 6.82kW，耦合效率 95.1%**

根据中华人民共和国国家标准激光器的差值  $\Delta P$  为: 0.14 kW; 8 小时的平均功率 8 小时功率不稳定性为:  $S_t = \pm \frac{\Delta P}{P} \times 100\%$  率的最大值和最小值之差;  $\bar{P}$  是测量的 8 小时的功率值, 即可计算出 11:30 不稳定性测试的初始功率为: 7.16

**2、单次连续运行时间**

根据观测, 该激光器输出平均功率异常。

算光束质量。测试装置如图 2 所示以上的激光功率反射至功率计内一个薄透镜, 通过透镜聚焦后, 平移刀口分别记录 90% 功率 (对移距离, 此时光斑半径  $\omega = 1.56$  通过计算得到不同位置的光束半径算出光束参数乘积以及聚焦光斑的耦合效率。

测试组组长: 孙之旭

测试组成员: 张程岭  
张磊

2012 年 2 月 16 日

# 千瓦级准连续激光器

## 激光清洗的优势

- 灵活、不伤害基材，应用面广
- 干式清洗，绿色环保
- 能清除微米级以下污染微粒
- 设备可长期使用，运行成本低



取代传统酸洗，在模具、船舶等行业有重要应用；  
国际已开始应用，国内尚处空白！

## 对激光器的要求：

- 高峰值功率 (百kW)；
- 窄脉宽 (ns)、高重频 (kHz)；
- 光束质量好，光纤耦合输出。



国外Trumf、Rofin和IPG已有激光器产品，国内最高247W！

# 千瓦级准连续激光器

- 输出功率:  $>1000\text{W}$
- 峰值功率:  $>1\text{MW}$
- 光束质量:  $<10\text{mm}\cdot\text{mrad}$
- 脉宽:  $60\sim 100\text{ns}$
- 重复频率:  $3\sim 50\text{kHz}$
- 稳定性:  $<\pm 2\%$
- 寿命:  $>1.5\text{万小时}$

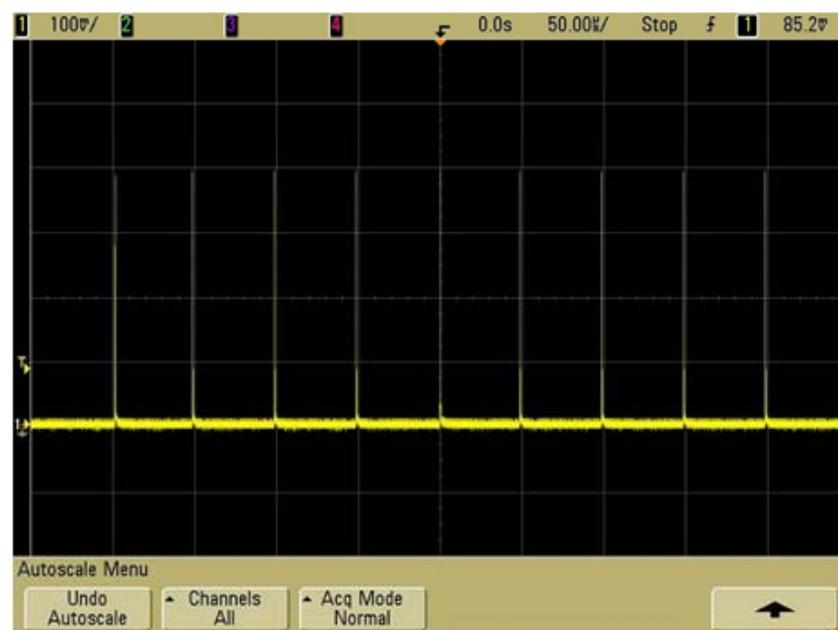
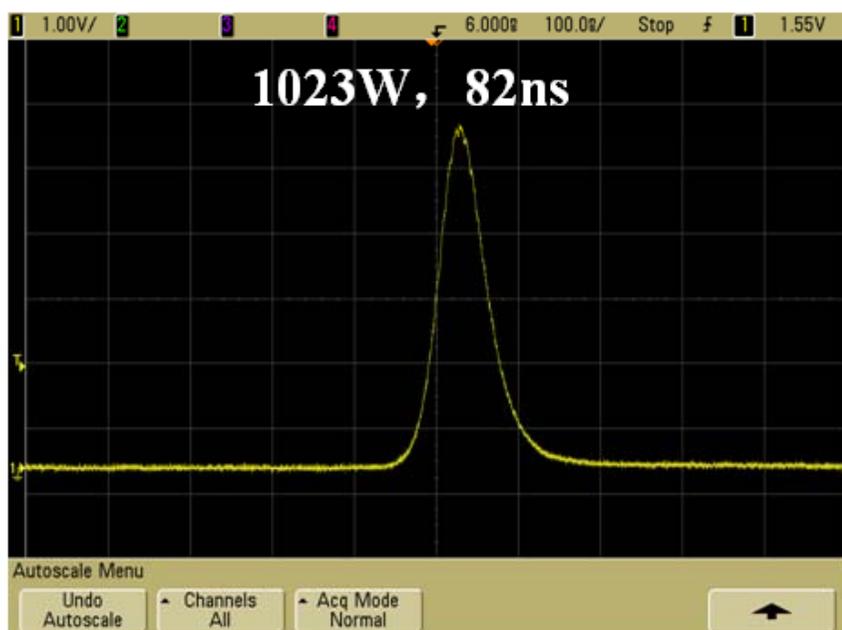
- 打孔
- 精细深雕刻
- 薄板切割
- 薄板焊接
- 材料改性

# 千瓦级准连续激光器



- 高光束质量 ( $\sim 13\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )、短脉冲 ( $60 \sim 100\text{ns}$ )
- 1023W平均功率
- 可耦合进400微米光纤

# 千瓦级准连续激光器



- 高重频（20kHz）、高峰值功率（~MW）
- 稳定的脉冲
- 通过放大，峰值功率可达GW量级

# 千瓦级准连续激光器

平均输出功率: 1.023 kW, 光束质量: 13 mm\*mrad

重复频率: 20 kHz, 脉冲宽度: 82 ns

高功率准连续激光器测试报告

引言

由计算得出, 激光器的最大平均功率为 1.023 kW。

2、脉冲波形测试

根据示波器测量的数据: 重复频率为 20 kHz, 脉冲宽度为 82 ns。

3、光束质量测试

远场发散全角:  $\theta = 17.28$  mrad;

光束质量光束参数乘积:  $K_f = d_0 \times \theta \times 1/4 = 13.0$  mm-mrad。

三、小结

经过现场测试, 中国科学院半导体研究所全固态光源实验室研制的 kW 级准连续全固态激光器, 输出平均功率为 1.023 kW, 激光脉冲重复频率 20 kHz, 脉冲宽度 82 ns, 光束质量为:  $K_f = 13 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

测试组组长: 张华

测试组成员: 程玲 陈松

2012年8月29日

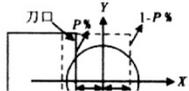


图1 1kW 准连续全固态激光器

二、 激光器参数测试

1、 最大平均输出功率测试

采用以色列 OPHIR 公司生产的型号为 NOVA II 的功率计表头直接测量激光器输出, 每隔 2 分钟读取 1 个功率计数值, 共测激光器的最大输出功率。 14.58

记录次数	1	2
输出功率(kW)	1.020	1.022

距离(mm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
直径(mm)	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42
直径(mm)	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23

# 报告提纲

一、高功率全固态激光器概述

二、研究背景和发展现状

三、我所高功率全固态激光器

四、高功率全固态激光器应用研究

# 激光焊接应用研究



沈阳新松机器人自动化股份有限公司

全国态光源实验室

# 激光焊接应用研究



上下各3mm厚钢板的搭接焊



5mm厚不锈钢板的对拼焊

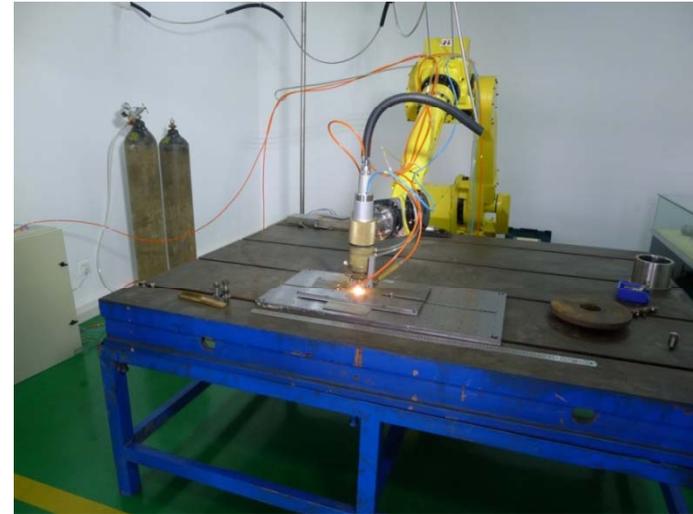
# 激光焊接应用研究

焊接速度快、热影响区小

零件焊后无变形

零件焊接美观、不需再加工

焊接强度高、密封性好



# 激光焊接应用研究



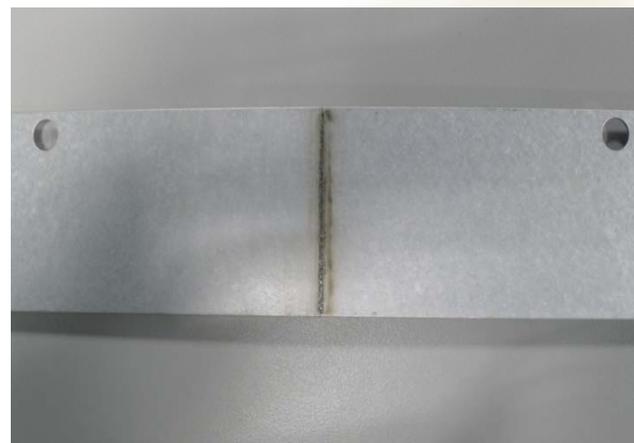
空间三维曲线焊接



铝合金滤清器焊接



铝合金电池盒密封焊接



电视机边框镀锌板焊接

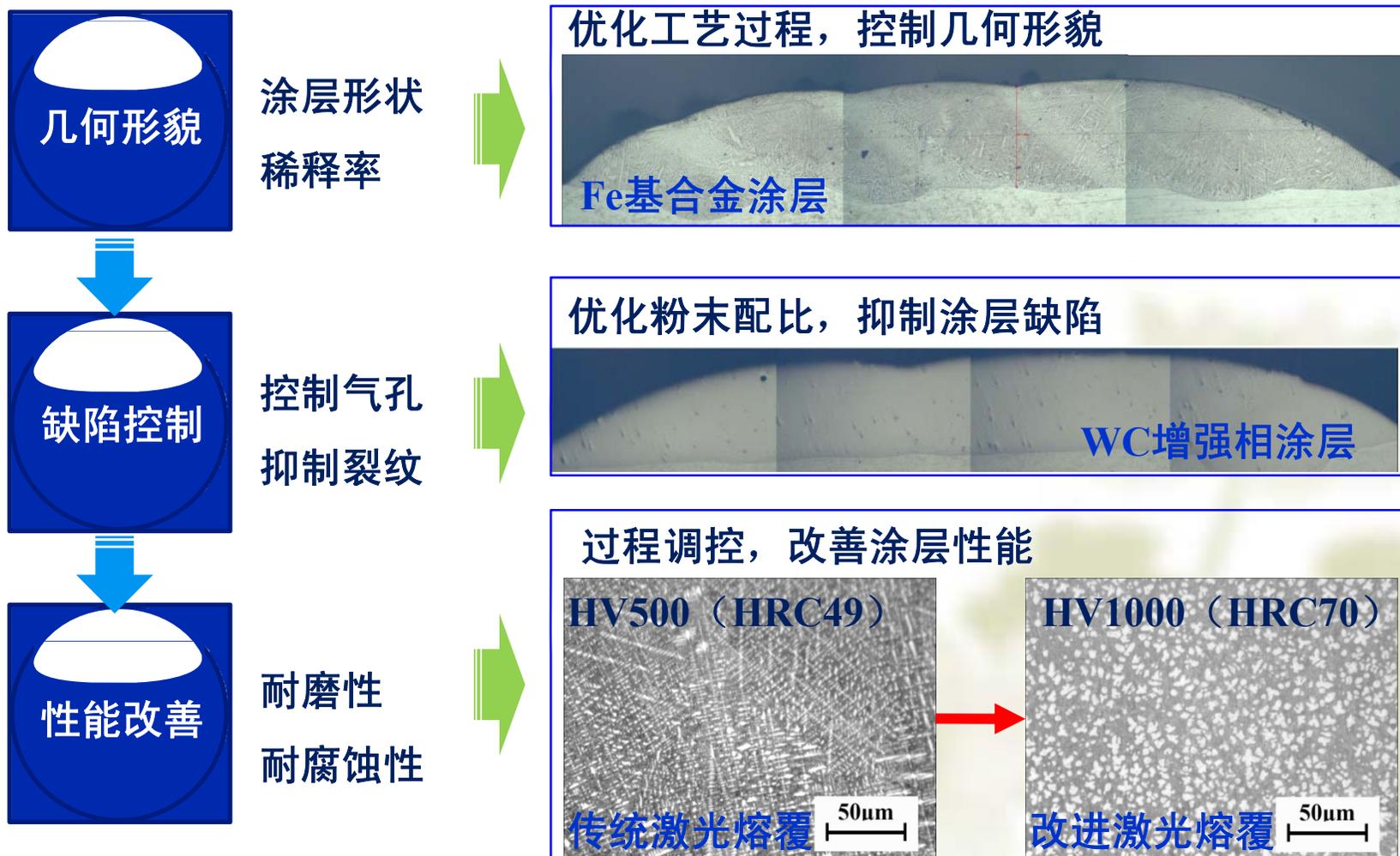
# 激光焊接应用研究



奇瑞新款SUV瑞虎自动变速箱焊接

# 激光熔覆应用研究

## 激光熔覆工艺



# 激光熔覆应用研究

## 护托支架液压立柱:

- 一个大中型煤矿，每年约5~10万根支护托支架液压立柱需要修复。
- 激光熔覆修复后，耐磨寿命是镀铬涂层的5~10倍。
- 节能、节材，且环保，带来巨大经济和社会效益。

修复前形貌



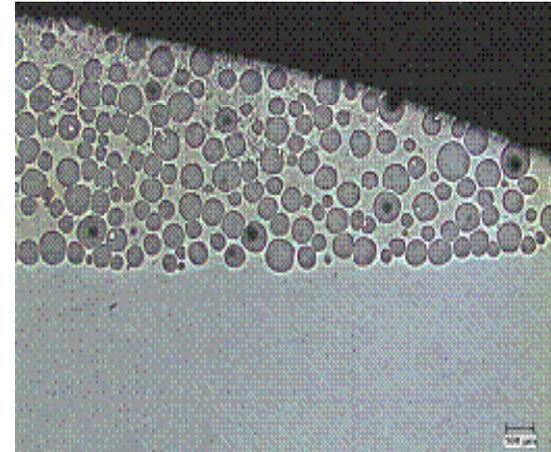
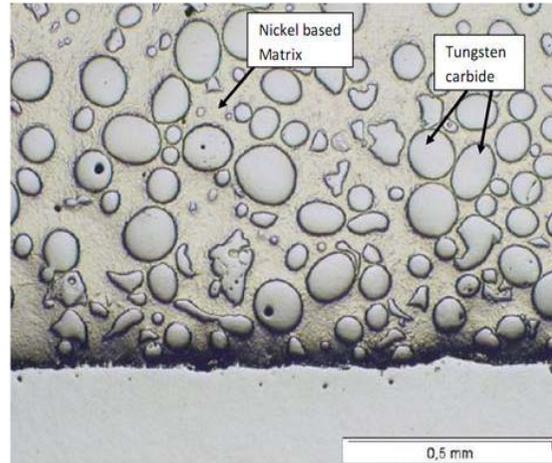
激光熔覆后形貌



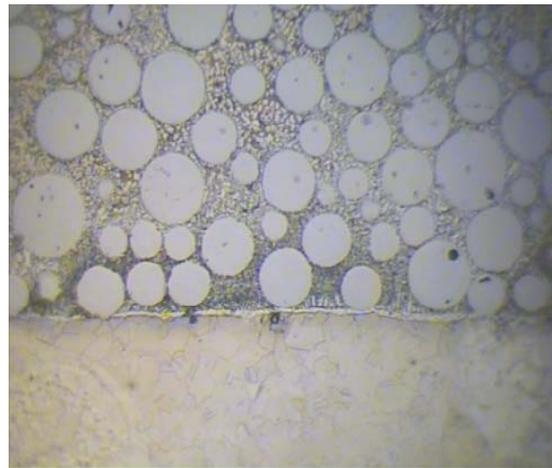
表面打磨后形貌



# 激光熔覆应用研究



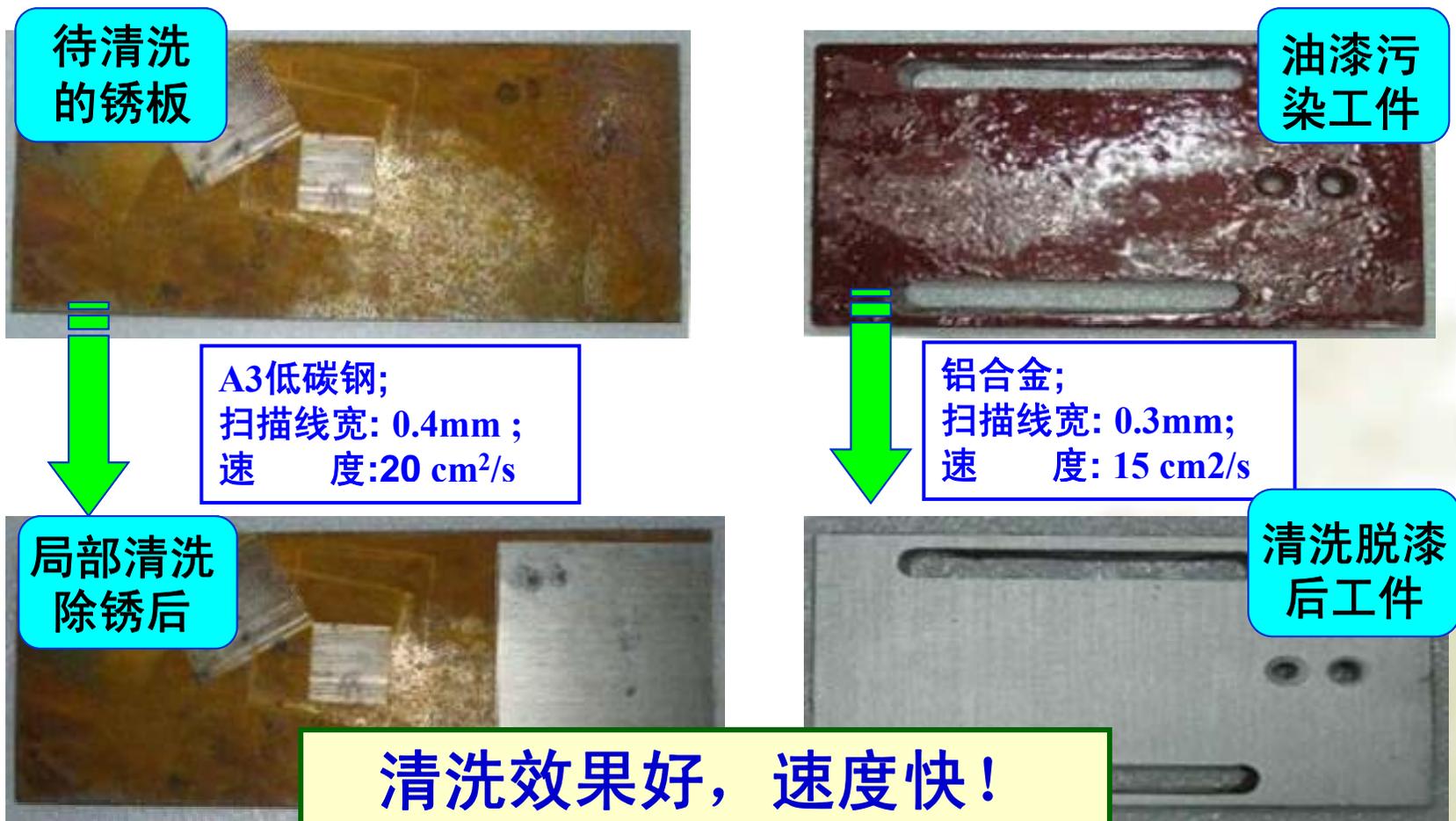
威德福熔覆层WC颗粒的分布情况（威德福）



自主研发的激光器的激光熔覆层WC颗粒的分布情况

美国石油装备商威德福转井部件（地下5000米使用）的激光熔覆

# 激光清洗应用研究



## 结束语

几十年后 { 先进制造业可能是最大的产业！  
中国经济可能是最强的经济！



取决于：

中国能否主导先进制造业？

A photograph of a desk in a bright, blurred office environment. On the desk, there is a clear plastic water bottle, a small green potted plant in a white pot, and several newspapers. The newspapers are open, and one has a headline about oil prices and peat cutting. The background shows a computer monitor and other office equipment, all out of focus.

谢谢！

敬请批评指正