光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2021年5/6月 第3期
ISSN: 1817-6917

激光世界
LaserFocusWorld® China



高功率工业级蓝光激光器拓展新应用领域 19

平顶激光束的优点与用途 12
空芯光纤实现了比石英光纤更低的传输损耗 15
888nm泵浦模块增强掺钕DPSS激光器的性能 16
可调模式光纤激光器成功实现铜焊接 22

ACT

ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

微信公众号



国际授权翻译
国内发行高新科技杂志

8本杂志免费送一年
（6期/印刷版）

包揽全年行业资讯

ACT

www.actintl.com

免费订阅

扫一扫添加
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际商讯（ACT International）成立于1998年，为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品－包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动－为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。 ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制等领域的约二十多万专业读者及与会者。

Think Precise

The next generation
Tunable Laser



全新 TSL-570

高速 扫描速度200nm/s、20kHz 可编程触发

高精度 亚皮米精度、亚皮米分辨率

高稳定性 可实现全波段无跳模及稳定的输出功率

高灵活性 触摸屏和以太网通讯

www.santec.com.cn

The world's first and most widely used tunable lasers

santec

The Photonics Pioneer since 1979



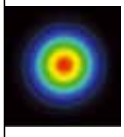
19 封面故事
蓝光激光器
高功率工业级蓝光激光器拓展新应用领域
不断的技术革新和产品巩固，正在为蓝光激光器开辟出新的应用领域，并且这一趋势极有可能在未来几年中进一步加速。

市场观察

8 工业级蓝光激光器，致力于打造一片新蓝海
工业级高功率蓝光半导体激光器，在输出更高的功率和更好的光束质量方面，不断创新；市场需求的增加，正在促使更多厂商开始逐鹿这片新蓝海。

技术中心

12 激光光学



平顶激光束的优点与用途
与高斯光束相比，平顶光束具有许多与应用相关的优势，本文将介绍如何最好地产生满足应用需求的平顶光束。

15 单模光纤



空芯光纤实现了比石英光纤更低的传输损耗
空芯光纤在传输性能上获得新进展，在600~1100nm波段，实现了比实芯光纤更低的传输损耗。

16 DPSS激光器

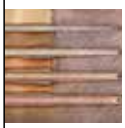


888nm泵浦模块增强掺钕DPSS激光器的性能
使用发射更长波长的888nm二极管泵浦模块，能极大降低DPSS激光器的热负载挑战，简化功率提升。

4 编者的话
5 前沿简讯
36 产品撷英
40 广告索引

工业激光专栏

22 铜焊接



可调模式光纤激光器成功实现铜焊接
具有高亮度中心光束的可调节环形模式（ARM）光纤激光器，成功实现了铜的高质量稳定焊接。

24 EUV光刻



使用小型极紫外系统制备纳米结构
使用紧凑型极紫外（EUV）光源和相对简单的工艺技术，可以制备出尺寸在28nm以下的周期性结构。

26 打标&雕刻



激光打标和激光雕刻是一回事吗？
如何区分激光打标和激光雕刻？本文介绍了区分激光打标和激光雕刻的三个注意事项。

29 激光雕刻



纳秒脉冲光纤激光提高激光雕刻的质量和效率
通过优化脉冲参数，纳秒脉冲光纤激光能雕刻铜、氮化铝（AlN）、碳纤维增强塑料等多种材料，在提高加工效率的同时保证雕刻质量。

访谈

33 ScanMaster一揽子激光焊接方案，为动力电池焊接保驾护航
—— 访问普雷茨特销售总监刘良明先生

34 突破2μm光纤激光器高功率限制，实现更多应用可能
—— 访光库科技常务副总经理兼工程副总吉贵军博士

关于《激光世界》
《激光世界》杂志创刊于 2005 年，是世界著名杂志《Laser FocusWorld》杂志的中文版本，也是在中国市场为激光与光电子行业的工程师、研究人员、科学家以及专业技术人员提供的专业期刊。《激光世界》的内容涵盖全球激光与光电子技术、工业与科研应用、市场信息以及中国本地市场的相关报道。
《激光世界》采用简体中文印刷，双月刊，每期发行量超过 9,500 册，面向激光与光电子行业内合格的读者群。同时，我们的电子杂志和网站将覆盖更广泛的读者群。
请查询本刊专业网站：www.laserfocusworld.com.cn。

扫一扫 免费下载电子书



19 COVER STORY

Industrial Blue Lasers

High-power industrial blue lasers expand into new applications

Continuous technological improvements and product maturity also open up applications in new areas, and it seems likely that this trend will accelerate over the coming years.

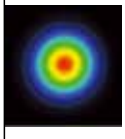
MARKET WATCH

8 **Industrial-grade blue lasers are dedicating to create a new Blue Ocean Market**

Industrial-grade high-power blue diode lasers are continuously achieving innovations in the output of higher power and better beam quality, and the increasing demands are prompting more and more players to compete in this new potential market.

TECHNOLOGIES CENTER

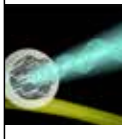
12 Laser Optics



Flat-top laser beams: Their uses and benefits

Flat-top beams have many application dependent advantages over Gaussian beams; learn how best to generate a flat-top beam for your needs.

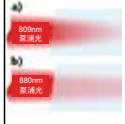
15 Single-Mode Fiber



Hollow-core fiber achieves lower transmission loss than the solid-core silica fibers

New progress has been made in the transmission performance of hollow core fiber, which can achieve lower transmission loss than solid-core silica fibers in the band of 600~1100nm.

16 DPSS laser



Enhance your Nd-doped DPSS laser with a longer-wavelength pump

Laser diode pump modules emitting in a longer wavelength window dramatically lower the thermal load challenges in DPSS lasers, simplifying power scaling.

4 EDITOR'S NOTES

5 LEADING EDGE SNAPSHOTS

36 PRODUCTS HIGHLIGHTS

40 AD INDEX

INDUSTRIAL LASER COLUMN

22 Copper Welding



Adjustable-Mode fiber lasers successfully weld coppery

A new type of Adjustable Ring Mode (ARM) fiber laser having a high-brightness center beam successfully achieves high quality and stable welding of copper.

24 EUV Lithography



Making nanostructures with a small EUV system

Periodic structures down to 28 nm can be produced using a compact EUV source and relatively simple process technology.

26 Marking & Engraving



Are laser marking and engraving the same thing?

How to distinguish between laser marking and laser engraving? Learn the three things you should know that set laser marking and laser engraving apart.

29 Laser Engraving



Laser engraving plays to strengths of nanosecond pulsed fiber lasers

Nanosecond pulsed fiber laser technology optimizes pulse characteristics for quality and productivity of many materials such as copper,aluminum nitride(AIN) carbon-reinforced plastics and so on.

INTERVIEWS

33 **ScanMaster one-stop laser welding solutions to ensure power battery welding quaility**

—Interview with Mr. Liu Liangming, Sales Director of Precitec

34 **Breaking through the high power limit of 2μm fiber laser and realizing more application possibilities**

—Interview with Dr. Ji Guijun, executive vice general manager and vice president of engineering of Advanced Fiber Resources (AFR)

About Laser Focus World China

Published since 2005, Laser Focus World China, the Chinese editionof the world famous Laser Focus World magazine, is the professional magazine for engineers, researchers, scientists, and technical professionalsin China. It provides comprehensive global coverage of optoelectronictechnologies, industrial and R&D applications, and market information. The editorial content licensed exclusively from Laser Focus World magazine is supplement by content generated by our own editors in China.

Laser Focus World China is published every other month in simplified Chinese and distributed to over 9,500 qualified optoelectronics professionals in China. Through our digital magazine and website we provide coverage to an even larger audience base. Please visit our relevant website, www.laserfocusworld.com.cn.

Laser Focus World China, ISSN 1817-6917 is published bi-monthly by ACT International, Unit B, 13/F, Por Yen Building, No. 478 Castle Peak Road, Cheung Sha Wan, Kowloon, Hong Kong, under the license of PennWell Corporation, 1421 S. Sheridan Road, Tulsa, OK 74112. Copyright 2010. All rights reserved. This publication contains article reprinted from Laser Focus World magazine. Laser Focus World is exclusively owned and published by PennWell Corporation. PennWell Corporation is not responsible in any way for the editorial policy and expressly disclaims responsibility for, and makes no warranties, express or implied, with respect to the content of this publication or the performance or reliability of products described herein that are products described by independent vendors.

激光，不断开拓更多应用可能

人类永远不会停止探索的脚步，致力于开发并利用激光技术的同人们，始终在探索更广泛的输出波长。目前红外波段的激光技术已经相对成熟且应用广泛，而在可见光波段除了红光之外，其他的绿光、蓝光等激光技术，仍然有着巨大的潜在发展空间等待人们去开发探索。

在当前新基建大环境的发展之下，5G、新能源、半导体、电子制造、数据通信等信息技术大力发展，市场对铜加工的需求大幅增加，尤其是在动力电池制造领域，涉及到大量的铜焊接环节。

铜自身的物理属性，使其对红外光的吸收率较低，使用红外激光焊接铜会产生大量飞溅，而且工艺过程相当不稳定。相比之下，铜对蓝光的吸收率大大增加，整个焊接过程实施起来，也相对容易，能够实现更好的焊接质量。因此市场对于蓝光产品的需求大幅增加。但是蓝光产品由于受到激光产生机理和材料等诸多方面的限制，目前在付诸实际应用方面仍然存在一定的挑战，比如功率相对较低。

在本期的封面故事中（p19），专门致力于蓝光半导体激光器开发的 Nuburu 公司，介绍了蓝光半导体激光器在功率和光束质量方面取得的最新进展，以及它们在 5G 通信、可再生能源、3D 打印等行业所开辟出的应用新天地。另外在本期的工业激光专栏中，我们还精选了一篇利用“具体高亮度中心光束的可调节环形模式光纤激光器”，成功实现铜的高质量稳定焊接的文章（p22）。

在本期的工业激光专栏中，我们还为读者精选了两篇有关激光打标和激光雕刻方面的文章。通常，我们习惯性地认为，激光打标和激光雕刻之间好像也没什么区别，都是在物体上标记符号，但它们真的是一回事儿吗？我们到底该怎么区分它们、怎么选择使用它们呢（p26）？在激光雕刻应用方面，还详细介绍了如何通过调整纳秒脉冲光纤激光器的参数，实现铜、氮化铝、碳纤维增强材料等多种材料的雕刻，同时确保雕刻质量和雕刻效率（p29）。

在本期的技术中心栏目中，我们介绍了平顶光束相对于高斯光束的优势，以及如何产生满足应用需求的平顶光束（p12）。在使用空心光纤传输光束方面，也获得了新进展，空心光纤在 600~1100nm 波段，实现了比实芯光纤更低的传输损耗（p15）。再 DPSS 激光器的泵浦方面也有新进展，波长为 888nm 的二极管泵浦模块，能极大降低 DPSS 激光器的热负载，提升功率（p16）。

激光技术仍然在不断迎接挑战，拓展自身的技术疆域和性能，并作为一种先进的加工工具，在各类应用中扮演着重要角色。❑

本刊编辑部

激光世界
LaserFocusWorld® China

中国/香港特别行政区 China / Hong Kong SAR
电话 (852) 2838 6298
传真 (852) 2838 2766
地址 香港九龙长沙湾青山道478号
百欣大厦13楼B室
出版总监 麦协林 Adonis Mak
电邮 adonism@actintl.com.hk
社长及副总裁 麦协和 Mark Mak
电邮 markm@actintl.com.hk
中国区总经理 徐旭升 Michael Tsui
电邮 michaelt@actintl.com.hk
中国版主编 庞会荣 Rossie Pang
电邮 rossiep@actintl.com.hk
记者 胡婴 Lily Hu
电邮 lilyh@actintl.com.hk
记者 陈玉婷 Julie Chen
电邮 juliec@actintl.com.hk
技术顾问 顾正

免费赠阅咨询
电话 (86) 755-2598 8573
(86) 755-2598 8567
传真 (86) 755 2598 8567
电邮 circulation@actintl.com.hk

特约编辑
In My View Jeffrey Bairstow
电邮 inmyview@yahoo.com
Industrial Lasers David A. Belforte
电话 (1) 508-347-9324
电邮 dbelforte@endeavorb2b.com
Valerie Coffey
电话 (1) 978-263-4485
电邮 stellaredit@gmail.com
Photonic Frontiers Jeff Hecht
电话 617-965-3834
电邮 jeff@jeffhecht.com
Imaging Conard Holton
电话 (1) 603-891-9161
电邮 cholton@pennwell.com
Europe D. Jason Palmer
电话 (44) 7960 363308
电邮 djasonpalmer@gmail.com

尖端技术部市场总监 Adrienne Adler
美术编辑总监 Suzanne Heiser
高级绘图 Chris Hipp
制作经理 Sheila Ward
广告协调员 Steve Archer
客户开发经理 Debbie Bouley

ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

尖端技术部通讯与光电子分部
副总裁 / 集团出版人 Alan Bergstein
电话 (1) 603-891-9178
电邮 alanb@endeavorb2b.com
副出版人/总编辑 John Lewis
电话 (1) 603-891-9320
电邮 jlewis@endeavorb2b.com
高级编辑 John Wallace
电话 (1) 603-891-9228
电邮 jwallace@endeavorb2b.com
高级编辑 Gail Overton
电话 (1) 603-305-4756
电邮 goverton@endeavorb2b.com
管理编辑 Lee Dubay
电话 (1) 603-891-9116
电邮 ldubay@endeavorb2b.com

公司行政人员
主席 Frank T. Lauinger
总裁兼行政总监 Robert F. Biolchini
财务总监 Mark Wilmoth

尖端技术分部
读者服务主任 Debbie Bouley

地址 Laser Focus World, 61 Spit Brook Road, Suite 501, Nashua, NH 03060
电话 (1) 603-891-0123
网址 www.laserfocusworld.com

ISSN 1817-6917
© 2021 版权所有 翻印必究

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

软 X 射线自由电子激光装置实现“水窗”波段全覆盖

上海软 X 射线自由电子激光装置调试工作连续取得突破性进展，先后 在 5.6nm、3.5nm、2.4nm、2.0nm 波长实现自由电子激光放大出光，实现了“水窗”波段全覆盖，并在 3.5nm 实现饱和，输出峰值功率超过 500MW，X 射线贯通光束线到达实验站。



软 X 射线自由电子激光可以在物理、化学、生物、物质、材料等领域进行非常前沿的科学研究和实验。X 射线自由电子激光足够“快”，可用于活体生物细胞的显微成像等，具有重要的科学应用价值。

“水窗”是指波长在 2.3~4.4nm 范围的软 X 射线波段，在此波段内，水对 X 射线是透明的，但其他构成生命的重要元素，例如碳仍会与 X 射线相互作用，因而水窗波段的 X 射线可用于活体生物细胞显微成像等，具有极其重要的科学应用价值。在水窗波段，自由电子激光的峰值亮度比同步辐射高十亿倍以上，且同时具备横向和纵向相干性，能够为物理、生物、化学等学科提供革命性的研究工具。

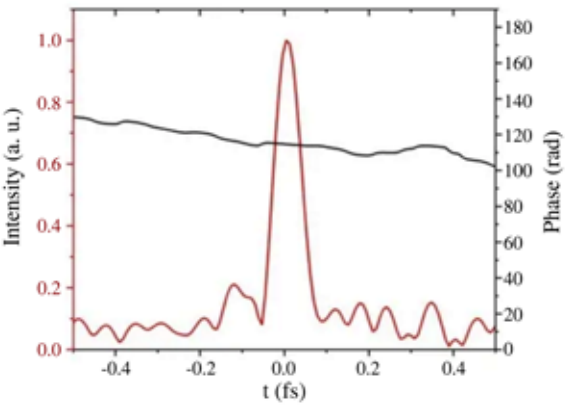
SXFEL 装置是我国第一台 X 射线相干光源，整个装置的研制分为试验装置和用户装置两个阶段进行，其最终目标是建成波长覆盖水窗波段的高亮度软 X 射线自由电子激光光源，并为首批 5 个实验站供光。❑

西安光机所阿秒脉冲产生与测量研究取得新进展

西安光机阿秒科研团队研究工作取得新进展，实验上获得了 75as 的阿秒光脉冲产生与测量结果，这也是国内阿秒光学领域的最新进展。

阿秒光源有望以高速摄影的方式，把物质内部原子尺度上电子运动的物理图像，以“慢动作”的形式再现，从而能以极高的时间分辨能力揭示电子动力学特性，为物理、化学、生物、材料、信息等领域的发展提供全新研究手段和重要创新机遇。追求更短的阿秒脉冲一直是阿秒光学的重要发展方向。

2017 年，西安光机所阿秒团队采用双光子跃迁干涉重构阿秒拍频方法，实现了阿秒脉冲序列 282as 的脉宽测量结果。2019 年，采用自主研制的高能量分辨阿秒条纹相机，获得 159as 的孤立阿秒脉冲结果。近期，团队在已有研究的基础上，继续优化阿秒脉冲产生过程中的驱动光脉冲、光学选通门以及相位匹配参数，同时优化了阿秒条纹相机中飞行时间谱仪各参数，在成功获得阿秒脉冲条纹谱基础上，通过反演重构算法获得 75as 的阿秒光脉冲的测量结果。



鉴于阿秒光源在未来科技发展中的重大价值，研究团队加快开展了高性能阿秒光源的关键技术攻关。此次该所在阿秒脉冲产生与测量方面取得的新进展，将为我国未来阿秒光学研究奠定良好的基础。❑

长进激光在高性能特种光纤方面打破国外技术封锁

特种光纤因其特殊的产品性能，在市场上有着极强的不可替代性，是诸多下游产品的核心元件，被广泛应用在通信、加工、医疗、航空航天、石油化工等领域。与传输光纤相比，特种光纤的制备工艺更加复杂，主要体现在特种光纤是由各种稀土离子掺杂，一般用于特定波长，其纤芯基质、结构设计、工艺、光学性能和环境特性都很特殊。目前，国产特种光纤主要包括 1.0μm 掺镱光纤、1.5μm 掺铒光纤和铒镱共掺光纤、2.0μm 掺铥光纤、保偏有源光纤、大模场低 NA 有源光纤，以及抗辐照保偏有源光纤等。

为了进一步解决高功率光纤中的非线性效应和 MI 阈值低的问题，武汉长进激光技术有限公司研发出了多种单锥型及双锥型光纤，同时能够保持高光束质量。锥形光纤通过改变芯包比，来匀化有源光纤热负载，以提升光纤的模式不稳定阈值，同时通过渐变增大纤芯尺寸来提高受激拉曼散射和受激布里渊散射阈值。其中光纤芯包比和锥区比可定制。

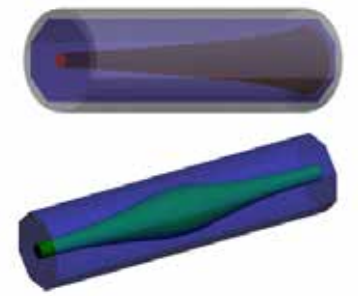


图1：单锥光纤及双锥光纤结构图。

在高功率窄线光纤应用中，需要保偏光纤来实现线偏振激光放大，长进激光在普通 20/400 掺镱光纤的基础上，研发出具有高双折射系数的有源保偏光纤及相关的匹配无源光纤。该光纤具有高光束质量、高斜率效率及良好的保偏性能，达到进口光纤水平，可用于窄线宽放大、光谱合束等高功率光纤激光系统中。

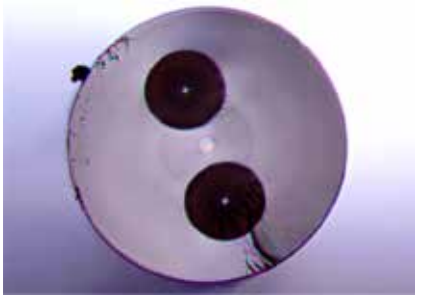


图2：20/400保偏掺镱石英光纤截面图。

目前，国内仍有部分特种光纤预制棒仍依赖进口。针对国内特种光纤领域急需突围的现状，长进激光与华中科技大学等研究机构和包括锐科、杰普特等国内优秀激光器厂商达成合作，共同应对技术挑战，实现更高程度的技术自主。❑

厦门大学在片上集成超快激光源研究中取得重要进展

厦门大学电子科学与技术学院罗正钱教授团队与麻省理工学院（MIT）胡崛隽教授课题组紧密合作，在片上集成超快激光源的研究中取得重要进展。

伴随着摩尔定律接近饱和，业界开始逐渐转向光电集成芯片甚至全光芯片，来实现更低的能耗以及更快的工作速度，集成光子芯片被认为是有望打破国外“卡脖子”、实现“弯道超车”的关键技术。

在硅光子产业体系中，片上集成光源具有特殊的无可替代的地位。集成激光源拥有成本低、体积小、功耗低等优点，已广泛应用于数据中心的光信号处理、自动驾驶的激光雷达、国防工业的相控阵列成像、精密测量、光谱学和传感等领域。

目前，片上集成超快激光源（产生皮秒 / 飞秒激光脉冲）仍不成熟，通常采用微谐振腔的克尔光频率梳、键合式锁模光波导技术，要求严格的精密控制或复杂制备工艺等，限制其发展。罗正钱课题组提出利用 Ge28Sb12Se60 硫系波导易于硅基集成、超强光学非线性和灵活色散调控的优势，结合拉曼孤子自频移技术，首先数值模拟探索了片上硫系波导拉曼孤子产生的可行性，进而与 MIT 团队合作制备 Ge28Sb12Se60 硫系片上波导，实验上首次实现了单片集成的拉曼飞秒孤子激光源。拉曼孤子激光可在 1589~1807nm 波长范围内连续可调谐（调谐范围超过 200nm），脉冲宽度短至 185fs，尤其是产生拉曼孤子的泵浦脉冲能量阈值低至 1.08pJ，比传统光纤拉曼孤子的产生阈值低三个数量级，充分体现了片上集成超快光源的低功耗优势。❑

华快光子推出 GHz 级超高重频 NALM 型全光纤飞秒种子源

华快光子已成功研发并推出了重复频率 30~200MHz 的飞秒种子源系列产品。近期在高重复频率飞秒种子源研发及工程化方面又取得了突破性进展，已成功实现重复频率接近 1GHz 的全光纤化飞秒种子源。

该系列高重频飞秒种子源产品采用带偏置的改进型非线性放大环形镜（NALM）方案，由相移器、光纤环路及波分复用器等元件构成，环内有高掺杂的掺镱光纤作为光纤激光器腔内的增益介质，泵浦光通过波分复用器泵浦掺镱光纤。

为保证在环境温湿度变化时保持稳定的功率和稳定的光偏振状态，采用锁模全保偏光纤，实现锁模稳定自启动的同时，保证锁模脉冲的长期稳定一致性。根据所需的脉冲重复频率，得到合适的腔长，通过集成光纤元件将腔长极限压缩，同时设计增益光纤和普通光纤的最佳长度，达到超高重复频率的基频飞秒锁模脉冲输出。

通过对谐振腔的色散进行管理，调控腔内相位差和光纤长度，实现脉冲重复频率和带宽的优化，获得飞秒脉冲输出，极限变化脉宽小于 100fs。锁模脉冲的光谱宽度决定了最终能够压缩得到的飞秒脉宽，而重复频率的高低则影响着工业加工的速度和效率。

本产品通过引入相位偏置对原有的 NALM 锁模技术进行改进，在腔内引入色散补偿，保证锁模自启动稳定性的同时，极大地提高锁模脉冲的光谱宽度，同时利用自主研发的新型集成封装的光纤器件，极大缩短谐振腔的腔长，获得了极高的锁模脉冲重复频率（500MHz~1GHz），输出功率 90~200mW，光谱宽度大于 15nm，极限变换脉宽小于 100fs，满足后期飞秒啁啾脉冲激光放大的输入需求。❑

国产单纵模光纤激光器实现 280mHz 线宽超稳激光输出

中科院安徽光机所毛庆和研究员课题组，研制了可用于超稳腔 PDH 稳频技术获取超稳激光输出的自由运转分布 Bragg 反射（DBR）单纵模光纤激光器。通过优化激光器腔结构参数，辅以绝热封装和精密温控等措施，并在腔内设置可快速宽范围调谐激光频率的压电陶瓷（PZT），实现了输出功率 45mW、线宽 1.2kHz、PZT 频率调谐范围和调谐带宽分别大于 3.2GHz 和 10kHz 的稳定单纵模激光输出。

为评估光腔 PDH 稳频技术对光纤激光器频率锁定的效果，研究人员通过两台稳频后的激光器进行拍频，测量获得稳频光纤激光器的性能参数。经测试，超稳腔 PDH 稳频后的 DBR 光纤激光器频率漂移小于 ±10Hz，1s 和 100s 的频率不稳定度分别达 6×10^{-16} 和 8×10^{-15}，频率噪声降低至 $8\times10^{-3}Hz^2/Hz$@1~10Hz，激光线宽窄至 280mHz。

该单纵模光纤激光器已能用于构建亚赫兹线宽超稳激光光源，推动了我国自主超稳光纤激光器核心技术与器件的发展。❑



工业级蓝光激光器致力于打造一片新蓝海

工业级高功率蓝光半导体激光器，在输出更高的功率和更好的光束质量方面，不断创新；市场需求的增加，正在促使更多厂商开始逐鹿这片新蓝海。

文/LFWC

自从 1960 年第一台红宝石激光器诞生以来，在过去的 60 年中，虽然激光技术的发展并不像半导体行业那样日新月异，但是激光技术也从未停止突破创新的步伐。回顾激光技术的发展历史，从最初的 Nd：YAG 激光器，到曾经的工业级大功率应用的主力军二氧化碳（CO_2）激光器，再到外观体积更加小巧紧凑的半导体激光器，以及后来在 2000 年电信泡沫这个乱世时期，发展起来的光纤激光器，业界始终在探索如何将激光作为一种合适的工具，去满足不断发展的各类应用需求，并且也在不断地用新技术取代某些老旧的技术。

最近，蓝光半导体激光器正在作为一股新势力悄然发展，它凭借着波长短、衍射效应小、能量高等特性，在材料加工、光信息存储、显示技术、通信技术、激光医疗等领域，对蓝光激光器涌现出了大量需求；反过来，市场需求也在不断促使蓝光半导体激光器在性能方面不断发展。预计在未来几年中，蓝光半导体激光器将会开辟出更多新的应用领域，当然也会有更多的厂商参与进来形成一个大家共同追逐的新的蓝海市场。

蓝光的特性及市场需求

蓝光半导体激光器的输出波长通常在 400~500nm 范围内，处于光谱中的蓝光波段。相比于红外波段的非可见光，蓝光激光有一个非常显著的特征，那就是一些有色金属材料对该波段的光有着较强的吸收。最具代表性的一种材料就是铜，铜等高反材料对蓝光的吸收率比对红外光的吸收率高将近 20 倍。

换句话说，要焊接同样的铜材料，使用蓝光所需要的激光功率，要远远低于使用红外光所需要的功率。实验对比数据显示，与红外激光相比，蓝光激光器在铜的焊接上所需的能耗比红外激光器低 80% 以上。举个例子来说，焊接同样的铜材料，如果使用红外激光器需要 10kW 的功率的话，那么使用蓝光激光器，仅需要大约 1kW 或 0.5kW 的功率。

此外，由于铜对红外光的吸收率低，使用传统的红外激光器焊接铜等高反材料时，容易产生飞溅及气泡，焊接质量很难保证。相比之下，铜对蓝光的吸收率更高，焊接过程更容易形成稳定的熔池，能很好的避免飞溅和气泡，所以能够实现的焊接质量自然更胜一筹。

铜材料可以说是遍布于日常生产的各个领域，从电子产品制造到马达电机，再到目前发展得如火如荼的新能源动力电池制造，都离不开铜这种优异的导电材料；在这些产品的制造过程中，都涉及大量的铜焊接工艺，尤其是动力电池制造中需求量极大。

除了铜焊接应用外，蓝光激光还可以优化激光熔覆和激光金属沉积（LMD）机器的性能。蓝光可以将铜材料包覆到其他铜表面上，形成保护膜或者是实现修复功能。由于铜对蓝光的吸收率高，因此在打印速度上也会明显加快。

尽管蓝光半导体激光器已经成为业界关注的新焦点，但是它们在性能的发展上依然面临很多困难，吸引着人们去不断挑战，提升性能以满足应用的需求，比如实现更高的功率。

众多厂商逐鹿蓝光市场

参与到蓝光半导体激光器领域的厂商愈来愈多，在业界的共同努力下，蓝光半导体激光器的性能也在不断提升。

Nuburu 公司成立于 2015 年，专门致力于工业级高功率蓝光半导体激光器的开发，其在蓝光技术方面也相对领先。AI-1500 是 Nuburu 近期新推出的一款里程碑式的蓝光激光器，它在 1500W 的高功率下，实现 11mm-mrad 的光斑质量（BPP），高亮度阈值使其能够配合振镜系统使用。使用振镜系统可以最大程度地保证工件表面聚焦光斑的均匀性。Nuburu 的友商振镜测试结果显示，AI-1500 能在



图1：AI-1500在1500W的高功率下，实现11mm-mrad的光斑质量（BPP）。（图片来源：Nuburu）

320mm 的焦距位置，保持 450um 的光斑直径，扫描范围可覆盖 110mm×110mm。

AI-1500 在性能上的提升开辟出了一些新的应用市场。比如，用于高器件密度的电路加工、可再生能源行业中氢燃料电池焊接，以及 LMD 激光增材制造等工艺中。

Laserline 近期对其输出波长 450nm 的 LDMblue 高功率蓝光激光器的聚焦性能进行了优化。其中 LDMblue 300-20 和 LDMblue 800-20，能够实现 20mm-mrad 的光束质量，输出功率课高达 800W；LDMblue 1500-30 能在 1500W 的输出功率下，将光束质量从之前的 60mm-mrad 提升到 30mm-mrad，即将相同功率下的光束质量改进为原来的两倍。

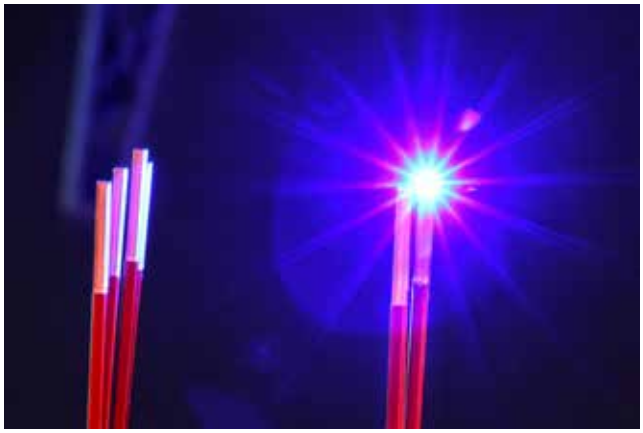


图2：Laserline大幅改进了LDMblue蓝光半导体激光器的光束质量，使其更加适用于铜焊接。（图片来源：Laserline）

光束质量的提升，将实现更小的光斑直径，从而可以实现极薄的铜片触点的精密加工，获得非常窄的焊缝。改进的光束质量还能实现更大的工作距离，并简化扫描焊接应用。

目前，Laserline 目前课提供功率在 300~2000W 之间的 6 种功率的蓝光产品，这些激光器主要用于电子工业中

炬光科技
BEAM RAZOR™ 905NM
线光斑激光光源LE02

产品特色
· 峰值功率>600W
· 905nm波长
· 快轴准直发散角<0.15°
· 激光脉冲宽度<5ns

主要应用
· 车载激光雷达
· 智能3D感知
· 工业感知
· 机器视觉

LE02尺寸
55mm*38mm*14mm

信用卡尺寸
86mm*55mm

搭载炬光科技BeamRazor™ 905nm
线光斑激光光源的激光雷达*

激光雷达点云图*

*来自合作伙伴探维科技

FOCUSLIGHT
Never stop exploring
LIMO
A Focuslight Company

电话：029-89560050
网站：www.focuslight.com
邮箱：sales@focuslight.com

的铜材料加工。此外，LDMblue 蓝光激光器也已经成功应用于有色金属涂层工艺，目前它们也正在海上应用和高功率照明技术中进行测试。从长远来看，将有望实现 5kW 的功率输出。

北京凯普林也在紧锣密鼓地开发蓝光半导体激光器。据悉，凯普林仅历时四个月，就成功研发出了国内首款功率 1kW 的高亮度蓝光激光器。这款产品，是通过将 48 个发光点的输出，最终耦合到一根输出光纤中实现的，其中激光合束环节是关键。凯普林表示，蓝光合束的关键在于根据输入光源的光纤类型及光斑占比，完成光纤束参数设计及拉制，而输出光纤的特殊处理和光纤束与输出光纤熔接技术，确保了在实现高效率耦合的同时很好地控制发热现象。凯普林凭借自身在半导体激光器光纤耦合方面的先进技术和丰富经验，最终通过 330μm 芯径实现了 1kW 的蓝光输出。

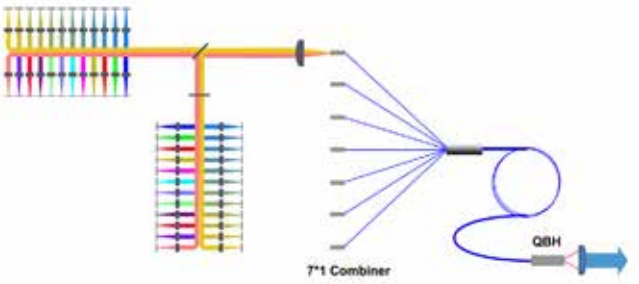


图3：48个发光点的光斑紧密排列耦合进入105μm的细芯径内。(图片来源：凯普林)

此外，高功率蓝光激光器通过选配自主研发的蓝光专用激光输出头，很好地解决了端面损伤、膜层损伤及抗回返设计等问题，最终确保产品具备高性能与可靠性。

广东粤港澳大湾区硬科技创新研究院（简称“硬科院”）在今年 3 月的上海光博会上，推出了自主研发的 1000W 工业级蓝光半导体激光器。据介绍，硬科院的蓝光激光器采用了业内首创的”自由空间输出+细光束矩形光斑+高填充面阵光束“的结构，集高功率、小尺寸、轻重量等特色于一身，可靠性高，稳定性强，简化维护。

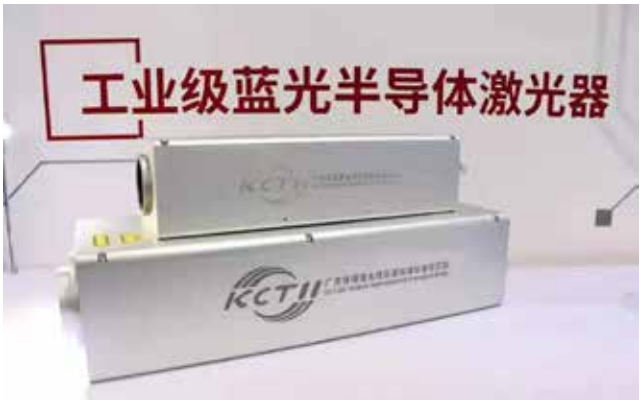


图4：硬科院自主研发的1000W工业级蓝光半导体激光器。（图片来源：硬科院）

蓝光激光器可用于新能源汽车制造中的汽车电池及零部焊接、磨损部件的激光熔覆修复、3D 打印以及海洋资源探测及水下通讯甚至是用于医疗领域治疗抑郁、失眠等疾病或者亚健康状 。此外，蓝光激光器也可以探测出最适宜的臭氧含量。

锐科激光也开始角逐蓝光市场，在近期推出了三款光纤输出的蓝光半导体激光器，输出功率分别 500W、1000W 和 1500W。其中 500W 的型号可用于厚度为 0.3mm 以下的紫铜薄板焊接，焊接效率更高，焊接效果更加精密。



图5：锐科激光的500W蓝光半导体激光器。（图片来源：锐科激光）

此外，锐科还将 500W 蓝光激光器和 2000W 的光纤激光器结合起来使用，用于焊接紫铜；与单独使用光纤激光器焊接的效果对比发现，在相同的焊接速度下，"半导体蓝光 + 光纤激光“复合焊的熔深更深，并且焊接过程无飞溅、无气孔，焊缝美观。

小结

经过了过去几年的发展，蓝光半导体激光器的功率已经有了大幅提升，从最初的几十瓦、几百瓦，发现到了现在的上千瓦甚至几千瓦，并且光束质量也在不断提升，能够聚焦的光斑的尺寸越来越小，这更加有利于各种高反金属材料的精细加工。

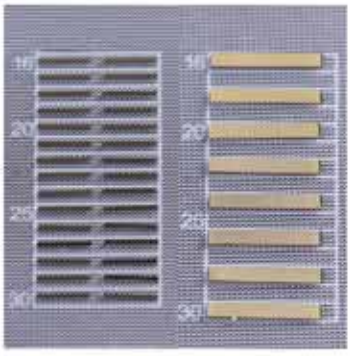
虽然相比于动不动就上万瓦的光纤激光器而言，目前蓝光半导体机器的功率还不够高，但是相信随着对蓝光半导体激光器领域的研发和生产的不断投入，蓝光产品在性能上仍会继续提升，并且也将会渗透到更多的应用领域，为激光应用开辟出一片新的蓝海。❑

EVERBRIGHT

深圳国际激光与智能装备、光电技术博览会
长光华芯展位：11-C022
6月29-7月1日
深圳国际会展中心

中国激光芯

光耀美好生活



高功率半导体激光芯片



VCSEL激光雷达芯片



高速光通信芯片

· 长光华芯已成功构建GaAs和InP两大材料体系，边发射和面发射两大结构工艺平台

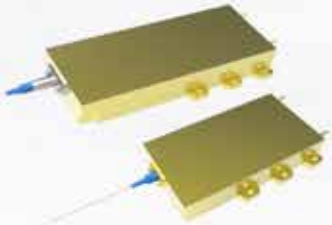
· 拥有外延设计和生长、芯片制备、封装测试等完整工艺平台

· 全系列产品拥有完全自主知识产权

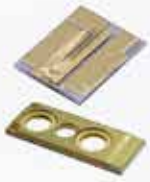
· 高功率半导体单管芯片最高功率达30W，巴条芯片最高功率（QCW）达1000W

· VCSEL激光芯片可提供TOF、SL、PS方案，效率达62%

· 广泛应用于工业加工、科研、生物医学、激光雷达、消费电子等领域



光纤耦合模块



器件



阵列



直接半导体激光器

苏州长光华芯光电技术股份有限公司
定制需求请联系：+86-512-6937 2570 sales@everbrightphotonics.com
ADD:江苏省苏州市高新区科技城昆仑山路189号2幢

激光光学

平顶激光束的优点与用途

与高斯光束相比，平顶光束具有许多与应用相关的优势，本文将介绍如何最好地产生满足应用需求的平顶光束。

文/ Kristina Kaszei，Cory Boone

尽管在某些应用中使用非高斯光束会有益，但是大多数激光束却具有高斯辐照度分布。高斯光束的辐照截面随着距中心距离的增加而对称地减小。相比之下，平顶光束（也称为礼帽光束）在光束横截面上保持恒定的辐照度值，从而在整个激光系统的目标上提供一致的强度（见图 1）。这在诸如半导体晶圆加工、各种材料加工，以及高功率光束的非线性频率转换等应用中，实现了更准确和可预测的结果。

与高斯光束相比，平顶光束可以在处理系统中产生更干净的切口和更锐利的边缘，但是产生平顶光束会增加系统的成本和复杂性。理解平顶光束轮廓的好处，以及产生平顶光束的不同方法，有助于激光系统集成商更好地了解哪种光束轮廓最适合其应用。

高斯光束的特性

高斯激光器比具有其他光束轮廓的激光光源更为常见，并且更具成本效益。大多数高质量的单模激光光源，都遵从低阶高斯辐照度分布（也称为 TEM_{00} 模式）发射光束。质量较低的光源也将具有某些程度的其他激光模式，但是人们通常假定激光束具有理想的高斯分布，以简化系统建模。

如果高斯光束和平顶光束具有相同的平均光功率，则高斯光束的峰值辐照度将是平顶光束的两倍。当高斯光束通过光学系统传播时，即使峰值或光束尺寸发生变化，也会保持高斯辐照度分布。这意味着高斯光束在变换下保持恒定。

高斯光束有什么问题?

高斯激光轮廓有几个缺点，例如光束可用中心区域任

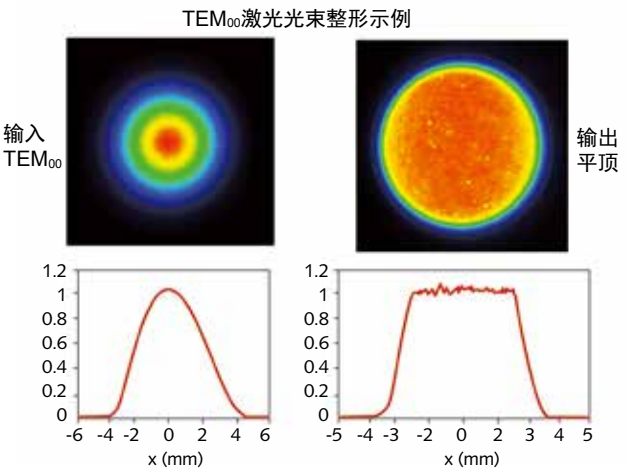


图1：具有高斯光束轮廓的激光束（左）和具有平顶光束轮廓的激光束（右）的实验辐照度轮廓。

一侧的低强度部分，称为“两翼”。这些两翼通常包含浪费的能量，因为其强度低于给定应用所需的阈值，这些应用包括材料加工、激光手术以及其他一些要求强度超过两翼强度的应用（见图 2）。

高斯光束的两翼也可能损伤目标区域以外的周围区域，从而扩展热影响区。这对于诸如激光手术和精密材料加工这样的应用而言，是非常不利的。在这种情况下，要优先考虑高精度和对周围区域的损伤最小化。由于这种影响，使用高斯光束形成的特征，将不会具有特别平滑的边缘，这显然会降低系统精度。

为什么要使用平顶光束?

与高斯光束相比，平顶光束轮廓中没有两翼，但具有较陡的边缘过渡，因此能量传输效率更高，并且热影响区更小。[2]

从图 2 中可以看出，与高斯光束相比，平顶光束的能

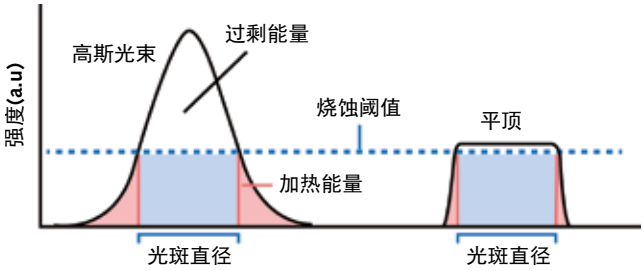


图2：对于许多应用而言，平顶激光束轮廓比高斯光束轮廓能更有效地利用能量。在高斯光束轮廓中，高于应用要求的强度阈值的过剩能量，和其外部或两翼中低于阈值要求的能量，都被浪费掉了。



图3：使用诸如爱特蒙特光学的AdlOptica πShaper平顶光束整形元件，通过波前畸变和能量守恒条件，将入射高斯光束折射整形为平顶轮廓。

量能够更清晰地包含在给定区域中。使用平顶光束刻蚀、焊接或切割的任何特征，都将更加准确，并且对周围区域的损伤也会减少。平顶光束的主要优点，使得它们能让各种不同情况下的应用都受益。在激光诱导损伤阈值(LIDT)测试和其他计量系统中，定义良好且一致的平顶光束辐照度轮廓，可以将测量不确定性和统计差异最小化。平顶光束在许多荧光显微、全息和干涉测量系统中，也同样具有应用优势。[3]

如何评估实际激光束与理想平顶轮廓的接近程度呢？一种方法是分析实际激光束的平坦因子（Fη）。正如ISO 13694 中所描述的，该因子是通过将平均辐照度值除以光束的最大辐照度值得出的。[2]

$$\text{平坦因子} = F\eta = \frac{(\text{平均辐照度 } (W/m^2))}{(\text{最大辐照度 } (W/m^2))}$$

平顶光束有哪些缺点?

平顶光束并非在所有情况下都是完美或理想的。它们不像高斯激光束那么具有成本效益，因为需要额外的光束整形组件，才能将激光器的高斯输出转换为平顶轮廓。该组件既可以直接内置在激光源中，也可以将它们放置在激光器外部的其他位置。

这些光束整形组件取决于输入光束的尺寸，并且对x-y

光学引领未来™



新品

2021 光学与
光电元件目录!

2021 全新加强版产品目录，内容丰富！ 460 页的篇幅涵盖 20,000 多款最优光学和光电组件产品信息！此份爱特蒙特光学（EO）核心产品目录专为光学行业编制！

免费电子版已同步上线!

关注公众号

爱特蒙特光学(深圳)有限公司
中国深圳市龙华工业东路
利金城科技工业园3栋5楼，518109
Tel: +86 (0755) 8435 5459 Email: chinasales@edmundoptics.cn

Edmund optics | china

欲了解更多信息，请点击此处:
www.edmundoptics.cn/051-8611

对准敏感。另外，与高斯光束轮廓不同，平顶激光束轮廓在变换下不会保持恒定。这意味着当光束传播通过系统时，入射的平顶光束轮廓将不会保持平顶形状。平顶光束轮廓最终将演化成类似于艾里斑分布的轮廓。

如何获得平顶光束？

当需要平顶光束轮廓、但系统受成本方面的严格限制、且性能不必非常高时，人们有时会使用孔径将高斯光束物理截断，以形成伪平顶轮廓。这样会切断并浪费高斯光束两翼中的能量，并且不会使光束的中心部分变平。这种方法在保持低成本为主要决定因素的情况下，可能会有用。

对于需要更有效地使用昂贵的激光能量的高性能系统，通常选择光束整形组件将高斯光束转换为平顶光束。有几种不同类型的光束整形组件，包括折射、反射、全息和衍射设计。折射光束整形组件使用场映射非球面透镜或自由曲面透镜，以及其他折射组件来操控光束的相位（见图 3）。它们得益于强度和平坦相前分布的均匀性。通过穿过伽利略或开普勒透镜组件中的光学元件，可以操控入射光束的幅值和相位。

在组件设计的范围内，此过程通常是高效的（效率>96%），并且与波长无关。产生准直平顶光束的折射光束整形器，对于全息和显微系统，特别是长距离工作的系统是有利的。

表1：典型光束整形技术的比较情况

	光束整形器类型		
	折射	衍射	光束积分器
整形原理	确定性的	确定性的	随机或准随机
随机波动	低	低	高
对准敏感度	低	高	高
输出光束均匀性	高	中-高	低
成本	高	中等	低
体积	大	小	小

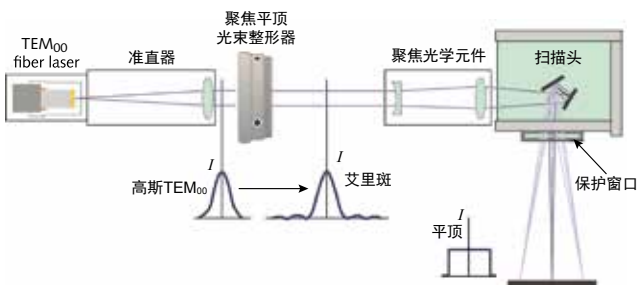


图4：一些折射光束整形器，例如AdlOptica Focal π Shaper Q平顶光束整形器，将入射的高斯光束轮廓转换为艾里斑轮廓，以便在聚焦到一个点后形成平顶轮廓。

一些其他类型的折射光束整形器，将输入的高斯光束轮廓转换为准直的艾里斑轮廓。这是有益的，因为在通过衍射极限透镜组件聚焦后，艾里斑轮廓形成了具有平顶轮廓的聚焦点（见图 4）。在包括微加工、光刻和微焊接在内的许多应用中，都希望在聚焦点具有平顶轮廓。[4,5]

另一方面，衍射光束整形器利用衍射而不是折射，来改变入射激光束的辐照度分布。蚀刻工艺在衬底中形成特定的微结构或纳米结构，从而形成衍射元件。元件和波长范围的效果，通常取决于结构的高度和区域间距。

因此，必须在设计波长处使用衍射光学元件，以避免性能误差。衍射光束整形器比折射设计更依赖于发散、对准和光束位置。但是，衍射光束整形器在空间受限的激光系统中特别有利，因为它们通常由单个衍射元件而不是多个折射透镜组成。衍射光束整形器既可以形成平顶光束，也可以形成艾里斑光束轮廓。

激光光束积分器，或者说匀化器，是光束整形组件的另一种类型。它们由多个小透镜阵列或小透镜组成，将入射光束分成较小的光束（或者说细光束）。然后，聚焦组件透镜将细光束叠加在目标平面上。

最终的输出轮廓通常是阵列中每个小透镜确定的衍射图样的总和。它们可以将入射高斯光束转换为均匀的平顶轮廓。

但是，这些系统通常会经历随机的辐照度波动，从而导致输出光束轮廓不是完美地平坦。表 1 中给出了不同光束整形技术的比较情况。在一些激光器系统中，精度和效率优先于最小化成本，平顶光束对于这类激光器系统都是有利的。通过当前市场上的折射、衍射和其他光束整形设计，激光器系统集成商在选择光束整形器时，有许多可用的选择。表 1 中提供了一些有用的经验法则，但在实际应用中，请与您的光学组件供应商联系，以在选择最佳光束整形器以充分利用您的激光系统方面，获得更多指导。❑

参考文献

1. A. Laskin et al., Proc. SPIE, 9887, 98872E (Apr. 27, 2016); doi:10.1117/12.2217927.
2. See iso.org/standard/72945.html.
3. M. Eryilmaz et al., Cancers, 10, 1 (Jan. 22, 2018); doi:10.3390/ cancers10010025.
4. Y.-J. Hung et al., J. Vac. Sci. Technol., 35, 3 (Apr. 11, 2017); doi:10.1116/1.4980134.
5. A. Laskin et al., Proc. SPIE, 9950, 995002 (Sept. 27, 2016); doi:10.1117/12.2235712.

单模光纤

空芯光纤实现了比石英光纤更低的传输损耗

空芯光纤在传输性能上获得新进展，在600~1100nm波段，实现了比实芯光纤更低的传输损耗。

文/Jeff Hecht

由英国南安普顿大学光学研究中心及其商业衍生公司Lumenisity生产的新型空芯光纤，[1]在制备性能上取得了新进展：用于在600~1100nm传输的空芯光纤，目前已经获得了比用于该波段的实芯光纤更低的传输损耗。这是首次获得如此重要的进展，因为即使是最好的实芯石英光纤的损耗，也高到足以限制某些应用的性能，比如限制激光功率传输、生物光子学、短程通信以及潜在的量子通信等应用的性能。

这种新型光纤基于南安普顿大学在2020年使用的嵌套式反谐振无节点光纤（NANF），它展示出了空芯光纤在1550nm电信波段，实现了0.28dB/km的创纪录的低损耗。[2]早在2019年报告的损耗值为0.62dB/km，最新的损耗值不到之前损耗的一半。[3]但是，在1550nm处的低损耗纪录值，依然是由实芯光纤保持的0.142dB/km。[4]

纯石英几乎不吸收可见光至大约1500nm波段的光，在波长短于1550nm的光传输中，瑞利散射是最主要的传输损耗。石英中的瑞利散射与波长的四次方成反比。为了最大程度地减少瑞利散射，NANF光纤在设计上进行了优化，目的是将光约束在光纤的中央空芯中（见图1）。六对平行嵌套的中空管沿着纤芯的外边缘排列，显示出负曲率，从而阻止了光线到达纤芯边缘。边缘之间留有空间，有助于将光限制在空芯内部，因此有非常少的光耦合到石英中，从而避免了光在石英中因为瑞利而导致衰减。

玻璃的瑞利散射系数，与玻璃的固化并冻结密度波动的温度成正比，因此对于具有高熔点的石英而言，其瑞利散射系数较高。从理论上说，硫系和多组分重金属卤化物玻璃的软化温度较低，因此它们应该具有低得多的瑞利散射；然而到目前为止，这类玻璃尚未通过实验获得较低的瑞利散射。因此，目前纯石英仍然是300~1700nm波段的传输光纤的最佳选择。

为了了解空芯光纤的性能，南安普顿大学团队针对三个关键的短波波长带（600~730nm，720~950nm和1000~1200nm）设计和制备了一些空芯光纤。他们测量了空芯光纤在上述所有三个波段的重要波长处的损耗，并与光在石英中的瑞利散射进行了比较。在660nm处，空芯光纤的损耗为2.85dB/km，相比之下，石英中的瑞利散射损耗为4~5dB/km。在接近850nm短距离通信频段的864nm处，空芯光纤的损耗为1.4dB/km，而石英中瑞利散射损耗为1.3~2dB/km。对于激光加工中经常使用的1064nm，空芯光纤的损耗为0.52dB/km，而石英中的瑞利散射损耗为0.6~0.8dB/km。所有三种光纤的3dB带宽均超过130nm。

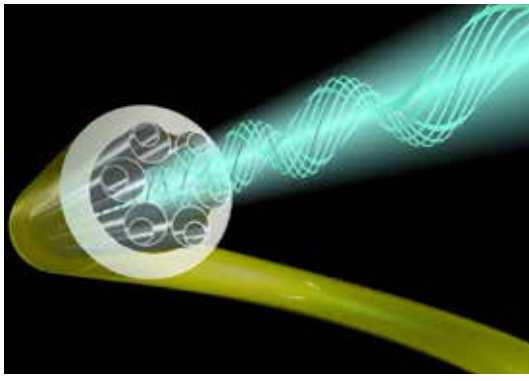


图1：空芯NA中的导光。（图片来源：南安普顿大学光学研究中心）

南安普顿大学团队负责人Francesco Poletti说：“NANF光纤已经实现了首次商业应用。”空芯光缆最直接的魅力是低延迟，因为它能以99.9%的真空光速传输光，比石英中66%的真空光速提高了50%。5G网络和数据中心传输，都要求低延迟，这都是空芯光纤的应用市场。

下转第21页

DPSS激光器

888nm 泵浦模块增强掺钕 DPSS 激光器的性能

使用发射更长波长的888nm二极管泵浦模块，能极大降低DPSS激光器的热负载挑战，简化功率提升。

文/Florian Lenhardt，Joerg Neukum

掺钕（Nd）晶体，例如 Nd：YAG 和 Nd：YVO_4，用于最早获得商业成功的固态激光器。在过去很长一段时间内，这些激光器中的晶体增益介质是由闪光灯泵浦的。因此，过去这些激光器的效率非常低，其中部分原因是闪光灯产生宽广的连续波长，而 Nd 离子的吸收光谱则由尖锐的谱带和谱线组成（见图 1）。结果，大多数泵浦光的能量都以热量的形式被浪费掉了，因此需要对晶体进行水冷。之后，寿命较长且功率可扩展的激光二极管的成熟，推动了二极管泵浦固态（DPSS）激光器的革命性发展。在 DPSS 激光器中，发射 808nm 波长的激光二极管作为泵浦源，以匹配了 Nd 的强吸收峰。

DPSS 激光器（通常是调 Q 输出）的可靠性和长寿命，已经支持了从制造医疗设备到集成电路封装的不断增长的工业应用。这些应用已经越来越依赖于近红外基频波长的二倍频和三倍频，以此来提供绿光和紫外输出，目的是优化微加工工艺。大多数 DPSS 激光器中都采用端泵方式。通过使用光纤耦合激光二极管，可以将激光二极管放置在远离激光腔的地方，从而简化了维护工作，并降低了激光头中的热管理。

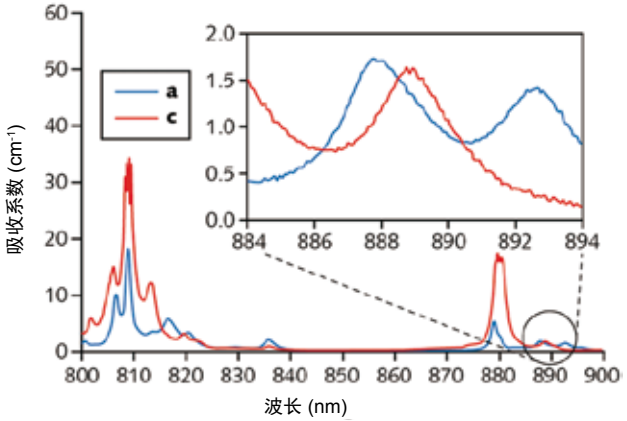


图1：Nd：YVO_4的近红外吸收光谱。多年来，激光器设计人员专门致力于泵浦808nm的强吸收峰。通常沿晶体的b轴泵浦，放大的单独图表示沿a轴和c轴的偏振光。

DPSS的热挑战

然而，激光晶体本身产生的热量，最终限制了端泵 DPSS 激光器在一些应用领域的发展，这些应用主要是需要更高功率和 TEM_{00} 光束的应用（良好的光束质量对于实现有效的二次谐波产生 /SHG 和三次谐波产生 /THG 至关重要）。例如，与激光二极管相比，以 808nm 泵浦的 DPSS 激光器效率低得令人惊讶。造成这种情况的一个重要原因是量子数亏损很大，即 808nm 泵浦光子与 1064nm Nd 输出之间的能量差。从技术上讲，808nm 泵浦使 Nd 以四能级激光器运作，本身效率低。此外，增益晶体中产生的这种过多热量，限制了能够通过流动水传导冷却晶体表面的晶体尺寸。此外，热累积会导致晶体中产生热透镜效应；而且，随着激光功率的变化而改变其聚焦特性（见图 2）。这损害了输出模式的质量，导致较低的 SHG/THG 效率，并限制了这些激光器在某些切割、钻孔和划线应用中，可以实现的精度和边缘质量。

产生的热量也位于泵浦输入面附近，由于泵浦光被强烈吸收，因此这也使得泵浦光渗透进入晶体的深度有限。通过从两端泵浦晶体的方式，能够在一定程度上减轻这种影响，不过这样做的代价是增加了系统的复杂性。尽管如此，典型的 DPSS 激光器使用的晶体长度只有 8mm 或更短，并且输出功率受到限制，只有在某种最佳功率水平下，其光束质量才可以接受。在越来越多的

应用中，这种性能会对加工吞吐量和材料厚度产生负面影响。

更低的量子亏损和三能级效率

市场对更高功率和高光束质量的需求，已经迫使激光器设计者重新考虑 DPSS 激光器的设计问题。目前市场上已经出现了这样一种解决方案：即在 880nm 附近这个相对较弱的吸收峰处，泵浦 Nd（见图 1）。具体来说，现在市场上能够提供的激光二极管泵浦模块，可以在三个“新”波长处泵浦 Nd，即 878.6nm、885nm 和 888nm。通过在封装的激光二极管模块中集成体布拉格光栅（VBG），可将波长锁定在目标值，从而不需要再对激光二极管的温度进行精确控制。所有这些长波长都比传统的 808nm 泵浦波长具有诸多优势，尤其是 888nm，还具有其他重要的与偏振相关的优势。

使用这些长波长的第一个优点是，与 808nm 泵浦相比，能将量子亏损显著减少 50% 以上。这个优势的直接结果是，由此而产生的多余热量也减少了 50% 以上。此外，

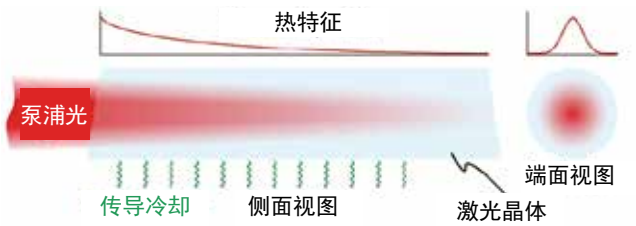


图2：端面泵浦可以提供更好的模式质量，但是由吸收光导致的热透镜效应，可能会成为获得更好光束质量的障碍。

该 DPSS 激光器现在能作为准三能级激光器运行，这在本质上要比 808nm 泵浦驱动的四能级系统更加高效。最为重要的是，更多的泵浦功率被转换为 DPSS 输出，因此需要管理的热量浪费更少。

更低的吸收和更大的泵浦体积

使用三个“新”波长泵浦 Nd 的另一项重要的效率优势是：因为 Nd 的吸收峰在 880nm 处比 808nm 处低得多；降低的吸收强度使得泵浦光可以更深入地渗透到增益晶体中（见图 3）。这样一来就增加了泵浦体积，即可吸收光的



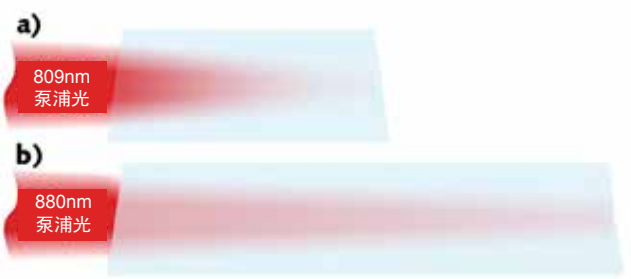


图3：Nd：YVO_4晶体吸收泵浦功率的深度取决于泵浦波长：用809nm泵浦短晶体，泵浦光的穿透深度较小（a）；用880nm泵浦长晶体，泵浦光的穿透深度较大，几乎穿透了整个晶体长度（b）。

体积，因此，这也使得晶体中产生不必要热量的体积减少了。

从图 3 中可以看出，使用 880nm 的长波长泵浦产生的热量更少，并且该热量散布在更大的体积上。因此，这种组合允许使用更长的晶体（例如 30mm），这些晶体也可以安全地以高功率泵浦，并且其热透镜效应更低，这样就能在更宽的输出功率范围内，提供更好的光束质量。因此，新一代的调 Q 输出 DPSS 激光器应运而生，特别是绿光和紫外光 DPSS 激光器，它们所提供的输出功率，为更好地探讨众多微加工应用提供了更多可能。

888nm是最佳泵浦波长

出于多种原因，激光晶体通常沿其 b 轴泵浦。对于 808nm 和 880nm 的泵浦光，在 a 轴和 c 轴上产生的吸收效果非常不同，并且当泵浦光沿着 c 轴偏振时，吸收会强得多，如图 1 所示。问题是光纤传输的泵浦光是自然非偏振的。因此，如果将来自光纤的泵浦光直接聚焦到晶体中，则不能针对泵浦功率和目标 DPSS 激光器工作特性，来完全优化晶体掺杂和晶体长度。

如果针对 a 轴吸收对晶体进行优化，那么将有一半的光会穿透到晶体中很深的部位。相反，如果针对 c 轴吸收对晶体进行优化，则会有一半的光将无法在晶体中穿透得足够深。为了解决这个难题，通常使用偏振立方分束器将来自光纤的光分开。具有“错误”偏振的 50%被传输到增益晶体的另一端，并使用波片将其偏振旋转 90°，以便所有泵浦功率以相同的强度被吸收。这种泵浦方案对由移动光纤引起的偏振变化非常敏感，这可能导致晶体中泵浦吸收程度的急剧变化，从而导致 DPSS 激光器的功率不稳定。

但是，在 888nm 处，晶体对于沿 a 轴和 c 轴偏振的吸收非常相似，如图 1 所示。此外，在 888nm 处，Nd 的吸收光谱随泵浦波长轻微变化。因此，泵浦光可以直接从光纤耦合到晶体中，而无需中继光学元件和波片，也不需要两端泵浦所需的重复聚焦和二向色光学元件。此外，888nm 泵浦方案对光纤移动的敏感性大大降低，甚至可以忽略不计。目前，相干公司可提供 888nm 泵浦模块。

在 888nm 处，吸收强度相对于微小波长变化的依赖性较弱，这具备另一项非常重要的好处：泵浦的主动波长锁定（包括严格的温度控制）对于稳定的 DPSS 输出不再至关重要。这样一来，就简化了激光器并降低了组件和组装成本。但是，使用集成 VBG 的被动波长稳定仍然是首选，因为这种方法可以将由于二极管驱动电流变化而引起的任何波长偏移减至最小，从而带来更宽的性能范围。最终结果是，DPSS 激光器的功率与 888nm 下的二极管驱动电流成线性比例关系。对于需要调制或者由于任何原因必须改变功率的任何应用，这都是非常有价值的特性。

单发射器架构

相干公司最近推出了称为 FACTOR 的新型光纤耦合二极管模块系列，其提供三种新的可选波长：878.6nm、885nm 和 888nm。这些优点检查的几个技术方面因素如下。首先，FACTOR 模块均基于单发射器形式。每个模块都包含一系列单发射器，所有这些发射器都位于一块公共基板上，并且全部对准以耦合到单个永久连接的输出光纤中。为什么选用单发射器？如前所述，效率是长波长泵浦的一个主要优势，可提供更高的功率、更好的光束质量、线性调制、更低的成本，以及更低的碳排放以实现更加绿色环保的制造。

使用散热效果好的单发射器，可以非常有效地冷却二极管。这样，就允许二极管可以在接近其最大功率下工作，而不必担心热量积累会影响性能或缩短寿命。这种方案能最大程度地减少所需要的发射器总数，从而降低 DPSS 制造商的组件成本。另外，单发射器的输出也更容易耦合到光纤中。结合复杂的光纤耦合概念，这些新型 FACTOR 系列模块将提供出色的耦合效率，从而进一步提高 DPSS 的效率。

制造基于单发射器架构的光纤耦合泵浦模块并非没有挑战，但相干公司的垂直整合已经为所有挑战提供了解决方案。除了组装和测试这些模块外，相干公司还在内部制造所有关键组件，从用于制造激光二极管的晶圆，到 VBG 滤光片、再到传输光纤等等。对这些组件的生产进行全面控制，可确保高性能和高可靠性，并延长使用寿命。❑

蓝光激光器

高功率工业级蓝光激光器拓展新应用领域

不断的技术革新和产品巩固，正在为蓝光激光器开辟出新的应用领域，并且这一趋势极有可能在未来几年中进一步加速。

文/Jean–Michel Pelaprat，Mark Zediker，Mathew Finuf；Nuburu公司

自从2017年第一台高功率半导体蓝光激光器问世以来，工业观察者很快就意识到了其在实现快速高品质铜焊接方面，所展示出的无与伦比的性能。随着技术的不断革新，蓝光激光器的功率和亮度也不断提高，它们很快也在不锈钢、铝、金甚至是黄铜的加工上，显示出了相似的特性。目前，蓝光激光器已经在可靠性和稳定性方面趋于成熟，现在各个行业的客户都在扩大蓝光激光器的应用范围。

与此同时，蓝光激光器技术本身仍在不断发展。例如，多模蓝光激光器的功率和亮度，已经发展到能够与标准的工业扫描振镜相集成。越来越复杂的技术，反过来也在促使应用不断扩展，并且拓展了材料加工能力，并能将金属3D打印的性能提升一个数量级。

工业级蓝光半导体激光器的诞生

Nuburu公司通过光谱合成、空间耦合、偏振合成来组合每一个独立输出的氮化镓（GaN）半导体激光器单管芯片，以获得超高的功率输出。虽然，工业级蓝光激光器直到几年前才得以问世，但是得益于早期砷化镓（GaAs）芯片的技术积累，氮化镓（GaN）芯片的技术也已经特别成熟。例如，GaAs半导体激光器通常可以达到70%的高效率，而GaN半导体激光器也可通过相同的方法，来快速达到近似的效率。蓝光激光器的性能不仅仅取决于其结构设计，也同样遵循物理学的基础规律。

相比于长波长激光，紫铜、铝、金、不锈钢、镍等许多重要的工业金属，都对蓝光有着更高的吸收率，这也大大促进了材料加工应用的发展。蓝光在吸收率方面的优势，也使得材料加工速度和加工质量得以提高。例如，在焊接紫铜方面，蓝光就有着10倍于常规红外激光的焊接速度，同时，蓝光焊接紫铜还能实现无缺陷焊接，而这是红外激光无法实现的。

蓝光激光器还有另一项物理学基础优势。在任一后端光学系统中，最小光斑尺寸是波长的函数——波长越小，可实现的最终聚焦光斑越小。蓝光在某些光路中提供了更小的光斑，这也可以保证长焦距光学系统中的光斑可用，因此，工艺工程师们可利用其最小光斑特性，充分发挥工艺上的灵活性。

蓝光激光器在物理学上的优势、优良的结构设计、可靠性和稳定性等多种优势组合，为其在工业新应用中的发展提供了肥沃土壤。

蓝光激光器的优势

蓝光激光器在锂电池制造中发挥着重要作用，在锂电池制造中，通常需要焊接铜、铝和钢等金属材料，并且这些被焊接的金属材料的厚度，从10μm到1.5mm不等。这种宽范围的材料连接要求，通常需要例如超声波

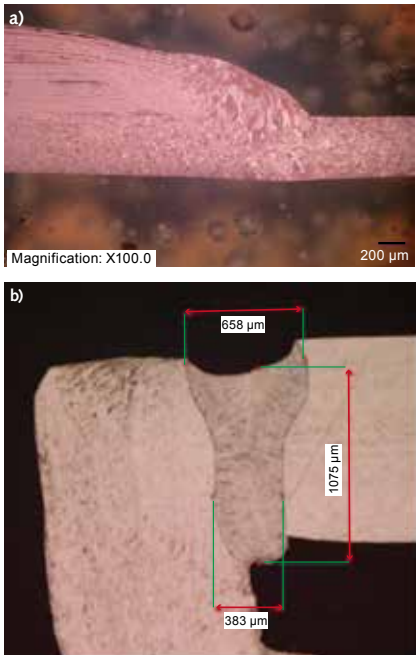


图1：在锂电池的制造过程中，需要诸多不同材料的焊接要求：（a）厚度808μm的铜箔与厚度200μm的极耳之间的焊接；（b）厚度1.2mm的不锈钢焊接。

焊接、电阻焊、红外激光焊甚至传统弧焊等多种工艺相匹配。没有一种工艺方法可以同时满足所有焊接要求，而制造商也需要添置繁多的硬件设备，并为之配备单独的维护和培训资源。

由于高反金属对蓝光有着出色的吸收率，因此使用蓝光焊接能提供极宽的加工窗口，这允许工艺工程师可通过选择光斑大小、光斑功率以及焊接速度，来满足不同材料、不同厚度的材料焊接要求。如图 1 所示，同一套激光系统可完成电池制造中的不同焊接阶段，这样就能通过同时减少硬件设备、培训成本、提高生产效率及焊接效果，来精简生产线的复杂度。

蓝光激光器也为工业用户提供了物流仓储方面的优势（见图 2），因为蓝光激光器的外观尺寸比很多激光器都小，并且它的整机系统效率比绿光激光器高 35%，从而可以使产线规划大约优化了一个数量级。而其长达 20,000 小时的设计寿命和每 1 千小时 < 0.5% 的功率衰减，也足以证明其可靠性。

下一个发展阶段

近期，Nuburu 公司新推出了一款里程碑式的产品——AI-1500 蓝光激光器，它能在 1500W 的功率下实现 11mm-mrad 的光斑质量（BPP），达到了可用于标准工业振镜系统集成的亮度阈值。这些使用 f-theta 透镜将角度转换成位置变化的振镜系统，可以同时最大程度地保证工件表面的聚焦光斑均匀性。即使这类系统不可避免地扩束光斑，降低功率密度，但由于其初始亮度足够，振镜扩束后依然能保持焊接所要的功率密度，并且低于 2.3MW/cm² 的无缺陷焊接最大功率阈值。

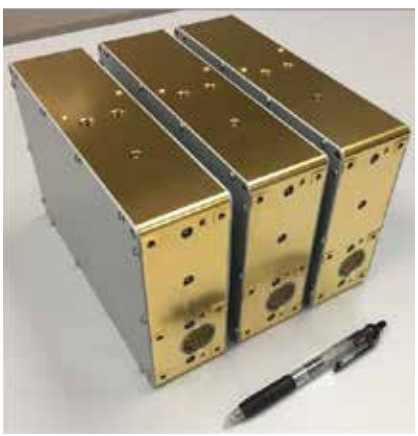


图2：结构紧凑且牢固可靠的400W工业级蓝光激光器模组。

这款蓝光激光器的先进性能，已经开辟出了一些新的应用市场。比如，随着半导体器件的密度持续提升，很多特征都在 20nm 的尺寸级别。这样的电路密度，将会产生热量的堆积，而这些热量必须要释放出去——尤其是像 5G 智能手机这类紧凑型器件中。

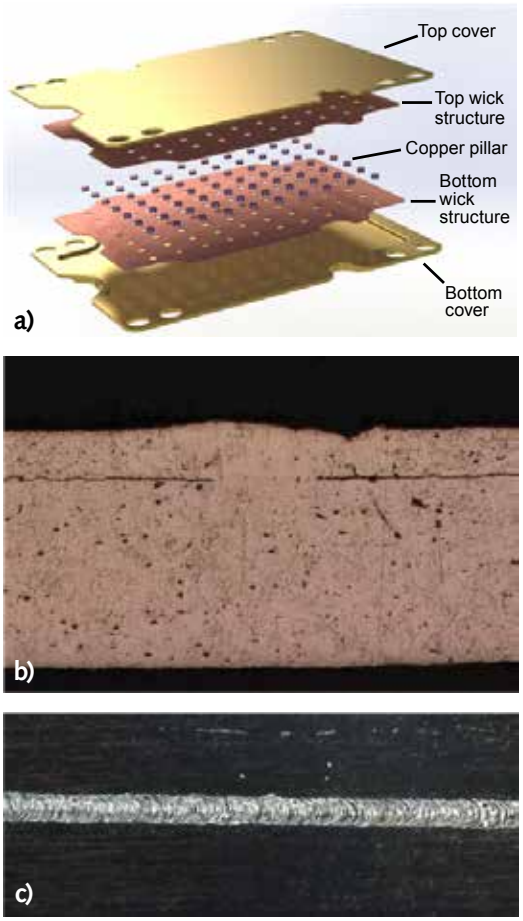


图3：蒸发腔为高密度5G智能手机提供高通量蒸发冷却。（a）标准蒸发腔结构示意图；50μm+200μm蒸发腔铜片蓝光叠焊显微金相；（b）该应用所需要的高质量稳定焊缝直观图。

蒸发腔冷却是一种电路转移热量的有效途径。蒸发腔内含有少量液体，可以在散热器上完成加热蒸发及压缩冷却。

蒸发腔由铜或钢的中空毛细结构薄片，沿着其锋利边角焊接后制成。因为相变需要吸收能量，因此可以实现高达 700W/cm² 甚至更高的散热通量。内腔保持真空，以达到相变所需要的物理条件。而真空是保持高散热通量和热导率的必要条件。然而对于厚度为 50~300μm 的薄片的无缺陷和真空密封连接，无疑是一项巨大的挑战。同时，超薄的机械尺寸需要集成到紧凑的电子设备中，因此连接过程还必须保证批量可重复性。

如图 3 所示，蓝光激光器能实现无缺陷焊接，在 500W 功率下，焊接速度能够达到 10~20m/min 甚至更高。也可以使用振镜系统，来满足包括 5G 智能手机等大批消费类电子产品在内的高速自动化生产要求。

蓝光激光器同样使得可再生能源行业快速发展。比如氢燃料电池行业逐渐崛起，这种燃料电池由 400 个独立的电芯组成，每一个都被薄膜电极组（MEA）包覆。输入端和输出端使用隔膜将氢、氧原子分隔两端，并在氢、氧混合时释放能量。

当前，单个电芯通过四周垫片压



图4：（a）独立电芯堆叠而成的燃料电池示意图；（b）氢燃料电池所需的两片特制钢板焊后金相；如图所示的无缺陷焊接效果，可以优化燃料电池性能，降本增效。

缩密封，但垫片可能会泄露。最理想的方法是焊接每个电芯四周，以保证机械性能和严格的气密性。

激光焊是一种快速且柔性的加工方式，但是红外激光焊接产生的非规则焊缝无法满足高品质要求，会出现常说的“焊缝隆起”。当电芯被堆叠时，35μm 程度的不规则隆起，会导致输入输出端错位。相比于红外激光焊接，蓝光激光焊接能将隆起效应降低 7 倍，这对于保持关键端口的焊接对齐至关重要（见图 4）。

同样的优势也被运用于 3D 打印之中。打印材料相互作用和蓝光的热传导优势都提升了最终性能。高材料吸收率可以直接提升打印密度；更小的聚焦光斑可以用来制造更精细的零件；相比于红外激光器，蓝光激光器延伸焦距后，还可以扩大 10 倍的打印范围。

不断的技术革新和产品巩固，正在为蓝光激光器开辟一些新的应用领域，例如用于自由空间光通信，蓝光可以缩小 3 倍的通光孔径。蓝光还可以提供相比绿光 8 倍以上的水透过率。对于潜艇激光通信，目前都是按照绿光设计。使用蓝光或两者组合，可以显著提高穿透深度，从而提供更大的通信带宽。提高水下穿透率也同样提高了激光雷达的性能。

总之，蓝光激光器是激光技术基础的一大进步。回顾历史，二氧化碳（CO_2）激光器在各种工业应用中证明了激光的价值。随后 Nd：YAG 激光器利用其较低的运行成本和可靠性，在很多领域取代了 CO_2 激光器，并诞生了一系列新应用。再到后来的光纤激光器，一些应用中的 Nd:YAG 激光器又被取代了，同样也带来了一些新应用。如今，蓝光激光器正在重现这种模式，它将取代某些老旧的技术，并开辟出一片新的应用天地。蓝光激光器的性能还将继续发展，并且这一趋势极有可能在未来几年中进一步加速。❑

上接第15页

将 850nm 处的损耗减小到 0.5dB/km 以下，并利用空芯光纤大模场直径和低色散的优势，可以增加短距离数据链路的带宽距离乘积，并改善激光同步和时间分布。

在 1030~1090nm 的镱和钕波段，空芯光纤传输能提供比实芯光纤更长的传输距离，也能提供更高的传输功率水平，这是空芯光纤的另一项诱人之处。空芯光纤可以承受纳秒和皮秒级脉冲数十兆瓦的峰值功率，而不会出现像实芯光纤所遭受的灾难性损伤的风险。纤芯直径在 30μm 范围内的空芯光纤，可以传输单模光束，从而可以在可能长达几公里的范围内传输千瓦级光束。它们的大纤芯尺寸还减少了非线性效应，而非线性效应正是高峰值功率短脉冲的一个特殊问题。

空芯光纤还可以传输 580~900nm 波段的量子态和纠缠光子，用于量子计算、存储器和网络。NANF 的损耗下限仍然未知。直到最近，Poletti 还曾认为空气玻璃界面处的光散射将设置下限。现在，他说：“随着我们不断改进制备技术，损耗也将断下降，这也说明实际的散射要远低于建模时所预测的水平。”❑

参考文献

1. H. Sakr et al., Nat. Commun., 11, 6030 (2020); http://bit.ly/JH-Ref1.
2. J. Hecht, Laser Focus World, 56, 4, 12–14 (Apr. 2020); http://bit.ly/JH-Ref2.
3. J. Hecht, Laser Focus World, 55, 11, 14–16 (Nov. 2019); http://bit.ly/JH-Ref3.
4. Y. Tamura et al., J. Lightwave Technol., 36, 44–49 (2018); http://bit.ly/JH-Ref4.

铜焊接

可调模式光纤激光器成功实现铜焊接

具有高亮度中心光束的可调节环形模式（ARM）光纤激光器，成功实现了铜的高质量稳定焊接。

文/Klaus Kleine，Falk Nagel；Coherent公司

电动汽车制造业的繁荣，是推动市场对铜焊接解决方案需求显著增加的主要因素。这是因为，与其他金属相比，铜在电气、热学、机械性和成本方面，拥有许多理想的特性。

铜的高电导率和高热导率，使其成为电动汽车的理想选择；但是这也同样使传统光纤激光器在铜焊接方面，面临挑战。具体而言，铜的电子特性，导致其对光纤激光器的近红外波长具有高反射性。并且，铜的良好导热性，需要输入大量激光能量才能熔化材料，进而启动焊接过程。总之，使用传统的光纤激光器焊接铜，需要很高的功率密度才能使铜材料熔化。

虽然高能量密度的激光束能够熔化铜，但是这种“强力”方法，会导致焊接过程非常不稳定，并且焊接过程对工作表面的微小变化极为敏感。尤其是局部表面氧化或小尺度的表面结构不均匀的情况，都会导致焊接工艺不稳定。最终结果可能是焊缝不一致、表面质量差和孔隙率增加。

固态绿光激光器

铜对绿光的吸收率，比对近红外光的吸收率高出近一个数量级。因此，使用绿光开始焊接过程会更容易；并且，与光纤激光器相比，固态绿光激光器能提供更稳定、对各种变化更不敏感的铜焊接过程。目前，一些制造商正在铜焊接中采用高功率固态绿光激光器，并且也有很多制造商正在对绿光焊接工艺进行评估。

但是，在电动汽车制造中部署高功率绿光激光器，面对一些棘手的挑战。首先，用于将红外（IR）固态激光输出转换为绿光的倍频过程效率低下，会产生大量的废热，因此，需要水冷散热器和大量冷却水。由于电力消耗，这还导致相对高昂的运行成本。

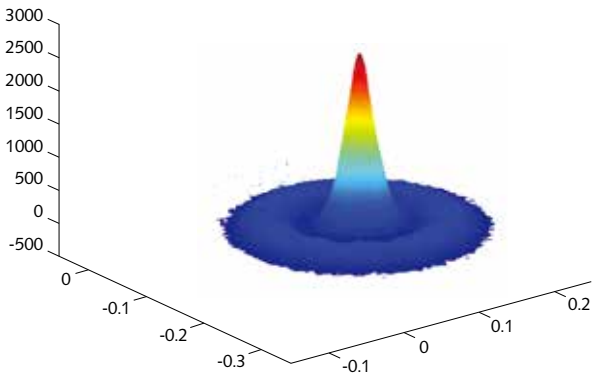


图1：工作表面上的ARM激光器的光束轮廓（中心光束的功率为1.5kW，环形光束的功率为2.5kW）。激光聚焦在工作表面上方1.5mm处。

另外，绿光在传输上也存在一些困难。与红外光相比，绿光更容易让“用于光束传输的标准光纤”暗化，从而降低使用寿命。专门用于绿光传输的光纤可以克服这个问题，但是其价格昂贵且不易获得。

这种光纤的暗化效应，会随着光纤长度的增加而增加。目前将光纤长度限制为10米，但是这又降低了在生产环境中放置激光器的灵活性。

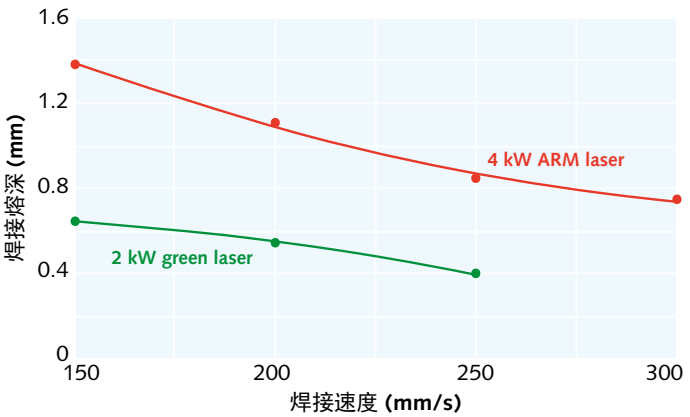


图2：2kW绿光激光器与4kW高亮度ARM激光器，在厚度为2mm的铜中的焊接熔深。

HighLight ARM光纤激光器

光纤激光器比固态绿光激光器具有更高的电效率，这意味着它们需要更少的电力，并且产生的废热更少。这能明显降低用户的拥有成本，并简化了冷却环节。另外，光纤激光器在设计上更加牢固可靠，而且其红外输出很容易通过光纤传输。

成本、可靠性和实用优势的独特结合，使得光纤激光器成为了许多工业应用的理性选择。但是，尽管光纤激光器具有这些优势，由于前文中提到的那些问题，它们并未被广泛用于焊接铜中。几年前，相干公司推出了 HighLight 系列可调节环形模式（ARM）光纤激光器，主要用于利用传统技术无法充分实现的应用。在这些任务中，通常必须仔细控制功率和功率密度在工件表面上的空间分布，以产生良好的焊接质量（低飞溅、小裂纹和低孔隙率）。

HighLight 系列激光器的典型应用案例包括：镀锌钢的零间隙焊接、动力总成组件的无飞溅焊接，以及不使用填充焊丝的无裂纹铝制悬挂部件的焊接。HighLight 系列激光器的输出光束中，有一个中心点，这个中心点被另一个与之同心的激光环所围绕。中心点和外围激光环上的功率，可以根据需要进行独立调节和调制，因此可以非常精细地控制焊接熔池。

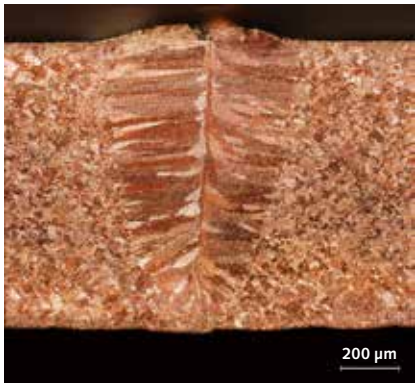


图3：高亮度红外ARM激光器实现的铜焊缝的横截面，输出功率为3.5kW，焊接速度为300mm/s。

这项技术中的创新是产生高强度、高亮度、低 M^2 中心光束的 ARM 激光器。这对于铜焊接特别有利，因为尽管铜对光纤激光器的输出吸收率相对较低，但是在 ARM 激光器的输出中，高亮度的中心光束提供了易于熔化材料所需的能量，而外围的环形光束则有助于稳定焊接过程。这种技术实现的结果是：无论工件的表面如何变化，焊接过程都会始终如一地启动和保持，从而克服了传统光纤激光器在铜焊接中的局限性。

铜焊接结果

相干公司使用 ARM 激光器，对铜焊接进行了一系列测试评估。该激光器提供高亮度的中心光束（直径为 22µm）和内 / 外径为 100µm/170µm 的环形光束。使用放大倍率为 1.4 的远程加工头聚焦激光，并以氮气作为保护气体和交叉射流。焊接的材料是纯铜。对于所有测试，激光功率为 4kW，其中中心光束功率为 1.5kW，环形光束功率为 2.5kW。初步的测试表明，将光束聚焦在工作表面上方 1.5mm 处，可获得最佳焊接结果（实现焊接熔深、飞溅和表面质量之间的最佳折衷）。

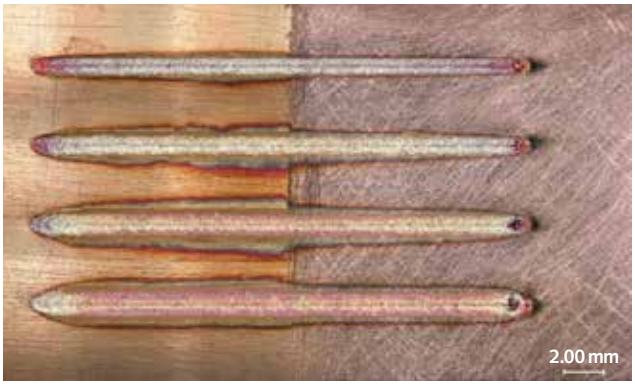


图4：使用4kW ARM激光器以不同的速度（从上至下为300~150mm/s），在光滑的和打磨的铜上，形成稳定的焊缝。

这些条件下的光束分布如图 1 所示。图 2 中给出了在上述条件下，在厚度为 2mm 的铜焊接过程中，熔深随速度的变化曲线。

在相同的条件下，还测试了 2kW 绿光激光器以进行比较。IR ARM 激光器在很宽的焊接速度范围内，使焊接熔深翻倍。图 3 中显示了焊缝的横截面。最重要的是，这种焊缝没有空隙，显示出均匀的晶粒形成和再结晶，同时熔深也足够深。

为了弄清楚焊接结果对工件表面质量的依赖性，还进行了一项测试比较：分别对一个抛光的表面区域和一个打磨过的表面区域进行连续焊接。比较结果（见图 4）显示了稳定的加工过程，即随着表面光洁度的变化，焊接质量并没有明显变化。

结论

这些测试结果表明，相干公司的高亮度 ARM 激光器，是电动汽车中苛刻的铜焊接应用的有效解决方案。ARM 激光器的焊接熔深和加工速度，都能达到或超过当前的生产要求。而且，ARM 激光器还避免了对表面质量的敏感性和工艺不稳定的问题，而这些问题过去曾限制了光纤激光器在铜加工中的使用。光纤激光器凭借着卓越的可靠性和易用性，以及较低的拥有成本，已经成为众多工业应用的首选。现在，它们已经为铜焊接准备好了准备。❑

EUV光刻

使用小型极紫外系统制备纳米结构

使用紧凑型极紫外光源和简单的工艺，可以制备出尺寸在28nm以下的周期性结构。

文/Serhiy Danylyuk，Sascha Brose，Andreas Thoss

2020 年 11 月上市的新款 iPhone 手机上安装了一款由 13.5nm 极紫外（EUV）光源制备的特殊处理器（见图 1）。EUV 光刻技术已经拥有几十年的发展历史，现在，荷兰 ASML 公司研发的 EUV 设备，一台售价就高达 1 亿欧元。对于销售额达数十亿美元的智能手机市场来说，购买 EUV 设备的投资还是值得的。但是，对于那些只需要制备表面纳米结构的公司而言，购买高昂的 EUV 设备显然不能很快实现盈利；因此对这些公司而言，投入更少的解决方案会更加合适。

德国夫琅和费激光技术研究所（Fraunhofer ILT）和德国亚琛工业大学的科学家们开发出了一种新技术，利用 EUV 光源和相对简单的工艺技术加工出了周期性纳米结构。“提供完整的流程链对我们来说很重要，”Fraunhofer ILT 项目经理 Serhiy Danylyuk 说，“这就是我们在内部需要建立所有流程的原因，包括模拟、掩模生产，以及掩膜板和纳米结构的质量控制。”因此，一些中型甚至初创企业能够以合理的投资成本，获得高端技术。

近场干涉

近场干涉的技术背景是干涉效应，如消色差 Talbot 效应。干涉的光场形成了周期性光强分布，从而可以在近场（即掩模上）产生显微光刻结构。近场干涉也适用于相对宽频的辐射。在模拟和实验室测试中，研究人员优化了 13.5nm EUV 光源的光刻工艺。

近场距离为 50μm 时，光刻系统的焦深约为 15μm，因此就可以加工几百纳米厚的掩膜板。除了可以加工周期性线性结构外，也可以加工孔洞结构。孔洞可以是环形、三角形等任意形状。在光刻过程中，光源将掩膜版上的图案放大两倍，刻蚀到晶圆上。

EUV光源加工小于100nm的结构

作为光刻系统最重要部分，EUV 光源已经拥有 30 年的发展历史。科学家最终选择激光诱导的等离子体来产生 EUV 光源。但如果是用于镜片或电阻的测试，这种 EUV 光源产生装置明显有些庞大笨拙。另一种产生 EUV 的技术，其输出功率相对较小，不能用于大规模生产应用，因此只能用于小型加工任务。



图1. 德国夫琅和费激光技术研究所的EUV光源，输出波长13.5nm，输出功率40W，带宽波动±1%。（图片来源：Fraunhofer ILT）

Fraunhofer ILT 的专家研发了一种基于气体放电的 EUV 光源，可在 ±1% 的带宽内输出高达 40W 的功率。光源的功率和频谱被实时监测，到达掩模板上的光强大于 0.1mW/cm^2。加工 1mm^2 的掩膜版大约需要 30s，加工区域可以拼接。Fraunhofer ILT 使用消色差 Talbot 效应，在直径为 100mm 的晶圆上可以加工出 28nm（半间距）的结构。对于这种小型光刻系统来说，这个尺寸已经是世界纪录。该工艺加工的结构尺寸的物理极限为 7.5nm（半间距）。由于干涉效应形成的强度分布比较均匀，因此加工的纳米结构误差率低。

功率更大的深紫外光源

同样基于消色差 Talbot 效应，研究人员也用 248nm 的 KrF 准分子激光器实现了光刻工艺。Coherent 公司的 LEAP150K 准分子激光系统，在 150Hz 的重复频率下输出单脉冲能量达 1J。这款深紫外激光系统可以在玻璃基板上烧蚀硅膜，形成 100nm 的尺寸结构。此外，在光刻胶中可以打印周期为 600nm、宽度为 180nm 的线结构，

同时也适用于烧蚀 PET 塑料表面，形成 300nm 的结构。

周期性的纳米结构有不同的应用。例如可用作宽频带抗反射涂层或偏振器，也可用于医学和生物技术中，作为纳米级粒子过滤器。在电子和计量学中，纳米结构也可以用作新型传感器元件。各种新技术的发展，如计算光刻技术，使各种几何结构的加工成为可能（见图 2）。当然，计算光刻系统也可以用于测试工业 EUV 系统的部件，如镜片、光刻胶或其他部件。EUV 光刻技术是迄今为止人类历史上研发的最复杂的技术之一。

《华尔街日报》(the Wall Street Journal) 曾就 EUV 发表评论称：“在 EUV 技术领域，如果说美国英特尔公司落后几年的话，那么中国的落后可能将近十年。”欧洲对 EUV 技术的研究始于 20 多年前。Fraunhofer ILT 很早就参与了 EUV 技术的开发。与其他 Fraunhofer 研究所合作，Fraunhofer ILT 除了研发了 EUV 脉冲光源以外，还研发了高反射率的镀膜技术。为此，2012 年 Fraunhofer ILT 还获得了著名的约瑟夫 · 冯 · 夫琅和费奖（Joseph von Fraunhofer Prize）。2020 年 11 月，蔡司、通快和夫琅和费应用光学精密工程研究所（Fraunhofer IOF）这三家单位，因为在 EUV 光刻技术上取得的成就，获得了德国联邦总统颁发的德国未来奖（German Future Prize）。德国的 EUV 技术已经进入工业应用，可以为市场应用提供各种解决方案。❑

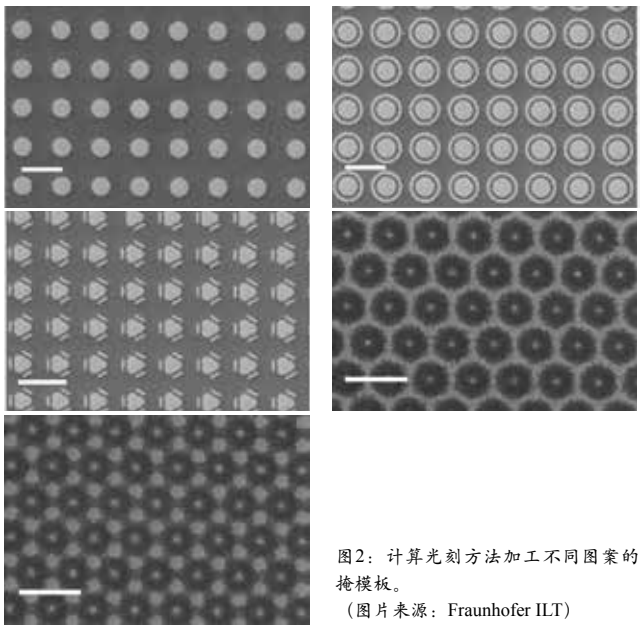
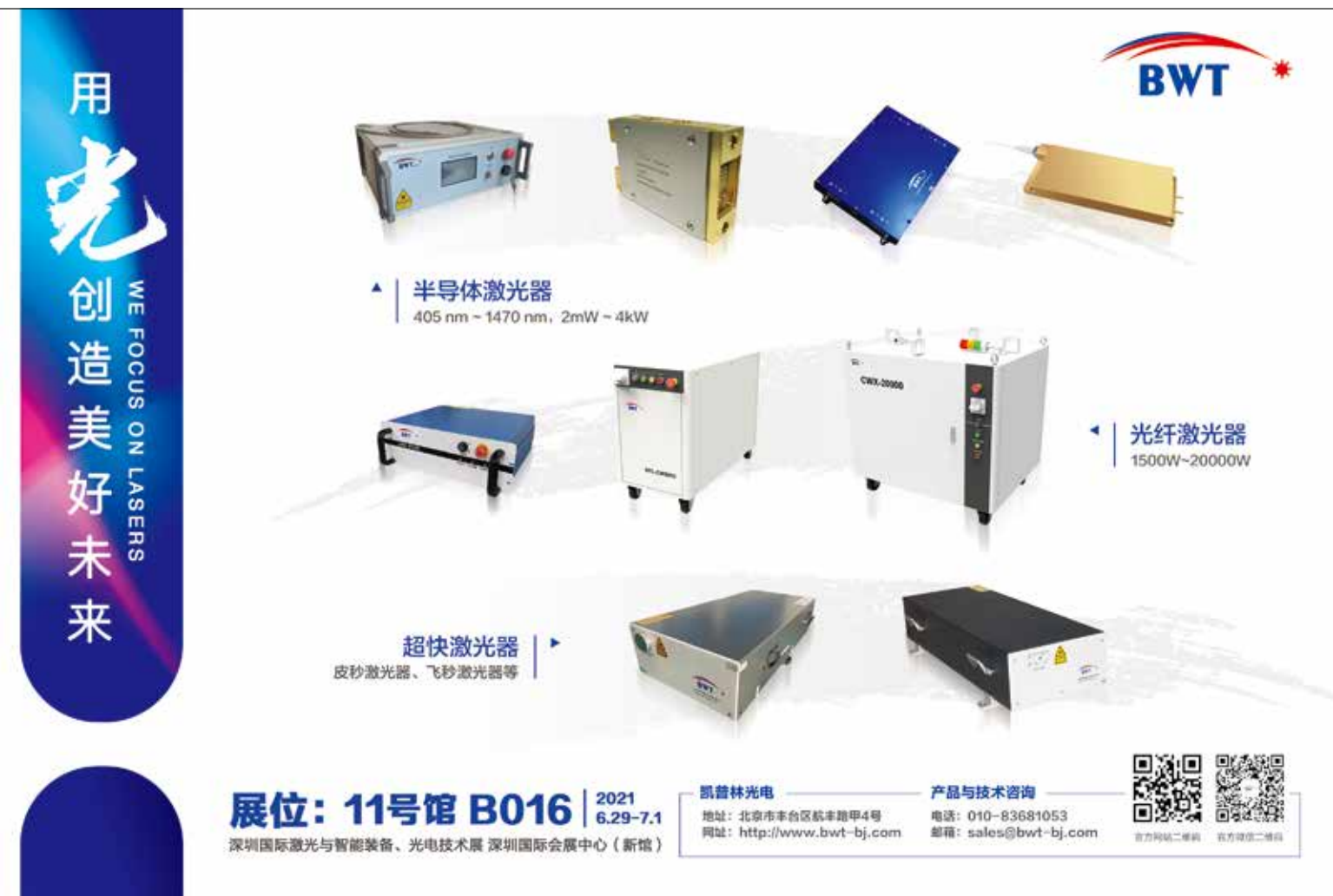


图2：计算光刻方法加工不同图案的掩模板。
（图片来源：Fraunhofer ILT）



打标&雕刻

激光打标和激光雕刻是一回事吗？

如何区分激光打标和激光雕刻？本文介绍了区分两者的三个注意事项。

文/Claudia Neri

通常人们认为激光打标和激光雕刻是一回事，但实际上，激光打标和激光雕刻是两种不同的加工工艺。

虽然激光打标和激光雕刻都是利用激光在材料上刻下擦不掉的印记，但是激光雕刻使材料蒸发，而激光打标则使材料熔化。材料表面的熔化会扩展，形成深度为 80μm 的沟槽，改变材料的粗糙度，并且在材料表面形成黑白对比。下文中，我们将具体讨论激光打标形成的黑白对比的影响因素。

激光打标的三步骤

（1）激光束作用于材料表面（见图 1）。激光打标或激光雕刻的共同点是，激光束是脉冲的，也就是说，激光系统会在特定时间间隔内输出一个脉冲。一台 100W 的激光器每秒能输出 10 万个脉冲。因此，可以计算出单脉冲的能量为 1mJ，峰值功率可达 10kW。

要控制作用到材料上的激光能量，就要调节激光器的参数。在这类应用中，最重要的参数是扫描速度和扫描间距，因为这两个参数决定了作用在材料上的相邻脉冲的间隔。相邻脉冲间隔越近，材料吸收的能量就越多。



图1：激光束作用到材料表面的实拍图。

相比于激光雕刻，激光打标需要的能量比较小，因此扫描速度比较快。在决定选择激光雕刻还是激光打标工艺时，扫描速度是一个关键的决定性参数。

（2）材料吸收激光能量。激光作用到材料表面后，大部分激光能量被材料表面反射，只有一部分能量被材料吸收并转化为热量。激光打标只需要吸收能量用来融化材料，而激光雕刻则需要吸收更多的能量以使材料蒸发。

一旦吸收的能量转化为热量，材料的温度就会上升。达到熔点时，材料表面就会融化，发生形变。

对于波长为 1064nm 的激光，铝的吸收率为 5%，而钢的吸收率达 30% 以上。因此，大家可能会认为钢更容易被打标，但事实并非如此。我们还必须考虑材料的其他物理特性，比如材料的熔点（见表 1）。

表1：材料的熔点

材料	熔点
Aluminum 6061	585°C
Carbon steel	1425–1540°C
Lead	327.5°C
Magnesium	650°C
Grade 304 stainless steel	1400–1450°C

（3）材料表面发生局域膨胀，粗糙度改变。当材料在几毫秒的时间内熔化和冷却时，材料表面的粗糙度会发生变化，形成永久性标记，标记内容包括编码、标志或图形等（见图 2）。



图2：激光打标示意图，材料表面粗糙度的变化，形成永久性标记。

在材料表面标记不同的图案，还会引起材料颜色的变化。对于高质量的激光打标，白色和黑色提供了最好的对比度：

- 当粗糙的表面对入射光发生漫反射时，表面呈白色。
- 当粗糙的表面对入射光大部分都吸收时，表面呈黑色。

激光雕刻时，高能量密度激光脉冲作用到材料表面，激光能量转变成热量，使材料直接从固态变成气态，发生升华，去除材料表层。

选择激光打标还是激光雕刻？

了解了激光打标和激光雕刻的区别后，我们现在来讨论根据哪些参数来判定选择哪一种加工工艺。这里主要考虑三个参数，它们分别是耐磨性、加工速度，以及材料及其相容性。

（1）耐磨性

激光雕刻比激光打标的穿透程度更深。如果被标记的工件需要在磨损

的环境中使用，或者需要经过后处理，如表面喷砂、喷丸加工、电泳漆或热处理等，那么就荐推使用激光雕刻工艺（见图 3）。

（2）加工速度

相比于激光雕刻，激光打标由于穿透材料表面的深度更小，因此加工速度更快。如果打标件的使用环境不会引起标记的磨损，例如用于家用电器、电子设备、促销品或者珠宝标记，建议使用激光打标。这样，既能提高加工速度，标记的耐磨性也能满足应用需求（见图 4）。



图3：激光雕刻能穿透表面更深，对于易磨损的部件，推荐使用激光雕刻工艺。

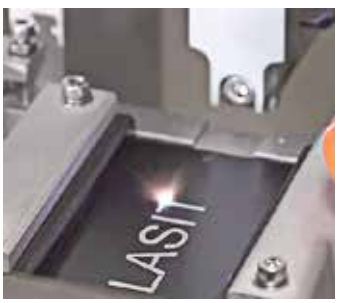


图4：激光打标由于穿透材料表面深度更小，因此相比激光雕刻耗时更少，jiag速度更快。

（3）材料及其相容性

上文已经提到，激光打标使材料熔化产生轻微的凹凸，而激光雕刻会使材料直接气化产生凹槽（见图 5）。由于激光雕刻需要足够的激光能量，使材料达到升华温度，在几毫秒的时间内蒸发掉（气化），因此激光雕刻并不是在所有材料上都能实现。

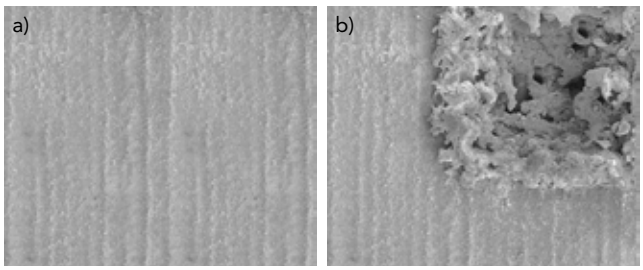


图5：激光雕刻前后的表面对比图。

此外，激光雕刻设备还需要配备合适的排风系统。LASIT 公司给激光雕刻机专门设计了排气风扇，以最大限度地保护环境和激光器。

以上我们较全面地介绍了激光雕刻和激光打标的区别，用户可以根据需要选择合适的加工工艺。❑





中国国际工业博览会旗下核心专业展：

数控机床与金属加工展

2021年9月14-18日 国家会展中心(上海虹桥)

金属加工技术的
国际化品牌展

ufi Approved International Event



Deutsche Messe

FIERA MILANO

上海工业商务展览有限公司
SHANGHAI INDUSTRY & COMMERCE EXHIBITION CO., LTD.

www.metalworkingchina.com
欢迎垂询：021-2055 7138/7139/7140

扫一扫
关注微信公众号

SCIIF
华南国际工业博览会
2021年6月29-7月1日
深圳国际会展中心

CDIIF
成都国际工业博览会
2022年4月
中国西部国际博览城

激光雕刻

纳秒脉冲光纤激光提高激光雕刻的质量和效率

通过优化脉冲参数，纳秒脉冲光纤激光能雕刻铜、氮化铝（AIN）、碳纤维增强塑料等多种材料，在提高加工效率的同时保证雕刻质量。

文/Jack Gabzdyl

激光雕刻与激光打标常常混为一谈，但实际上，它们是两个不同的加工过程。雕刻一般伴随着材料的物理去除过程，被加工的基材轮廓会产生变化。

雕刻的应用非常广泛，从钢铁雕刻到石头雕刻，涉及到日常生活的方方面面。当你坐在车里，用手去触摸仪表盘和内部装饰时，你会感觉到这些人造革材料与动物皮毛没有任何关系。这些内饰加工，通常是先用纳秒脉冲光纤激在钢模具上雕刻花纹图案，然后再用这些磨具制作人造革材料。硬币和奖牌模具的制造也属于激光雕刻领域。在珠宝行业，贵金属的激光雕刻也越来越普遍。传统的手工艺人用打孔机和锤子雕刻图案的方式，正在慢慢消失。如今，一切都可以用激光加工完成。

虽然超快激光和连续（CW）激光也可以用于雕刻应用，但用的最多的还是纳秒脉冲光纤激光。纳秒激光脉冲短，峰值功率高，特别适合激光雕刻。主振荡功率放大（MOPA）的设计，可以让用户自由地选择脉冲宽度，并且重复频率高达 4MHz。如 SPI 激光公司的脉冲调谐（PulseTune）技术，可以让脉冲宽度在 3ns~2μs 的范围内可调，这就给用户提供了优化脉冲性能的机会，从而提高激光雕刻的质量或效率。

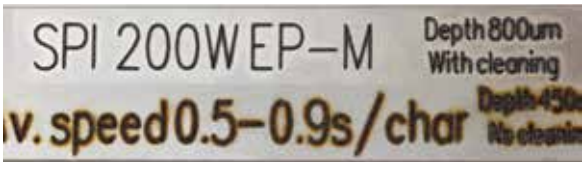


图1：200W EP-M激光器的VIN打标案例。

保证激光雕刻的质量

激光雕刻的原理比较简单，作用在材料上的激光脉冲使材料发生熔化，形成一个熔池。达到一定热量之后，材料表面汽化，在熔体上产生反冲压力，导致熔体喷射，这就是激光雕刻去除材料的主要机制。人们对于激光雕刻，可能存在一些误解，例如，认为脉冲能量越高去除的材料就越多；峰值功率越高，脉宽越短，激光雕刻的质量就越好。事实上，激光雕刻过程极其复杂，目前没有固定的加工方案能保证雕刻质量。由于雕刻质量和材料去除率两者相互制约，因此无论从哪方面来说，用户要优化脉冲特性、光学系统和加工 / 扫描参数的选择，以保证加工质量和加工效率达到一个很好的平衡。

激光雕刻本质上是材料去除，一个激光作用过程去除深度只有几十微米。因此材料的去除过程相对缓慢，目前达到的去除速度以每分钟立方毫米计算，去除效率由平均功率决定。要同时实现高质量激光雕刻和高效率材料去除，最关键的是采用优化的加工方案。由于光栅式扫描通常会形成犁沟，存在去除深度低和残余粗糙度等问题，因此除非雕刻要求不高，一般不推荐使用这种加工工艺。

如果只需要雕刻线条和简单的文本，可以采用激光抖动加工方法。这种技术非常适用于车辆识别码（VIN）标记，雕刻的车辆识别码即使在喷漆后仍然可见，并且难以磨掉，因此更加安全。此外，得益于激光系统强大的功能选择性，只需简单改变激光参数，如缩短脉宽、调高重复频率，就能有效地清除激光雕刻过程中产生的氧化物和表面飞溅物（见图 1）。

然而，对于大面积和复杂形状的激光雕刻，如果持续保持某一固定方向的激光扫描，不均匀效果会逐渐叠加，因此需要采用变换激光扫描方向以及采取逐层去除的加工方法，使加工效果更加均匀。例如，从降低莫尔干涉条纹

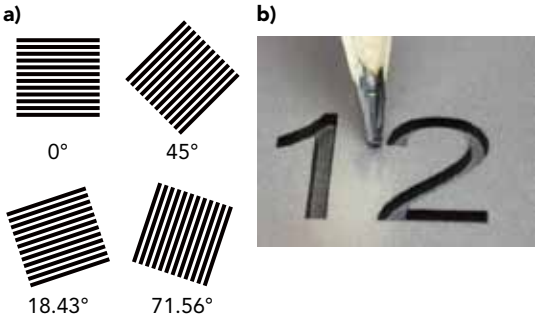


图2：（a）防止莫尔干涉条纹产生的一组不同扫描角度图和（b）雕刻案例。

的角度来说，采用多次激光扫描，每次扫描角度不同就可以使雕刻质量大大提高。这种技术已经在印刷行业应用多年，用以确保印刷质量均匀，目前这项技术可以很好地应用到激光雕刻中（见图 2）。

雕刻质量取决于脉冲参数

如上所述，工艺优化的过程虽然很漫长但是很有用，在某些情况下，可以将材料去除率提高一倍，或将残留粗糙度减半。激光雕刻除了要考虑脉冲参数，还要考虑脉冲的重叠率和扫描线间隔。这些优化在一定程度上可以被结构化和半自动化，通过打标样本来显示所选参数的相互依赖性。

例如，在黄铜上雕刻，保持平均功率相同（脉冲重叠率和扫描线间隔保持不变），将脉冲能量调到最高，脉宽调到最短，其峰值功率最高的时候，材料去除率却很低。然而通过增加重复频率来降低脉冲能量和峰值功率，并调高脉宽，可以显著提高材料去除率——某些情况下的去除率可达 40%。

有趣的是，同样的测试参数应用于不同的材料，结果也不一样。其实这并不奇怪，因为不同材料的关键物理属性，如电导率、比热容、熔点和流体粘度等都不相同，并且这些物理属性与加工过程也有关系。因此，铝和钢的最优激光雕刻参数区别很大，需要反复试验（见图 3）。

针对激光雕刻，尽管研究人员已经提出了各种加工模型和模拟方法，但是目前还没有一个模型能涵盖所有可用的工艺参数和材料类型，因此可见激光雕刻确实是一个非常复杂的过程。

激光雕刻最大的挑战之一，就是提高材料去除率的同时，仍然保持较高的雕刻质量。激光雕刻中存在的热效应限制了激光功率的使用。当激光功率为 50~100W 时，热积累开始出现，导致雕刻质量和一致性下降。当然也有高功率激光成功用于块体材料大面积雕刻的案例，如印刷卷板的雕刻，但这些应用案列都比较有局限性。

激光雕刻中的热效应可以通过不同的技术来降低。其中一种比较有效的技术就是隔行扫描，可以隔一行，也可以隔多行，隔开的空白区域通过后续隔行扫描继续填充（见图 4）。[1]

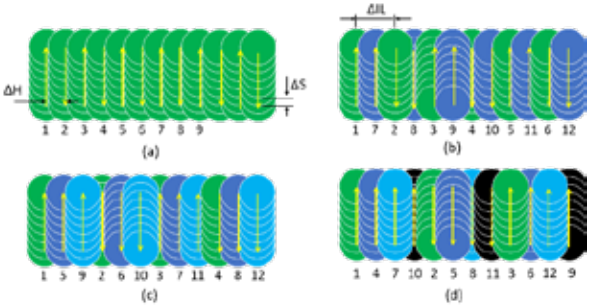


图4：隔行扫描示意图。

与顺序扫描相比，当使用 100W 的激光在铝和黄铜的表面进行隔行扫描雕刻时，材料去除率和残余表面粗糙度都有显著提高。然而，当在不锈钢上使用隔行扫描技术时，材料去除率没有明显提高，但表面粗糙度得到了改善。目前隔行扫描技术正在试用到 200W 激光功率上，并期待有良好的结果。

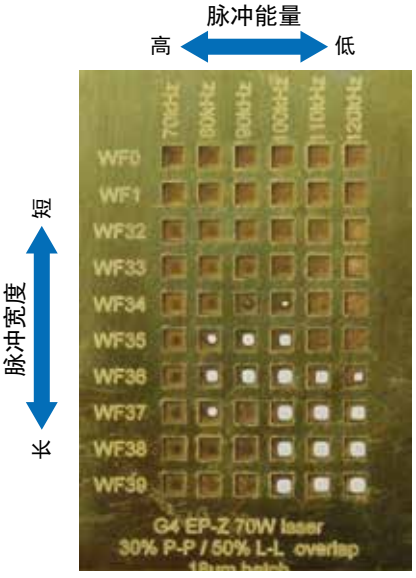


图3：黄铜上的激光雕刻效果随脉冲参数而变化。

激光也能在铜表面上进行雕刻。一种新型的应用是在铜薄片上雕刻印刷电路板（PCB），而传统的做法是通过化学腐蚀来产生复杂的导电路径。铜层相对较薄，通常厚 40~100μm，但可以通过雕刻技术很容易地去除金属层，露出 FR4 基板。与 VIN 标记的例子一样，改变激光参数可以清除 FR4 基片上任何残留的碎片。此外，激光也可以将铜薄片切割成所需的尺寸。虽然激光雕刻电路板不太适合大规模生产，但可以用于 PCB 原型快速制作（见图 5）。

激光雕刻加工材料广泛

对于在红外波段有一定吸收率的材料，激光几乎都可以雕刻。激光雕刻不只局限于金属材料，也可以在陶瓷甚至碳纤维增强塑料（CRP）等材料上实现雕刻。

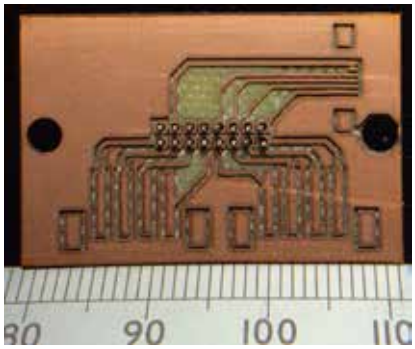


图5：用纳秒激光在铜片上制作PCB。

陶瓷易碎，并且在加工过程中容易开裂，因此给激光雕刻带来了挑战。但是有一些材料，如氮化铝（AlN），激光雕刻的效果就很好（见图 6）。



图6：激光雕刻氮化铝。

激光能够加工各种硬性材料，例如可以加工最硬的材料——金刚石。在航空航天领域，高温合金涡轮叶片冷却孔的滚道加工，就是用纳秒脉冲激光对热障涂层进行选择性去除实现的（见图 7）。



图7：用纳秒脉冲激光从高温合金中选择性去除热障涂层。

对于碳纤维增强的各种类型的塑料，激光雕刻的效果非常好。在某些情况下，通过优化脉冲参数可以选择性地去除基体材料，使增强纤维保持不变（见图 8）。

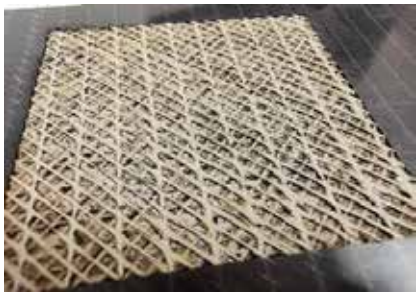


图8：碳纤维增强塑料的选择性去除。

利用 MOPA 纳秒脉冲光纤激光器的通用性，选择适当的加工方案，很容易就能优化激光雕刻的效果。

纳秒脉冲光纤激光器不仅能用于各种材料的雕刻应用，还在产品可靠性和成本方面具有诸多优势，它们正在现代制造业中发挥着越来越重要的作用。❑

参考文献

1. S. Dondieu et al., “Investigation of laser beam scanning strategies for 100W pulsed fiber laser engraving of metal,” Proc. ICALEO (2019)

锐科激光单模块 12kW 光纤激光器核心器件国产化

锐科激光推出推出工业级单模块 12kW 光纤激光器，并且有源光纤、非线性抑制技术、泵浦源、合束器及输出光缆等核心器件方面，实现了国产化。



有源光纤采用的是锐科激光全新自研升级的超高功率掺镱光纤，通过对光纤结构和掺杂的优化设计，新一代掺镱光纤在纤芯直径不变的情况下，实现吸收提升 50%，光子暗化性能提升 40%，承受功率提升超过 40%。此外，光纤包层形状的优化，大幅度降低了熔接的难度，使关键点的热管理难度大幅度下降。

在非线性抑制方面，锐科激光通过自主开发的非线性抑制技术，使受激拉曼散射的相对强度降低 20dB 以上，将激光器的输出光束亮度提高了 30%-40%。

锐科激光拥有领先的泵浦源技术，目前泵浦模块最高能实现 700~1000W 输出，95% 能量的 NA 处于 0.17 以内。在可靠性上，所有泵浦源的综合老化时间超过 27 万小时，输出稳定性极高，功率衰减极小。

针对高功率单模块产品，锐科激光开发了全新的高功率合束器，在泵浦耦合效率、信号插损及光束质量畸变性能均获得了全面突破。此外，还对合束器的制造工艺进行了全面升级优化，使合束器在满载情况下内部温升得到大幅度降低，可靠性大幅度提升。

在输出光缆方面，其功率承受能力最高超过 10 万瓦，光束畸变小于 1%。另外，对输出光缆的温度监控、interlock、工作状态监控与漏水监控优化升级，确保在高功率输出及各类应用场景下，仍然具备极高的可靠性。❑



CIOE
中国光博会

激光技术及智能制造展

LASERS TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO

2021年9月1-3日

深圳国际会展中心 (宝安)

专注于激光精细加工及创新应用

同期展会

- 信息通信展 INFORMATION AND COMMUNICATION EXPO
- 精密光学展 镜头及摄像模组展 PRECISION OPTICS, LENS & CAMERA MODULE EXPO
- 红外技术及应用展 INFRARED APPLICATIONS EXPO
- 智能传感展 INTELLIGENT SENSING EXPO
- 光电子创新展 PHOTONICS INNOVATION EXPO

第23届中国国际光电博览会

160,000M² 展出面积 | 95,000+ 专业观众 | 3,000+ 参展企业

扫码登记免费参观

WWW.CIOE.CN

ScanMaster 一揽子激光焊接方案，为动力电池焊接保驾护航

——访问普雷茨特销售总监刘良明先生



普雷茨特销售总监刘良明

文/Rossie Pang

最近几年，受到新能源动力电池、汽车制造等行业应用的驱动，激光精密焊接市场发展快速。并且，随着应用需求的不断提升，对焊接质量的要求也越来越高，不仅要求焊接速度，同时还要求保证焊接质量，避免有焊接不良的产品流入产线，导致生产效率低下和成本的提升。

为了满足焊接市场的需求，普雷茨特在今年的慕尼黑上海光博会上展出了专门针对汽车用户的远程激光扫描焊接系统——ScanMaster。

焊前、焊中、焊后三重质量监测

普雷茨特销售总监刘良明介绍说，ScanMaster 以振镜为基础，是针对动力电池连接片焊接提供的一揽子激光焊接解决方案，它从焊前、焊中和焊后三个环节实时监测焊接质量，及时修正或剔除不良产品。

电池连接片通常比较薄，厚度通常在 0.2mm 左右，焊接过程中使用夹具，会很容易导致连接片变形、位置偏差等，进而会导致焊接位置不准确。ScanMaster 通过视觉定位、OCT 光学测量等功能，对工件位置的 XYZ 三个方向做全面的评估，再根据位置的偏离情况相应地通过振镜调节光束，以补偿位置上的偏差，确保光束焦点能精准到达工件上需要焊接的位置，实现精准焊接。

在焊接过程中，ScanMaster 也可以对焊接品质做一个全面实时的评估。这部分功能主要是借助光电半导体技术，把焊接过程中产生的等离子体、背光反射和热辐射这三个信号收集起来，做一个综合的实时评估，从而判断出焊接的品质是否合格。被焊接的工件中是否有虚焊、离焦量变化、凹坑、气孔等缺陷，都可以在焊接过程中实时被检测出来。这个过程是实时监测焊缝内部的一些缺陷情况，以便及早将这些不良工件剔除，确保不良工件不流到下游厂商。

待工件完成焊接后，ScanMaster 还可以通过机器视觉系统，对焊缝的位置、长度、宽度等外观指标进行全面评估，这也是保证焊接质量的一个辅助环节。这个环节主要是监测被焊接后的工件表面质量是否合格。

ScanMaster 作为激光焊接的一揽子方案，就是通过焊前精密位置保证、焊中内部缺陷实时监测和焊后外部缺陷监测，这三个环节，来保证焊接质量的。

速度与成本优势

刘良明介绍说，ScanMaster 的一个最突出特点就是效率高，而对于动力电池制造厂商而言，效率正是他们在选择焊接方案时要考量的一个关键因素。ScanMaster 在视觉定位、OCT 测量定位方便效率非常高，以某主机厂电池为例，能够做到在 10ms 内定位 6 个连接片。这个速度大约是市场上同类产品的 10 倍，在面对众多焊缝需要焊接的应用场景中，ScanMaster 的优势就非常明显了。

另外，ScanMaster 提供的是包括了焊前、焊中和焊后的一揽子解决方案，相比于市场上通过多家厂商提供的组合方案，总体上来讲，对客户的成本方面也是有优势的。

另外，对于用户担心的使用是否方便的问题，刘良明介绍说，应用简单便捷是 ScanMaster 的另一个亮点。整个操作系统就类似于一个应用 APP，配备了简单的拖拽式触摸屏，用户不需要任何专业知识，很短时间就可以上手操作。

最后，刘良明总结说，激光焊接往往是很多生产工艺中的最后一步，而很多前期隐藏着的工艺问题，通常会在焊接这个环节中都暴露出来。这时候，客户最期望监控设备能够将“发现问题、定性问题、定量问题并解决问题”这四个环节，形成一个闭环控制方式。虽然目前还没有产品能够满足这种闭环控制的期望，但是业界正在努力尽量从焊接过程本身入手，少出问题甚至不出问题；这里有激光技术自身发展的贡献，比如环形光斑技术有助于提升焊接品质，而 ScanMaster 则是从焊前、焊中和焊后三个环节去实时监控焊接质量，一旦发现问题及时剔除止损，保证焊接质量。❑

突破2μm光纤激光器高功率限制，实现更多应用可能

——访光库科技常务副总经理兼工程副总吉贵军博士



光库科技常务副总经理兼工程副总吉贵军博士

文/LFWC

光库科技从事光纤器件的研发和生产方面拥有多年的丰厚经验，多年来其产品赢得了市场的充分认可，并且还参与了大型海底光缆建设和我国的嫦娥探月工程，取得了不俗的成绩。在当今的 5G、无人驾驶、物联网、人工智能等新兴产业快速发展的环境下，光库科技将如何迎接新的市场需求？接下来将会有什么发展策略，能满足市场的哪些需求？对此，本刊（以下简称 LFWC）采访了光库科技常务副总经理兼工程副总吉贵军博士，请他分享了光库科技在技术和市场方面的发展规划。

LFWC：请简单介绍一下光库科技的发展历史，以及公司对自己在市场上的定位。

吉贵军：光库科技是专业从事光纤器件和芯片集成的国家高新技术企业。高管团队由激光、芯片及光通讯领域内国际顶尖人才组成。公司产品应用在光纤激光、光纤通讯、量子技术、5G、数据中心、无人驾驶、光纤传感、医疗设备、科研等领域，市场遍布 40 多个国家和地区。

2017 年公司在创业板上市（股票代码：300620），建有省光电器件工程技术研究中心、省企业技术中心、院士工作站、博士后工作站等创新平台，专利技术超百项。光库科技是全球仅有的几家海底长途光网络和量子通讯网络核心器件供货商；为嫦娥探月工程提供多款高可靠性光纤器件。公司新成立的光子集成事业部，专注于光学芯片和集成模块的研发及产业化。

LFWC：随着光纤激光器功率的提高，对光隔离器提出了哪些新要求？在设计生产上面临的新挑战？光库科技在技术和生产制造等方面的优势有哪些？

吉贵军：光纤隔离器作为光纤激光系统中的卫士，能防止光路中由于各种原因，产生的后向传输光对光源以及光路系统的不良影响。

随着光纤激光器输出功率越来越高，对光纤隔离器的功率负载能力需求也越来越高，并且要求在高功率条件下仍能保持良好的综合性能。然而，用于制作隔离器的光学材料不可避免地存在固有吸收损耗，功率越高意味着被吸收的光功率越多，被吸收的光功率通常都会转化为热量，而冗余的热量往往会导致隔离器核心参数的急剧恶化，例如隔离度、插入损耗、光束质量等，同时更高的功率代表着更高的激光损伤风险。

因此，高功率条件下核心参数的恶化和光学元件的激光诱导损伤，是设计和生产高功率隔离器时所面临的主要挑战。光库科技在高功率隔离器的设计和生产上积累了大量的专利技术和丰富经验，多次获得行业权威大奖的 SteadiBeam® 技术，以行业首创的专利技术解决了困扰行业多年的热透镜效应。此外，光库科技还拥有拓展隔离器工作温度范围的 SeasonBeam™ 技术、提高包层光隔离度的全角隔离技术等专利技术，以及材料选择、高功率膜层设计和加工、热管理等多项优势技术。

LFWC：市场对 2μm 器件的需求增长点有哪些？光库科技在 2μm 器件领域的新产品？其实现了哪些新突破？

吉贵军：2μm 光纤激光器在人眼安全、雷达、激光医疗、光电对抗以及特殊材料加工等领域具有重要应用。传统获得该激光的方法一般是通过频率变换，效率低且输出功率不高，制约了很多应用的拓展。近年来，采用单腔光纤激光器的方式直接获得 2μm 激光输出，逐步成为主流。这种方式效率高且输出功率高，目前功率已达百瓦量级，应用面越来越广。

光库科技在 2021 年推出了 2μm 光纤激光器的全系列器件，包括光纤隔离器、合束器、光纤光栅、激光输出头等核心器件新品。高功率 2μm 的器件不同于常规的 1μm 器件，材料对该波长的激光吸收较强，因此很容易发热，要实现高功率非常困难。

光库科技在材料选择、热管理技术、热补偿技术上做了大量工作，突破了这个限制，推出了高功率新品。对中红外光纤激光行业来说，是一个令人兴奋的消息。接下来，光库科技一方面会继续提升功率承受能力，另一方面会拓展更多波长，为客户提供更多更好的产品。

LFWC：随着中国制造业的发展，激光加工应用日益增多。激光加工应用的增多，将会从哪几个层面推动光库科技的业务增长？

吉贵军：首先是目前已经得到长足发展的高功率光纤激光市场，包括用于打标、清洗的脉冲光纤激光器，以及用于钣金切割、焊接等的连续光纤激光器，每年都以很快的速度在增长。在此过程中，对核心器件的需求非常大，这将会推动公司业务的快速增长。

此外，一些细分市场，如中红外光纤激光、可见光光纤激光、超快激光等，正广泛应用于半导体晶元、玻璃及其他透明材料的加工、科研、医学等领域。其中，超快激光是特别值得期待的应用领域之一。在中国，由消费电子产品加工带来的超快激光微加工应用需求量将大幅增加。光库科技生产的自由空间隔离器、合束器、环形器、CFBG、隔离器等产品，依靠过硬的质量及稳定性，助力中国超快激光应用快速发展。脉冲展宽器这类产品，长期以来一直掌握在国外公司手中，制约着国内厂商的发展。光库科技推出的 CFBG，填补了国内空白，赢得了客户的广泛支持与行业认可。这些将会持续推动公司业务的发展。

LFWC：除了工业激光加工应用，当下发展火热的无人驾驶、5G 等热点应用，让光库科技看到了哪些新的市场需求？对此光库科技会有哪些举措？

吉贵军：无人驾驶技术在人工智能和汽车行业的飞速发展下，逐渐成为业界焦点。无人驾驶的关键实现技术之一就是激光雷达，其识别精度和速度均优于传统实现方式。激光雷达需求将会随着全球无人驾驶市场渗透率的提高，在未来数年内进入快速增长期。

5G 技术将推进物联网、云计算、大数据及 AI 等关联领域裂变式发展，赋能垂直行业并深度融合，形成 5G 大生态。作为 5G 的支撑，光纤、光缆、光模块、WDM 器件等将迎来巨大市场机遇。

数据通信用光收发模块和硅光模块，向高速和高密度发展，市场需求旺盛；应用于光模块的高端连接器和微光学连接产品，将迎来很大发展空间。在光学芯片领域，光库科技生产的 400/600G 铌酸锂相干调制器、20/40GHz 模拟调制器、有线电视用双输出模拟调制器、10Gbps 零啁啾强度调制器等，广泛用于超高速干线光通信网、海底光通信网、城域核心网、CATV 网络、测试及科研等领域，是目前超高速调制器芯片和模块产业化、规模化领先的三家公司之一。

在数据通讯领域，光库科技的核心竞争力在于光学组件的先进制造和封装技术、高速光学连接组件的设计能力，以及对定制产品批量生产的快速转化能力。公司致力于研发生产高端光纤连接产品、微光学连接产品、保偏光纤阵列和高密度光纤阵列，主要应用于 40G、100G、400G、800G 等高速、超高速光模块、相干通讯和 WSS 模块中，并成为多家大型数据通讯公司的核心供应商。

LFWC：2018 年光库科技收购加华微捷科技有限公司，是出于什么考虑？

吉贵军：加华微捷在高速数通光收发模块中所需的微型连接产品技术，处于相对领先的地位，未来增长潜力较大。公司通过本次收购，可以进入高速发展的数据中心和云计算产业链，扩大公司的战略布局。收购加华微捷有利于公司拓展新的业务领域，引入新的专业团队，丰富公司产品线，助力未来发展。

LFWC：您如何看待目前国际大环境的发展？中美贸易关系之间的摩擦，对国内厂商带来的机会和挑战？

吉贵军：中美摩擦，暴露了国内某些产业链依赖进口成品的结构性缺陷，遇到不少“卡脖子”的困境，给国内众多厂商带来了危机感。近年来，国内各大企业纷纷将目光转向国内市场，刺激了内需，推动了国内各领域的产业发展。光库科技将发展重心放在研发生产上，积极践行高端芯片与器件的国产化，填补国内空白。

LFWC：接下来，要把握住市场机会，公司在发展策略上有什么部署及规划，以继续在行业中保持领先地位？

吉贵军：未来通信网络的升级、数据中心的广泛建设、5G 带宽需求增强，将使光通讯器件行业保持快速增长。光通讯器件作为光网络设备的重要组成部分，其行业发展与光网络设备行业紧密相关。光库科技基于在高功率器件、保偏产品和光纤金属化方面的多年沉淀，加大了产品研发和设备投入，以提高光通讯器件的集成性、先进性和量产能力。在数据通讯领域，公司快速响应客户的新需求，重点开发了高精度多维光纤阵列等系列产品，加大了光通讯有源器件的生产和销售开发力度，不断加大生产自动化投入，大幅提升了光通讯产品的量产能力。❑

2μm激光器

飞博激光推出的2μm激光器，波长1980nm/1940nm，工作模式有连续(CW)和准连续(QCW)两种可选，功率稳定性做到了＜2%和5%，可靠性得到了有力保证。100W以上机型的尺寸由原来的500mm×482mm×177mm升级为650mm×440mm×133mm，体积减少了11%，节省集成所需的空间。



2μm掺铥激光器具有100μm的组织吸收深度，损伤范围小于1mm，采用石英光纤输出；大多数塑料材料显示吸收峰约2.0μm，2μm激光在非金属材料进行切割、焊接和标记的应用方面非常有吸引力；科研领域，在连续或脉冲模式下的高功率掺铥光纤激光器，也是中红外波段非线性研究的理想泵浦源。

飞博激光，www.feibolaser.com

FemtoYL 2系列飞秒激光器

安扬激光推出的FemtoYL®2系列激光器，是基于最新的全光纤碳纤维飞秒激光器架构，模块化设计，适应工业7x24小时生产需求和前沿科学研究。



FemtoYL 2-100能够提供100W的总功率，400fs的最小脉冲宽度，300μJ的单脉冲能量和25kHz~5MHz的重复频率。该激光器光斑模式好，脉冲能量稳定性高，能够适用于材料的微纳加工、显示材料切割、脆性材料切割、MEMS生产以及集成光子学等众多加工领域。

安扬激光，www.yslphotonics.com

MCO系列能量可调微片激光器

杏林睿光自主研发生产的MCO系列RealSubns能量可调微片激光器，内置调节能量的电控模组，光触发输出模块，以及激光驱动电路，结构小巧紧凑，即插即用，可选择空间输出或者光纤耦合两种输出方式。



激光器脉宽＜1ns；峰值功率可达100kW；1~200Hz重频可调；激光能量可通过上位机调节；光触发输出信号抖动＜100ps；全密封设计，高可靠性。该产品可应用于激光雕刻、激光诱导击穿光谱、激光光致发光、激光打标、激光捕获显微切割、激光诱导荧光、激光质谱、激光紫外显微光学、拉曼光谱检测、激光雷达、激光薄膜刻绘、半导体检测、声光成像、激光遥感等诸多领域。

杏林睿光，www.real-light.com

LaserNest一体式高性能半导体激光器

LaserNest是针对科学研究实验应用的一款高灵活性、高性能的一体式半导体激光器，即插即用。



可以配置紫外到近红外波段的激光器模块。LaserNest可以提供高达3MHz的快速模拟调制和高达250MHz的快速数字调制。同时增加电子快门功能，具备完整的开关调制功能，开关时间＜1μs，频率高达500kHz。可以配备单模（PM）光纤，多模光纤或者液体光波导输出。

LaserNest内部为LuxX+激光模块，其中输出功率可达500mW以上，在375~1550nm光谱范围内有30多种不同波长可选。典型应用包括显微镜、荧光分析和作为分析过程的光源使用。

顶尖科仪，www.psci.cn

30W飞秒激光器

全新1030nm高功率飞秒激光器，可提供高达100μJ能量和60W平均功率的脉冲；可在一定温度范围内运行，并且比其他替代性自由空间系统更能承受振动和运动，从而增强了其耐用性和多功能性。



凭借真正的单片化的全光纤前端结构，使其易于操作、预热快、稳定性高。该超快激光器可在高功率和高脉冲能量的同时，保持超短脉冲的持续时间。该激光器广泛应用于微加工、LCD和OLED显示器维修、玻璃和其他材料的精确切割、表面结构化，冷烧蚀和眼科等领域。

新特光电，www.sintecoptronics.com

22kW激光切割机

邦德激光推出的22kW万瓦激光切割机，采用光电模块分离设计，运行稳定。同时该激光切割机光斑能量平顶



Advanced Manufacturing Conference
世界先进制造业大会

AMTech 2021
中国国际先进制造技术展览会

- 精密金属切削技术
- 精密成型制造技术
- 数字化转型技术及解决方案

塑造制造业未来

www.amtech-china.com

同期主办: AMC世界先进制造业大会

2021年10月11-14日 | 深圳国际会展中心（宝安新馆）

100+	500+	60000+	60000㎡
合作媒体	参展商	专业观众	展出面积

主办单位

CCPIT-MSC | 中国国际贸易促进委员会机械行业分会
GHM-AMA | 粤港澳先进制造产业联盟
Messe Stuttgart | 德国斯图加特展览公司

联系我们

白雨燕
电话：133 1680 1175
邮箱：baiyuyan@sz-amt.com

分布，集高性能与低成本于一身，综合性能最高可提升 20%，批量加工更稳定，亮面效果更佳。



该激光切割机搭载了独特创新的硬件级抗高反射保护技术，可加工多种高反材料。针对不锈钢材料，加工厚度 10mm 以下的薄板时，效率可提升 10% 以上；加工厚度 12mm 以上的中厚板材料，效率可提升 20% 以上；针对碳钢材料，加工厚度达 20mm 以上的板材时，效率可提升 5% 以上。

邦德激光，www.bodor.cn

脉冲式激光测照器

长春新产业推出的脉冲式激光测照器，拥有高能量、高稳定性、窄脉宽激光光源，激光发射频率为 20Hz，测距精度为 ±1m，测距盲区为≤150m，连续工作时间超过 10 分钟，环境适应性强为 -40~+60℃。结构紧凑，外观尺寸为 288mm × 143mm × 99mm。



在该激光测照器中，编码器可镶嵌于激光器控制系统内，通过控制软件进行操作；也可单独外置形成编码器盒，以配件形式存在。在随机码模式下，激光器在该重频占空比限制下随机输出相邻两激光脉冲的时间间隔。

长春新产业，www.cnilaser.com

CoLID Mini型短脉冲激光雷达光源

上海瀚宇推出的 CoLID Mini 型短脉冲激光雷达光源，是一款基于人眼安全波长的高峰值功率、高脉冲能量输出的激光光源。经过优化设计的光放大，可实现高峰值功率、高重频、ns 级的脉宽激光输出，脉冲质量优秀。



该激光雷达光源结构紧凑，体积小巧（70mmx70mmx25mm），工作温度范围宽，延时抖动低，具有超低的功耗水平，广泛应用于汽车激光雷达、激光测距、遥感测绘雷达、激光 3D 扫描以及其他科学研究领域。

上海瀚宇，www.shconnet.com.cn

高脉冲能量、高重复频率的准分子激光器

OptoSystems 公司最新推出的高脉冲能量、高重复频率的准分子激光器，包括脉冲能量 800mJ 的 CL7700 系列，脉冲能量高达 1J 的 CL7X200 系列，重复频率高达 6000Hz 的 DC4000 系列。CL7700 系列专为 PLD 应用开发，CL7X200 系列主要适用于半导体激光退火及 PLD 应用，DC4000 系列适用于无掩膜光刻，激光剥离及微加工应用。OptoSystems 公司通过一贯的陶瓷腔设计，大大提高了系统的能量稳定性和使用寿命。

脉动科技，www.pulsepower.cn

iLAM®系列环境箱激光智能增材制造系统

辉锐自主研发的 iLAM 系列环境箱机器人激光熔覆设备，配备光纤 / 半导体激光器，激光功率 0.5~10kW。采用高精度六轴工业机器人或 CNC，重复定位精度达到 ±0.03mm。采用辉锐专业自动送粉器和高汇聚度喷嘴，可精确控制送粉质量流量达 ±2%，满足高精度零件修复和成型需求。



机器人加工时，会根据加工路径中的光斑大小，通过模拟量，对激光熔覆头上的电动准直调节模块进行控制，输出指定光斑大小，光斑可调范围 0.2~3mm。该产品已经用于镍基高温合金、钛合金、铝合金、钴基合金以及高强钢等金属材料的增材修复与 3D 打印。

辉锐集团，www.huirui-tech.com

多通道FZW波长计

FZW 是一款精密紧凑型的波长计，可在 350~1120nm 宽范围内测量，绝对精度优于 600MHz。采用独立显示器，以太网、USB 接口以及 PID 锁定都是标准配置。FZW 每秒测量值高达 350 个，可在显示器或者电脑上绘制时间序列测试值。通过简单的命令文本，或者 LabView、Python 和 Matlab 包装器，易集成于通用的实验室数据采集系统。



可以配置 FSW 多通道附件，其具备 4 个或者 8 个输入口和 4 个或者 8 个模拟输出口，可以测量高达 8 个激光器。通过FSW 上面的按钮或软件进行选择需要测量的波长通道。

顶尖科仪， www.psci.cn

MedTechWorld

Medtec China

Technology · Networking · Education

专注于医疗器械设计与制造技术的展览会

专注于医疗器械设计与制造技术的展览会
Exhibition Dedicated to the Design & Manufacturing of Medical Devices

2021.9.1-3

上海世博展览馆

Hall2 & Hall4



500+参展企业

40,000+参观人次

1,700+参会代表

80+会议活动

关注官方微信公众号
预登记参观赢好礼

▪ 参展咨询:

Linc Cai 蔡锋　　电话:+86 21 6157 7217　　邮箱:Linc.cai@informa.com

▪ 参观咨询:

Carina Li 李娜　　电话:+86 10 6562 3308/3307　　邮箱:Carina.li@informa.com

informa markets

www.medtecchina.com

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Amonics Ltd.		www.amonics.com	7
AMTech & AMC2021		www.amtech-china.com	37
Ante Laser	安特激光	www.antelaser.com	17
BWT	凯普林	www.bwt-bj.com	25
CIOE 2021		www.cioe.cn	32
爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司		www.edmundoptics.cn/051-8611	13
苏州长光华芯光电技术股份有限公司		www.everbrightphotonics.com	11
西安炬光		www.focuslight.com	9
Mean Well	明纬	www.meanwell.com.cn	27
Medtec China 2021	第十七届Medtec中国展暨国际医疗器械设计与制造技术展览会	www.medtecchina.com	39
数控机床与金属加工展		www.metalworkingchina.com	28
LASERFAIR SHENZHEN 2021	第十五届深圳国际激光与智能装备、光电技术博览会	www.laserfair.cn	IBC
Santec		www.santec.com.cn	1

文章投稿指南

《激光世界》不发表公然推销某一具体产品或服务的文章。只有文章内容需要或与主题相关时，才可偶尔提及某一具体产品。

具体要求

1、最好配两幅以上相关图表。
2、应在预定发表日期之前一个月投到编辑部。
3、切勿一稿多投。
5、编辑部有权修改稿件。作者或供稿公司如需在出版前确认修改后的稿件，请事先声明。
6、请留下作者的各种联系方式。

发布新产品投稿指南

1、请清晰地写明新产品的名称、型号、功能、独特之处和用途等。
2、请附上产品照片。照片的分辨率不低于300dpi，大小不低于100万像素。最好是在单色背景下的简单的产品实物照片。
3、请提供能查阅产品更多信息的网址。
4、写清负责答复读者咨询的人员的姓名和联系方式。
5、写清能提供进一步信息的人的姓名、电话、e-mail。
6、本刊有权决定稿件录用与否。编辑部有权修改稿件。
7、本刊收到的稿件会在最近的一期发表，时间最长会延迟2个月。当提供对时间敏感的信息时，请注意预计发表的时间。
8、出版日期前5天截稿。

请将您的新闻或文章E-mail至庞会荣女士 Rossie Pang, E-mail:rossiep@actintl.com.hk,电话：13641292731

行政及销售人员 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

HK Office (香港办公室)

ACT International (雅时国际商讯)
Unit B, 13/F, Por Yen Building,
No. 478 Castle Peak Road,Cheung Sha Wan, Kowloon, Hong Kong
Tel: 852 2838 6298

Publishing Director (出版总监)
Adonis Mak (麦协林)
adonism@actintl.com.hk

Editor-in-Chief (总编辑)
Rossie Pang (庞会荣)
rossiep@actintl.com.hk

US Offices

ENEADOR Business Media, LLC
61 Spit Brook Rd, 5th Floor Nashua, NH 03060
Group Publisher
Paul Andrews
pandrews@endeavorb2b.com

Editor in Chief
John Lewis
jlewis@endeavorb2b.com

销售人员 Sales Offices

China (中国)

Hong Kong (香港特区)
Floyd Chun (秦泽峰)
floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

Shanghai (上海)
Sales Director-China (中国区销售总监)
Hatter Yao (姚丽莹)
hattery@actintl.com.hk

Amber Li (李歆)
amberl@actintl.com.hk
Tel: 86 21 6251 1200

Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyl@actintl.com.hk

Gavin Hua (华北平)
gavinh@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8573 / 2598 8567

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86 10 8484 4007

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86 137 2373 9991

Eva Liu (刘婷)
eval@actintl.com.hk
Tel: 86 138 8603 3073

Grace Zhu (朱婉婷)
gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267

Asia (亚洲)

Japan (日本)
Masaki Mori
masaki.mori@ex-press.jp
Tel: 81 3 6721 9890

Taiwan, Singapore, Malaysia (台湾，新加坡，马来西亚)
Regional Sales Director
Floyd Chun (秦泽峰)
floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

North America (北美)

East & Central
Jeff Nichols
jnichols@endeavorb2b.com
Tel: 1-413-442-2526

West & Mountain
Anne Marie St.John-Brooks,
amstjohn@endeavorb2b.com
Tel: 510.606.0630

Europe & Middle East (欧洲及中东)

Europe
Holger Gerisch
hgerisch@endeavorb2b.com
Tel: 49(0)8801 9153791

Israel
Dan Aronovic
aronovic@actcom.co.il
Tel: 972-9-899-5813



Deutsche Messe · XZQ · Deutsche Messe · FIERA MILANO · 广东省激光行业协会 Guangdong Laser Industry Association

LMN

世界激光制造大会

赋能智造 · 光耀未来

2021年6月29日-7月1日

与国际大咖共话世界前沿激光技术

中国·深圳国际会展中心（宝安新馆）

www.world-laserconference.com

即刻报名：享广告赞助”早鸟”优惠

扫码关注

LMN 世界激光制造大会

更多详情等您来了解

www.world-laserconference.com

电话：0755-23207500

E-mail: jinrong.cai@hmxzq.com

电话：021-20557020

E-mail: joyce.wang@hmf-china.com

LaserFocusCon
激光聚会 2021

从困境中崛起，探寻市场发展新商机

尽管受到全球局势和疫情的影响，但是中国经济依然保持了正增长。相对困难的发展环境，只是在短期内妨碍了中国制造业的发展，困境很快转变为制造业向高端转型过渡的一个驱动力量。越来越多的中国制造企业开始向更高级的自动化、智能制造、无人车间等方向发展，当然激光技术的部署自然是少不了的一环。

从打标、切割和钻孔，到焊接、修复和增材制造，激光技术正在制造业中得到越来越广泛的应用。由雅时国际商讯旗下的《激光世界》杂志举办的 LaserFocusCon 激光研讨会，将于 2021 年再次走进苏州、深圳。届时，我们将诚邀业界同人共同探讨激光技术的新进展、激光技术在制造业中应用成果，以及为制造业带来的切实好处。

大会主题（拟定）

4 月 23 日 苏州场

- 超快激光在脆性材料加工中的应用
- 蓝光 / 绿光在高反射金属焊接中的应用
- 激光精密焊接与实时质量监控技术
- 运动控制技术在激光精密加工中的应用
- 高功率半导体激光器的发展及直接应用
- 激光金属增材制造技术及应用
- CO_2激光加工技术的新应用机会
- 新基建、智能制造为激光加工带来的新机遇

8 月 18 日 深圳场

- 激光在全面屏制造中的应用
- 超快激光在精密 PCB/FPC 加工中的应用
- 精密运动控制在 3C 制造领域的应用
- 蓝光 / 绿光在高反金属焊接中的应用
- 激光精密焊接与实时质量监控技术
- 激光焊接在新能源电池制造中的应用
- CO_2激光加工技术的新应用机会
- 新基建、智能制造为激光加工带来的新机遇

会议规模

目标人数：200-220名技术和管理人员

会议咨询

如有问题，可添加“小镭助手”微信号“LFC-RA”进行咨询

小镭助手微信

激光技术聚焦峰会

主办单位

ACT

大会媒体

激光世界 LaserFocusWorld China

LaserFocusCon