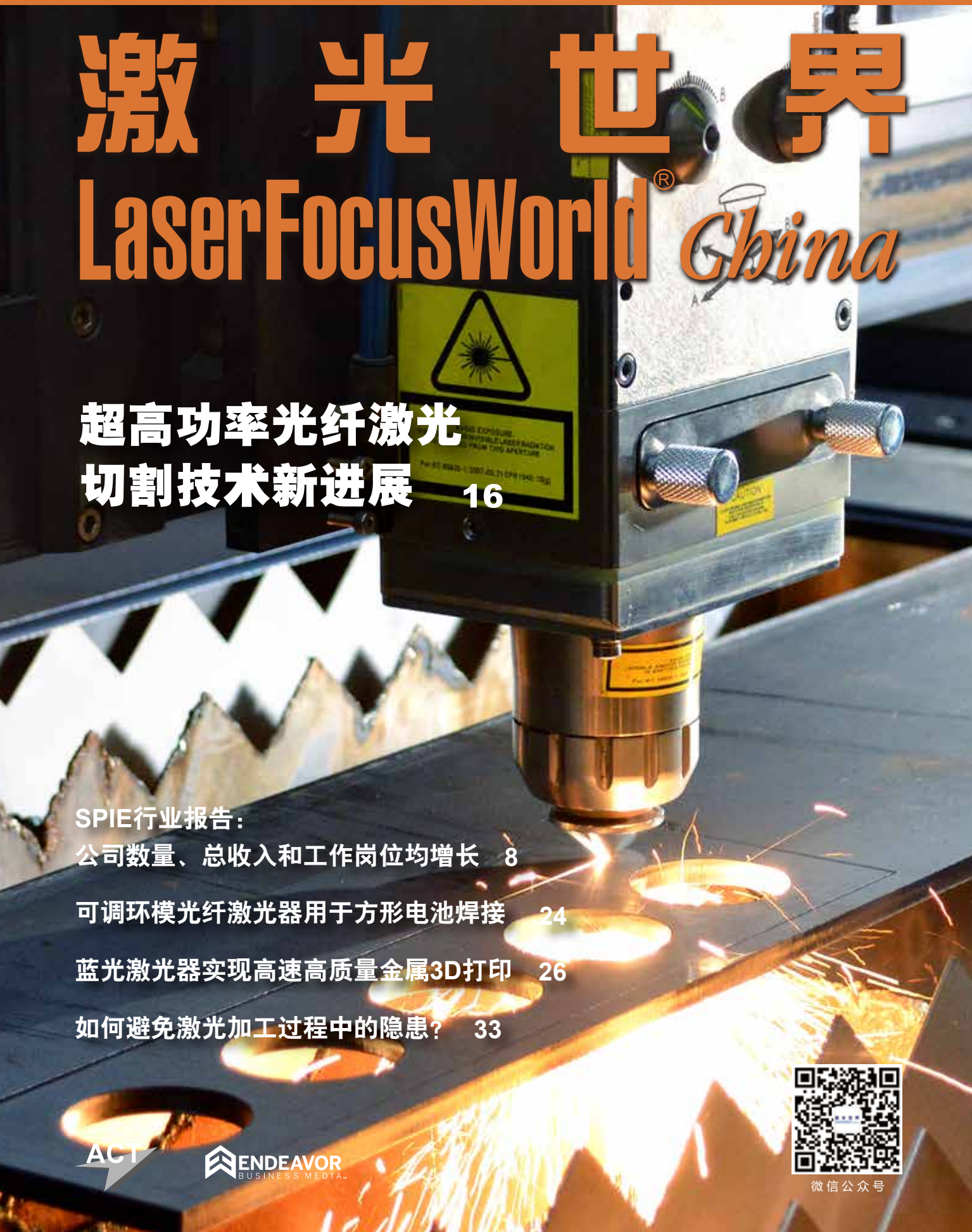
光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2022年11/12月 第6期
ISSN: 1817-6917

# 激光世界
# LaserFocusWorld® China



## 超高功率光纤激光切割技术新进展 16

SPIE行业报告：
公司数量、总收入和工作岗位均增长 8

可调环模光纤激光器用于方形电池焊接 24

蓝光激光器实现高速高质量金属3D打印 26

如何避免激光加工过程中的隐患？ 33

ACT
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

微信公众号




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

2022年11月30日-12月4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
汉诺威米兰展览(上海)有限公司

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 7138/7140

扫一扫
关注微信公众号

SCIIF 华南国际工业博览会
华南国际工业博览会
深圳国际会展中心

CDIIF 成都国际工业博览会
成都国际工业博览会
中国西部国际博览城

Smarter Motion

# 为激光加工系统制造商提供
# 更智能的运动控制解决方案




## 全新
## 激光控制接口 (LCI)

- 可以集成至任何SPiiPlus EtherCAT® 的运动控制系统
- 提高先进激光加工设备的吞吐量和精度
- 将激光脉冲同步到亚微秒级的延迟和抖动的运动

*EtherCAT®* 是德国Beckhoff Automation GmbH 授权的注册商标和专利技术

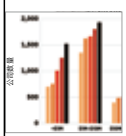
ACS MOTION CONTROL

ACS Motion Control (China) | 中国上海肇嘉浜路798号301室 | +86 21-54830819 | sales-china@acsmotioncontrol.com



16 封面故事
激光切割
超高功率光纤激光切割技术的最新进展
超高功率光纤激光器能够实现快速且高质量的厚板切割，包括用空气辅助切割不锈钢，并具备许多优于其他切割方案的优势。

## 市场观察

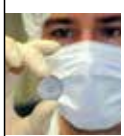


8 SPIE行业报告：光子学行业的公司数量、总收入和工作岗位，均呈增长态势
SPIE发布的最新行业报告显示，光学和光子学领域的很多方面，都已经取得了重大里程碑式的增长。

## 技术中心

9 PIC

光子集成电路为自动驾驶铺平道路
FMCW LiDAR中的传感器，必须价格可接受、结构紧凑、功能强大且可靠。光子集成将通过大规模生产来实现这项技术的产业化。

11 超快光学元件

适用于阿秒极紫外激光的高精度多层反射镜
用于极紫外（EUV）激光器的阿秒光学元件的设计，应该能最大限度地控制脉冲的中心波长/能量、光谱形状、光谱相位和脉冲持续时间。

14 新型激光器

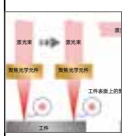
单模半导体激光器在尺寸和功率上实现可扩展性
通过在半导体膜上穿孔形成一个可扩展的激光腔，消除了激光的高阶模式，实现了单一模式的高功率激光输出。

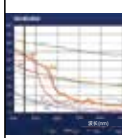
4 编者的话
5 前沿简讯
37 产品撷英
40 广告索引

## 工业激光专栏

21 激光切割

超高功率激光切割市场继续发展
激光切割市场在激光工业应用中占据最大的市场份额。近年来，随着对中厚板切割需求的增加，激光切割市场呈现出了可喜的增长势头。

24 激光焊接

可调环模光纤激光器实现方形电池罐-盖的高速、高质量焊接
方形电池的罐-盖焊接在大批量生产中面临挑战。焊接必须经济可行，并且要达到气密性要求，保证电池在整个生命周期内可靠工作。

26 增材制造

蓝光激光器提升金属3D打印的速度、质量和效率
目前正在开发的蓝光激光技术，有望在金属3D打印中，实现更快的打印速度、更高的打印分辨率和更好的打印质量。

30 增材制造

光束整形技术将激光粉末床熔融技术带向新维度
光纤激光器光束整形技术，能够显著提升金属激光粉末床熔融技术的打印速度和工件打印质量，并大幅降低成本。

33 光束测量

如何避免激光加工过程中的隐患？
为了确保高质量的激光加工，需要特别注意激光系统中存在的六大隐患。测量激光器的性能是避免这些隐患的最佳方法之一。

**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



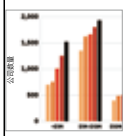
## 16 COVER STORY

Laser Cutting

### Advances in cutting with ultrahigh-power fiber lasers

Ultrahigh-power fiber lasers enable fast, high-quality thick cutting, including air-assist cutting of steels, and offer many advantages over other cutting options.

## MARKET WATCH

8 **SPIE Industry Report shows marketplace growth**

The optics and photonics community has hit significant milestones in the latest industry report from industry association SPIE.

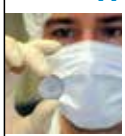

## TECHNOLOGIES CENTER




9 PIC

**Photonic integrated circuits pave the way for autonomous mobility**

Sensors in FMCW LiDAR must be affordable, compact, highly competent, and reliable. Photonic integration will achieve the industrialization of such technology on a mass-production level.



11 Ultrafast Optics

**Attosecond extreme ultraviolet lasers demand high-precision multilayer mirrors**

Attosecond optics for extreme ultraviolet (EUV) lasers should be designed for maximum control of the central wavelength/energy, spectral shape, spectral phase, and pulse duration.



14 Novel Lasers

**Single-mode semiconductor laser scales in size, power**

By creating a scalable laser cavity out of a semiconductor membrane perforated with tiny, which able to systemically eliminate higher-order modes from lasing, and achieve powerful single mode laser output.

4 EDITOR'S NOTES

5 LEADING EDGE SNAPSHOTS

37 PRODUCTS HIGHLIGHTS

40 AD INDEX

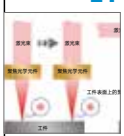

## INDUSTRIAL LASER COLUMN




21 Laser Cutting

**Ultrahigh-power laser cutting continues growth path**

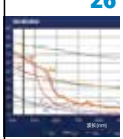
The laser cutting market occupies the largest share among many industrial applications. Laser cutting has seen considerable growth with the increased demand for laser cutting machines for medium-thickness sheet metal.



24 Laser Welding

**Advances in laser welding prismatic battery: Can to cap**

Prismatic battery can-to-cap welding presents challenges in high-volume production. Welds must be economically viable and deliver a hermetic seal to ensure the battery can work reliably throughout its life cycle.



26 Additive Manufacturing

**Blue industrial laser brings speed, quality, and efficiency to metal 3D printing**

Blue laser technology currently under development will support the future expansion of additive manufacturing by delivering high resolution and high quality at higher print speeds.



30 Additive Manufacturing

**Beam shaping technology brings laser powder bed fusion technology to a new dimension**

Fiber laser beam shaping technology can significantly improve the printing speed and printing quality of metal laser powder bed fusion technology, and greatly reduce the cost.



33 Beam Measurement

**How can you avoid manufacturing pitfalls in laser processing?**

Here are six industrial laser system pitfalls to look out for to ensure a high-quality laser process. Measurement of your laser's performance is one of the best ways to accomplish these goals.


**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.

# 超高功率光纤激光驰骋金属切割市场

激光作为一把刀削铁如泥的刀，继续在金属切割市场大显身手，特别是在厚金属板切割领域。以前，厚金属板的切割大多采用 $CO_2$ 激光器或等离子切割，随着光纤激光器的功率不断飙升，万瓦级超高功率光纤激光器以更加高效的切割方式，逐渐发展成为厚金属切割领域的主力军。

在过去的 3 年中（2019-2022），切割设备中使用的光纤激光器的最大功率增长了 2.5 倍；而在过去的 6 年中（2016-2022），切割设备中使用的光纤激光器的最大功率增长了 7 倍！今年 8 月份，创鑫激光发布的 50kW 高亮度光纤激光器，将超高功率光纤激光切割应用推向了一个新高度。据悉，龙雕激光研制的 50kW 激光切割设备，已经在无锡义祥不锈钢工厂内交付投产使用。除了切割速度提升带来的明显优势外，50kW 激光能在不同辅助气体工艺下大幅提升厚板切割能力：能实现 30~50mm 碳钢空气高质量切割；切割不锈钢，空气 / 氮气切割极限厚度达到 300mm，氧气切割极限厚度达 100mm。

超高功率光纤激光器正在改变钢材切割的方式，使用空气辅助切割工艺取代氮气和氧气切割工艺，也能实现高品质、高速度且经济的切割方式。在本期的封面故事中（p16），IPG 给出了在不同功率下，利用空气辅助进行碳钢无渣切割的切割速度情况，并且比较了利用氧气、氮气和空气切割碳钢的优缺点。

据耶路撒冷的一家高功率光纤激光器生产商 Civan Lasers 表示，可以使用 100kW 单模激光器切割和焊接厚度达 50mm 及以上的金属，这种激光器的光束直径可调，两种应用可以使用同一台设备实现，大幅减少生产成本（p21）。激光领域的一些领先厂商也都在纷纷开拓高功率金属切割市场，比如德国通快公司、nLight 公司、普雷茨特等公司，都针对这一市场提供了相应的产品和解决方案。

光纤激光器功率的不断增加，大大提高了激光切割技术的适用性和生产效率，同时在加工质量方面也不逊色，这对于铁路、重机械、钢铁制造等众多需要使用厚金属板材的行业而言，也是一个好消息。随着产业的不断转型升级，激光作为一种先进的加工工具，将在金属加工行业中扮演越来越重要的角色。

虽然过去的一年全球经济大环境并不友好，疫情的反复，局势的动荡，让众多行业都受到了影响，但是从 SPIE 发布的行业报告来看，光子学行业依然表现出了增长态势，无论是从公司的数量、总收入还是工作岗位方面来看，都实现了增长（p8）。

本期还精选了光子集成电路（p9）、蓝光金属 3D 打印（p26）、激光粉末熔融技术中的光束整形（p30）以及光束测量在加工中的重要性（p33）等内容，供读者参考。❑

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 姚丽莹 Hatter Yao
电邮 hattery@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
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
© 2022 版权所有 翻印必究

# 前沿简讯 Leading Edge Snapshots

## 将紫外光转换为红光的薄膜，加速植物生长

日本北海道大学的科学家们开发出了一种基于铕复合物的波长转换材料（WCM），并制成了一种薄膜，它可以加速植物和树木的生长。这项技术可以提高植物生产速度，并可能有助于解决全球粮食供应问题。

植物通过光合作用过程将可见光转化为能量。除了可见光之外，太阳光还辐射紫外光（UV）。在这项研究中，科学家们使用这种薄膜，将紫外光转变为红光，从而为植物提供更多的可见光用于光合作用。

研究人员不仅证明了该薄膜能将紫外光转换为红光，而且他们还表明该薄膜不会阻挡来自太阳的任何有益的可见光。然后他们对该薄膜对植物生长的促进情况进行了测试。

研究人员对日本落叶松树进行了试验。在生长的最初 4 个月，幼苗显示出较高的相对增长率，跟没有使用该薄膜的树木相比，其茎干直径大 0.2 倍，总生物量大 0.4 倍。最重要的是，这使幼苗在一年内就达到了北海道林业种植的标准尺寸。使用这种薄膜可以将树苗的生长周期，从两年缩短到一年，从而使植物生产更具成本效益。



研究人员表示，该技术的可定制性特别有发展前景。“通过使用波长变化材料的涂层，我们得以成功地创建一个透明的薄膜并展示其加速植物生长的能力。通过合理设计发光，我们可以自由控制发射光的颜色，使其成为绿色或黄色等其他颜色，因此我们期望能够创造出针对不同植物类型而优化的波长转换薄膜。这将为下一代农业和林业工程的未来发展开辟一条新道路。”❑

## 国内首条光子芯片产线将于 2023 年建成

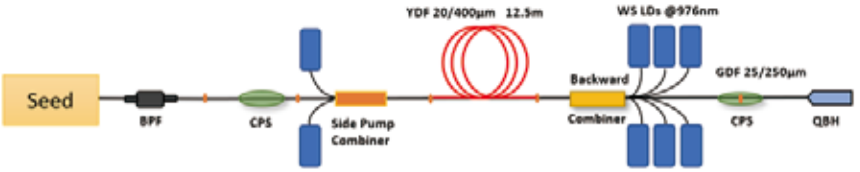
光刻机一直限制国产芯片发展的重要障碍，为了突破限制，国家正在大力发展光子芯片。光子芯片采用光波（电磁波）作为信息传输或数据运算的载体，一般依托于集成光学或硅基光电子学中的介质光波导来传输导模光信号，将光信号和电信号的调制、传输、解调等集成在同一块衬底或芯片上。

据悉，国内首条“多材料、跨尺寸”的光子芯片生产线已在筹备中，预计将于 2023 年在北京建成，可满足通信、数据中心、激光雷达、微波光子、医疗检测等领域的需求，有望填补我国在光子芯片晶圆代工领域的空白。光子芯片是光电子器件的核心组成部分，与集成电路芯片相比存在多处不同。从性能方面来看，光子芯片的计算速度较电子芯片快约 1000 倍，且功耗更低；在材料方面，InP、GaAS 等二代化合物半导体是光子芯片更为常用的材料，而集成电路一般采用硅片；在制备方面，光子芯片的制备流程与集成电路芯片存在一定相似性，但侧重点在于外延设计与制备环节，而非光刻环节。

光子芯片生产线的建成，将在突破芯片卡脖子问题、解决芯片供应问题、以及实现更高速的数据传输与处理等方面，具有重要意义。❑

# MOPA 结构窄线宽激光器突破 5kW 近单模输出

国防科技大学高能激光技术研究所进一步优化种子和放大级结构，采用单级 MOPA 结构实现了 5kW 近单模窄线宽激光输出。




放大器种子为复合腔结构的窄谱振荡器种子，采用后向泵浦，增益光纤采用 20/400μm 双包层掺镱光纤（YDF），两个高反和低反光栅的中心波长约为 1080nm，3dB 带宽分别为 3nm、3nm 和 0.05nm，反射率分别为 99%、50% 和 10%。该结构很好地抑制了振荡器的类弛豫振荡和自锁模脉冲现象，优化了种子的时序特性。另外，在种子和放大级间加入隔离带通滤波器（BPF），有效地减弱了放大级对种子的影响。

种子激光经过包层光滤除器（CPS）注入放大级，功率约 24W。放大级泵浦源为稳波长 976nm 的半导体激光（WS-LD），增益光纤为 20/400μm YDF，光纤长度约 12.5m。输出激光经过 CPS 净化后由光纤端帽（QBH）输出。为有效减弱了系统的 SRS 效应，放大级的后向泵浦合束器、CPS 和 QBH 均采用纤芯 25μm 的传能光纤。另外将 CPS 和 QBH 制作到后向泵浦合束器的输出尾纤上（无熔点一体化器件），使系统输出更紧凑，输出光纤总长度约 1.7m。此外，种子的合束器及放大级前向合束器，均采用侧面泵浦 / 信号合束器，降低器件对输出光束质量的影响。

实验中，通过优化种子激光的时序特性，提高了放大器中的 SRS 阈值，降低了光谱展宽速度，通过双向泵浦结合减小 YDF 弯曲半径的方式抑制了 TMI 效应。最终在泵浦功率为 6020W 时实现了 5kW 的近单模激光输出，前后向泵浦比例约为 1:6，放大级的斜率效率约为 86.1%。在最高功率时，3dB 线宽约 0.48nm，20dB 线宽为 2.1nm，SRS 信噪比约为 28.3dB，多次测量光束质量，没有退化迹象。❑

# Edmund Optics 携手 SCHOTT，为亚洲客户提供更便捷的供货渠道

2022 年 10 月 18 日，Edmund Optics 和 SCHOTT 同时宣布，双方进一步加强其战略合作伙伴关系，为亚洲客户提供更便捷的高品质光学玻璃滤光片采购渠道。本土化的库存储备，将大大加快滤光片标准尺寸和类型的交付时间，而本地化团队的支持也将简化为特定应用定制滤光片的采购过程。

早在 2020 年，Edmund Optics 就与 SCHOTT 建立了战略合作伙伴关系，为欧洲的客户提供快速、便捷的 SCHOTT 材料，而最近双方合作关系的进一步扩大，也将惠及中国及整个亚洲地区的客户。本地化的库存和灵活的解决方案，使光学系统设计




者们能够最大限度地缩短交货期，从种类丰富的标准品中进行选择，并根据他们的独特需求轻松定制滤光片。Edmund Optics 和 SCHOTT 将利用彼此成熟的供应链，为中国的滤光玻璃市场带来更高效的服务。

Edmund Optics 中国仓库已为 58 种 SCHOTT 滤光片做了本地库存储备。这些现货标准产品涵盖 12.5mm、25mm 和 50mm 的圆形或方形尺寸。

如客户有特定尺寸要求，可以通过定制尺寸切割服务来实现。有色玻璃滤光片作为薄膜镀膜滤光片的低成本替代品，是许多显微镜系统、便携式生命科学设备和工业测量的理想选择。有色玻璃滤光片的性能，对入射角和偏振的依赖性也较小。

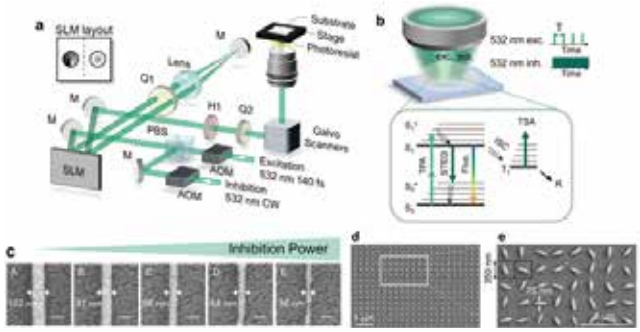
135 年以来，SCHOTT 光学滤光片玻璃以其高纯度和高质量而广受赞誉。这些滤光片是传感器系统、医疗设备及其他广泛应用的理想选择。❑

# 基于单色边缘抑制的快速超分辨直写光刻技术

浙江大学刘旭教授和匡翠方教授团队，创新性地提出了一种使用单色边缘抑制（Single color Peripheral Photoinhibition，SC-PPI）直写光刻的技术，以提高激光直写的分辨率，同时可以避免传统多色 PPI 直写光刻的色差问题。此外，研究人员将这项光刻技术应用到二维超表面和三维光子晶体的制造上，展现了该技术在微纳光子器件制造中的巨大潜力。

这项技术的激发光和抑制光都采用 532nm 波长，但二者不同之处在于激发光使用飞秒激光，而抑制光使用连续激光。532nm 的飞秒激光，实现光刻胶的双光子吸收激发聚合；而 532nm 的连续激光，实现单光子吸收抑制聚合。其中抑制光经过空间光调制器（SLM）调制成空心暗斑，主要抑制激发光焦点外围区域的聚合，从而提高直写的分辨率。在研究中，可实现最小线宽 36nm 和最小分辨率 140nm 的超分辨刻写。

这项技术利用单色波长很好地避免了色差影响，可以使用快速扫描策略，如振镜扫描。相比目前已报道的边缘抑制直写光刻技术，刻写速度至少提高了 10 倍。




图：（a）单色边缘抑制直写光刻系统结构图；（b）单色边缘抑制直写的原理图；（c）激发光功率不变，线宽会随着抑制光功率的增大而减小；（d,e）利用单色边缘抑制直写光刻技术加工的超表面结构。

此外，研究人员利用其快速高分辨率刻写的特点，将这项刻写技术应用在自旋解耦超表面结构刻写上。周期 350nm 的超表面结构，可以在几分钟内刻写完成，并且达到与仿真相吻合的性能。最后，利用该技术刻写加工了一种亚波长尺度的三维光子晶体，该晶体可产生近紫外的结构色，展现了该技术的三维超分辨刻写能力。❑



# SPIE 行业报告：光子学行业的公司数量、总收入和工作岗位，均呈增长态势

*SPIE发布的最新行业报告显示，光学和光子学领域已经取得了重大里程碑式的增长。*

文/Peter Fretty

持续的增长总是令人兴奋，光学和光子学行业出现了很多令人兴奋的增长现象。尽管制造商面临诸多挑战，但是在日益发展的全球市场中，仍然有很多领域继续呈现出了稳步增长态势。

SPIE（国际光学工程学会）于 2022 年秋季更新的行业报告显示，2020 年，核心光子学市场首次突破 3000 亿美元，随后以 7.5% 的复合年均增长率（CAGR）增长。此外，SPIE 还更新了其预测，预计 2022 年全球光子学组件的收入将在 3090~3250 亿美元之间。

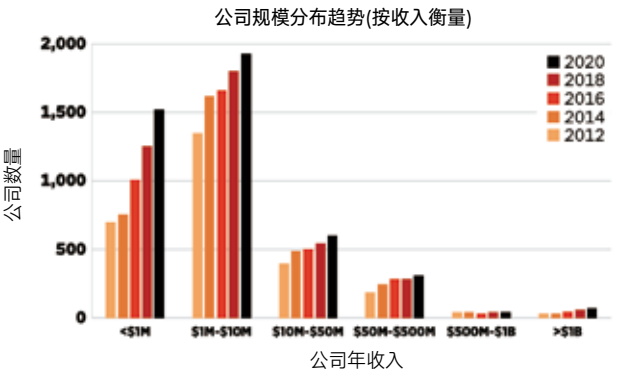
SPIE 的报告结论，基于其对分布在 50 个国家的 4842 家全球制造公司的调研。这些公司生产核心光子学组件，并在全球雇佣了 120 多万名员工。按照国家来看，日本、美国、中国和韩国贡献了大部分收入，美国和日本合计占据了总收入的 55% 以上。

SPIE 的报告中还涵盖了光学和光子学公司中每个雇员的平均收入情况。这个数字可以用来衡量公司利用员工的有效程度；如果每位员工的收入相对较高，则意味着公司的运营效率更高。在更大范围的光子学社区内，每位员工的收入范围，从 10 万美元到超过 100 万美元不等，每位员工的平均收入为 23.8 万美元。

自 2012 年（该年 SPIE 首次开展报告调研）以来，光子学组件生产行业就已经呈现出了稳定的增长态势，2012 年到 2020 年间，行业总收入的复合年均增长率超过 6.5%；与此同时，行业中的公司数量和提供的工作岗位数量，每年也都在增长。在此期间的大多数增长，都发生在亚洲市场。

## 真正的赋能者

随着光子学技术继续扩展到更广泛的行业，该技术已经作为许多其他技术的赋能者而备受关注。SPIE 的报告充分考虑了这一扩大的影响范围，并对光子学赋能的市场进行了最新评估。




行业趋势：公司、收入和工作

| | 2012 | 2014 | 2016 | 2018 | 2020 | 8-year CAGR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 公司数量 | 2,714 | 3,193 | 3,768 | 4,298 | 4,842 | +7.50% |
| 光子学行业总收入 | $182 B | $206 B | $230 B | $282 B | $302 B | +6.55% |
| 总工作岗位数 | 729K | 910K | 997K | 1,144K | 1,269K | +7.18% |

自2012年（该年SPIE首次开展报告调研）以来，光子学组件生产行业就已经呈现出了稳定的增长态势，2012年到2020年间，行业总收入的复合年均增长率超过6.5%；与此同时，行业中的公司数量和提供的工作岗位数量，每年也都在增长。在此期间的大多数增长，都发生在亚洲市场。

具体而言，SPIE 跟踪了依赖于光子学技术和创新的 10 大主要的“光子学赋能的”终端用户细分市场。这些细分市场包括先进制造、传感、照明、显示、太阳能、生物医学、通信、半导体、国防和消费品。

SPIE 的分析表明，2021 年，在全球范围内，光子学技术赋能的市场总规模超过 2.12 万亿美元。

强劲的市场增长领域包括消费品、传感器、自主系统、太阳能和半导体加工，SPIE 预计，这些市场领域将会受到《美国芯片和科学法案》以及 2022 年《欧洲芯片法案》等立法的刺激，继续增长。预计半导体加工领域将有更大的增长，并非没有根据；根据 SPIE 正在跟踪的应用市场，半导体加工已经以 24% 的复合年均增长率增长，位列增长最快的细分市场。❑

PIC

# 光子集成电路为自动驾驶铺平道路

*FMCW LiDAR中的传感器，必须价格可接受、结构紧凑、功能强大且可靠。光子集成将通过大规模生产来实现这项技术的产业化。*

文/Michael Richter，Jin Wang

电子学领域集成的成功即将在光学领域重现，这将为一个新时代铺平道路：光子集成。自 20 世纪 80 年代出现以来，硅光电子学一直是一项核心技术。硅光电子学已被广泛认为将在电信、数据中心、人工智能（AI）和量子计算领域发挥重要应用，此外它还在用于自动驾驶的激光雷达（LiDAR）中，显示出了巨大的应用潜力。

光子集成电路（PIC）通过将包括激光器和探测器在内的光学元件集成到硅芯片上，正在突破高成本效益的批量制造能力和车规级可靠性方面的瓶颈。这项技术的飞跃，将为缩减尺寸和降低成本带来机会，并且能够适用于大规模生产。硅光电子学提供了一种全新的系统集成水平，将有助于进一步促进固态调频连续波（FMCW）片上激光雷达（LiDAR-on-Chip）的发展。

与飞行时间（Time-of-Flight）LiDAR 相比，FMCW LiDAR 技术具有独特的工作原理和较低的激光功率要求，被普遍认为是对自动驾驶更有利的传感器，它与集成光子元件高度兼容。通过芯片倒装和 3D 芯片堆叠等系统级封装技术，实现了 PIC 和电子 IC 的共同集成。这种组合产生了高效且强大的光子和电子性能，并去除了对光纤的需求；光纤往往成本较高，并且对于车辆每天在道路上面临的严苛环境而言，光纤较为脆弱。

Scantinel Photonics 公司目前正在开发一种基于 CMOS 兼容的光子集成平台的 FMCW 光电核心模块（OCM）。该模块由固态扫描 PIC 组成（见图 1），具有多个并行的 FMCW 通道，Scantinel 已成功地展示了它极其可靠的扫描性能（见图 2）。与先进的光学系统相结合，该模块能提供出色的扫描结果，同时提供了一个紧凑的模块化方法，它可以很容易地适应任何应用生态系统。

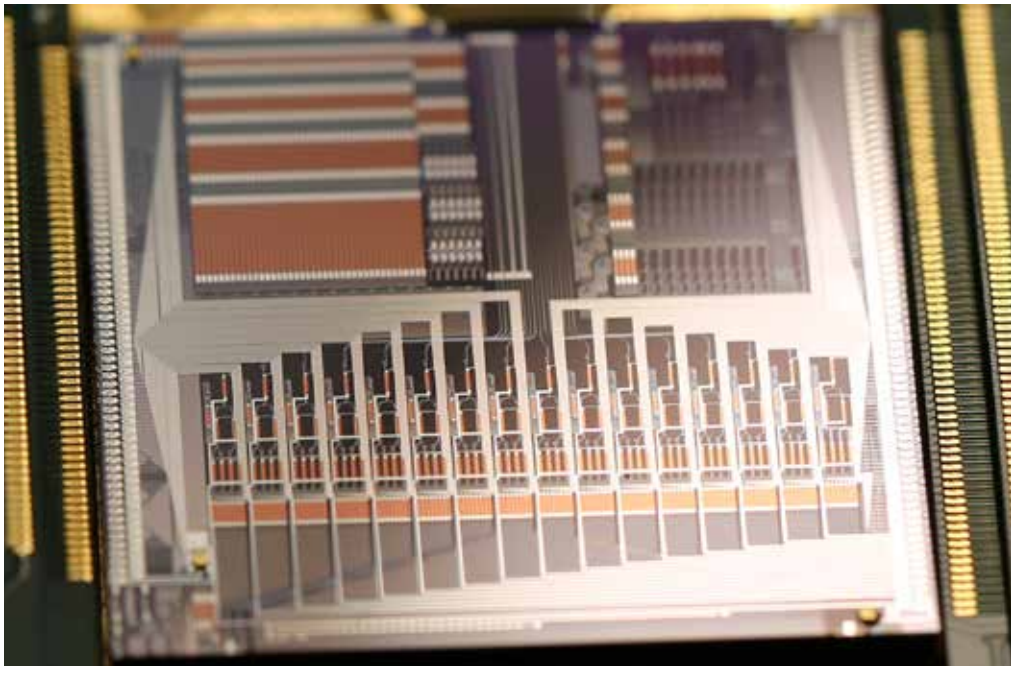


图1：固态PIC扫描仪。

## 它是如何工作的？

该扫描 PIC 芯片非常紧凑，外观尺寸小于 2cm × 2cm，在固态快速

扫描轴上有 256 条扫描线。基于 PIC 的扫描机制对于 FMCW 传感应用至关重要，并且具有诸多优势。

扫描概念是实现汽车 FMCW LiDAR 的关键挑战。不需要在目标物上快速移动光束的固态扫描方法，是扫描 FMCW LiDAR 的先决条件，以避免相干检测系统的高损耗。这需要在非常小的面积上安装大量的光学和电子元器件（包括探测器），而这只能通过光子集成来实现。

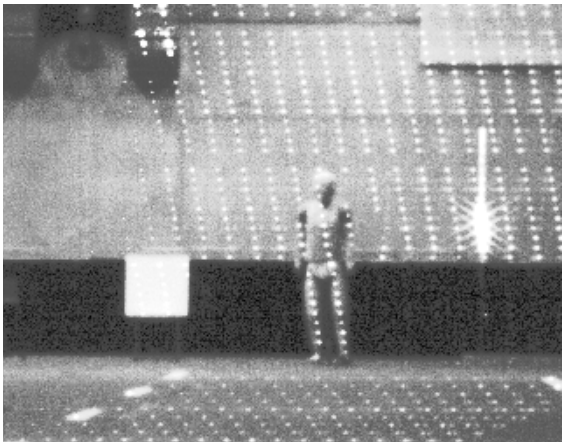


图2：来自PIC扫描仪的扫描模型。

Scantinel 的 PIC 设置允许大规模并行化，以丰富像素密度，而机械扫描仪的设置是没有这个特点的。PIC 扫描机制还允许用户设计和定制 PIC 出口间距，以便根据应用的具体情况，在垂直视场上实现具有不同分辨率的感兴趣区域。光子集成大大减少了光学精密对准步骤的数量，因为许多光子元件是在芯片上通过光刻技术对准的。

固态 PIC 扫描仪不仅对于满足甚至超越车规要求至关重要，它还可以用 CMOS 兼容技术在晶圆级制造。这降低了 LiDAR 系统的成本、尺寸、重量和功耗，因此它适用于大量自动驾驶应用，这也确保了能以有吸引力和竞争力的价格，来享受 FMCW 技术的优势。

## 硅光子学的广泛采用

PIC 为每个芯片带来了更多的光子功能，而且还可以与其他技术（特别是微电子技术）集成，使用混合和单片的方法。向着更高集成度发展的趋势有，将有利于硅光子学在 LiDAR 等应用中的采用，因为这种集成具有明显的价格和体积优势，有助于加速 LiDAR 进入自动驾驶领域。

在图 3 中 FMCW LiDAR 的分区，显示了“通过 OCM 方法，将所有必需的电气、光电和光学子部件高度集成的”一条清晰路径。在 FMCW LiDAR 中，所有有源和无源电子功能，都可以集成到单个 LiDAR 专用的集成电路中（LiDAR ASIC，红框）。标准 PIC 技术将用于产生所有集成的无源光学元件（蓝框）。激光器和光放大器这样的光生成和光放大元件，可以通过混合 / 异构的方式进行集成（绿框）。同时，倒装芯片技术可用于将 LiDAR ASIC 添加到 PIC 载体上，实现超集成。其他光学元件，如准直器或反射镜系统，如果不能进一步缩小尺寸，就使用标准光学安装技术与 PIC 载体组装到一起（黄框）。

FMCW 雷达传感器的发展历史，表明了这种传感技术从分立元件（如移动天线和专用信号处理单元）向高度集成的片上雷达发展的趋势。其结果绝对是乐观的：将信号处理和控制 IC、专用射频模块和天线阵列进行分区，是目前实现低成本汽车 FMCW 雷达系统的最先进的方法。同样地，FMCW LiDAR 被分割成电子、光子 / 光电和光学部分，将实现更密集的系统集成，这最终将大幅降低终端应用的成本。

光子学行业的供应链也在迎头赶上。主要的商业代工厂正在逐步建立新业务，采用标准工艺实现硅光子学，以实现低成本和可扩展的制造能力。用于光子集成的封装和制造程序也正在开发中，以满足严格的车规级的机械、电气和热要求，同时最大限度地减少元件的尺寸和重量。与 CMOS 兼容的硅光子学方法将受益于硅产业，这要归功于其成熟的工艺和在全球范围内的大规模采用。

未来的发展趋势非常明朗：FMCW LiDAR 中用于自动驾驶的传感器，必须价格可接受、结构紧凑、功能强大且高度可靠。光子集成将通过大规模生产来实现这项技术的产业化。❑

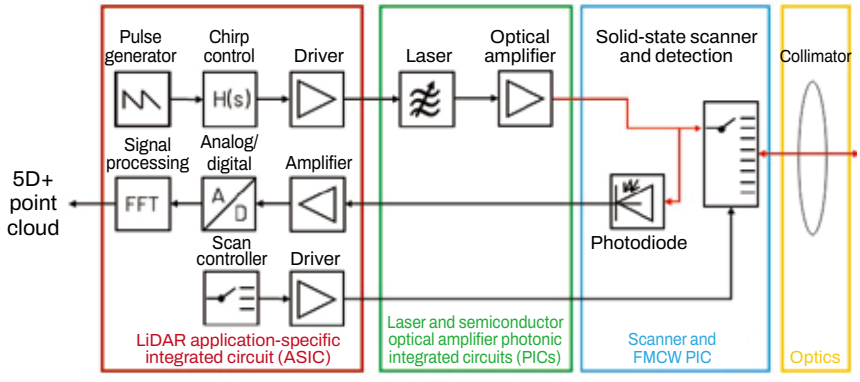



图3：FMCW LiDAR光电核心模块（OCM）。

超快光学元件

# 适用于阿秒极紫外激光的高精度多层反射镜

*用于极紫外（EUV）激光器的阿秒光学元件的设计，应该能最大限度地控制脉冲的中心波长/能量、光谱形状、光谱相位和脉冲持续时间。*

文/Olivia Wheeler，Alexander Guggenmos

在过去的几十年里，阿秒（as）脉冲激光的发展，为了解电子动力学过程提供了一个窗口，而这是以前的激光系统无法实现的，即使是飞秒激光系统也无法实现。

2001 年，M. Hentschel 等人首次产生了脉冲持续时间为阿秒（1as=$10^{-18}$s）的激光脉冲，此举为研究电子运动等一些最基本的科学过程提供了途径。[1] 为了更加直观地感受阿秒的时间尺度，图 1 中给出了阿秒、秒以及宇宙年龄的时间尺度对比图，由此可见，1 阿秒之于 1 秒，正如 1 秒之于宇宙的年龄。[2]

如今，最短的激光脉冲已经小于 100as（截至 2017 年为 43as），这与氢原子中电子的基态轨道周期相当。[3] 所有超快激光的特点是脉冲持续时间短，而阿秒激光将超快激光的脉冲持续时间推向了极致，达到阿秒量级。阿秒激光推动了阿秒科学领域的发展，应用广泛，其中对电子局域化、衰变过程的动力学以及强场效应的观测，只是其众多应用的冰山一角。[4-6]

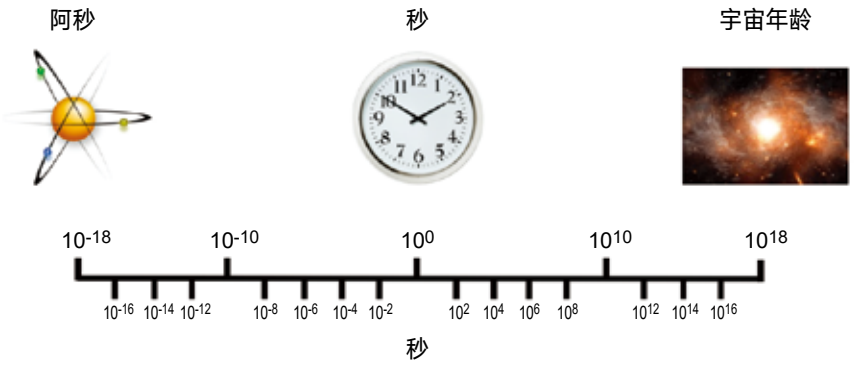



图1：阿秒、秒以及宇宙年龄的时间尺度对比图，以此说明阿秒的时间尺度极短。

## 产生阿秒激光脉冲

产生一个超快激光脉冲需要足够的带宽和一个合适的中心波长。光谱带宽决定了最小脉冲持续时间，这是由傅里叶变换关系决定的。从原理上说，光谱带宽越宽，产生的脉冲持续时间就越短。但在工程实践中，不可能产生一个无限宽的光谱来产生一个脉冲持续时间无限短的激光脉冲。

光周期，即激光脉冲中心波长的周期，也限制了脉冲持续时间。光周期可以通过中心波长除以光速得到。以中心波长为 800nm 的脉冲为例，其光周期约为 2.67fs。从这个结果来看，即使光谱带宽足够大，一个中心波长为 800nm 的激光脉冲，其脉冲持续时间显然不能压缩到阿秒量级。此外，对于中心波长为 19nm 的脉冲，其脉冲最小持续时间约为 63as。因此，阿秒激光脉冲通常位于电磁波谱的 EUV（也称为 XUV）波段，而不能在能量较低的（如长波长）波段产生。

## 阿秒激光源

最常见的 EUV 阿秒脉冲源是自由电子激光器（FELs）和高次谐波产生（HHG），激光用户通常使用的是 HHG。一般认为，通过 HHG 产生阿秒脉冲的过程包括三个步骤。首先，样品（通常是惰性气体）与激光提供的强电场相互作用，施加的强电场使控制电子波函数的库仑势发生畸变，并通过隧穿作用使样品发生电离。其次，电子被激光提供的电场加速远离母体离子，但当电场反转时，电子又加速向母体离子移动。最后，当电子与母体离子重新[7]结合时，它在加速过程中获得的动能，以驱动激光频率的奇次谐波光子的形式释放出来。

## 用于阿秒极紫外激光器的光学元件

阿秒 EUV 应用对光学元件有着非常苛刻的要求。高精度的金属 / 介质多层反射镜通常用于阿秒脉冲的引导、聚焦和整形（见图 2）。阿秒光学元件的设计，应该能够最大限度地控

制脉冲的中心波长 / 能量、光谱形状、光谱相位和脉冲持续时间。

阿秒实验需要极好的同步激光脉冲。因为相干的 EUV/ 软 X 射线源的可调谐性有限，所以必须使用脉冲整形的阿秒光学元件如激光镜来解决。此外，光学元件的色散等效应会在时域上使脉冲展宽，因此需要首选不依赖角度或无色散的光学元件。相比于光栅等其他光学元件，多层镜更加适合满足这些需求。为保持阿秒激光脉冲的特性，多层镜的反射面上的多层镀膜精度非常高，并且衬底的抛光表面粗糙度要达到 1Å（$10^{-10}$m）左右，以尽量减少散射造成的光损耗。在镀膜之前，要对多层镜镀膜的振幅和相位特性进行模拟和优化。



图2：用于反射EUV阿秒激光束的多层反射镜。

可以使用不同的沉积技术（比如化学气相沉积、脉冲激光沉积、磁控溅射和电子束蒸发）为阿秒 EUV 激光反射镜镀原子量级厚度的多层膜。其中，磁控溅射和电子束蒸发这两种技术更为常用。目前，通过磁控溅射的镀膜方法，反射镜对正入射 EUV 的反射率达到了 70.9% 的最高记录。[8] 但是最高水平的膜层控制和可重复性，是通过离子束沉积方法实现的，这种方法也称为离子束溅射。

离子束沉积是精确控制膜层厚度的一种强大工具，无需实时监测厚度（见图 3）。离子能量和电流可以独立控制，以增加自由度，优化膜层生长。

EUV 阿秒反射镜的光学性能，通常使用白光光谱椭偏仪、EUV/ 软 X 射线反射法和掠入射硬 X 射线反射法测量。白光光谱椭偏仪是一种综合测量技术，其原理是在固定入射角下，从镜面反射回来的光束的相位和振幅受到了镜面的调制。

椭圆偏振法可用于原位测量，以在镀膜过程中分析膜层厚度，并确定所需的镀膜速率。EUV/ 软 X 射线反射法，提供了一种在一定入射角下测量多层镜绝对反射率的方法；而掠入射硬 X 射线反射率法，可以测量膜层的粗糙度，其粗糙度直接影响镜面的反射率。将所有这些信息结合起来，就可以建立起一个综合模型，用于研究 EUV 阿秒多层反射镜的理论和实际性能。

## 阿秒光学的应用

阿秒光学的进步促进了阿秒科学领域的发展。传统的超快技术，如泵浦 - 探测光谱技术，由于阿秒脉冲的特性而得到了增强。

泵浦 - 探测技术的典型配置有条纹相机技术或瞬态吸收。瞬态吸收实验一般过程如下：位于可见光波段的泵浦光首先激发样品，经过一定的时间延迟后，白光作为探测光监测到样品激发态的光谱演变。而在阿秒瞬态吸收光谱（ATAS）系统中，位于可见光 - 近红外波段的脉冲激光作为泵浦光激发样品，而阿秒 EUV 脉冲充当探测光。然而，在阿秒条纹相机系统中，情况正好相反——阿秒激光脉冲首先激发原子或分子的电离，然后第二个较长波长的激光脉冲的振荡电场调制了发射电子的能量。EUV 阿秒脉冲所提供的光谱分辨率，使人们能够深入了解价电子的运动以及核心电子态的动力学过程。[5,9]

在目前进行的大多数阿秒实验中，用于产生 HHG 的仍然是 Ti:sapphire 激光系统。啁啾脉冲放大技术（Strickland 和 Mourou 因此在 2018 年获得诺贝尔物理学奖）以及其他脉冲压缩方法，提供了接近单周期的脉冲持续时间来产

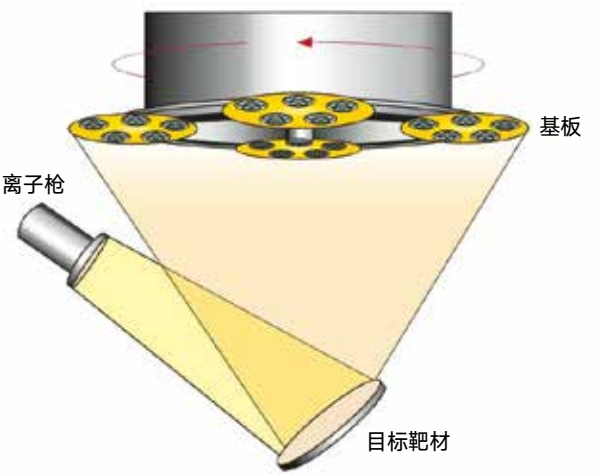



图3：离子束沉积是一种高度可控的涂层工艺，用于制造EUV阿秒反射镜。使用高能离子枪将材料从目标靶材上溅射到旋转的基片上，从而获得高精度和高重复性的光学涂层。

生 HHG。不幸的是，Ti:sapphire 激光系统的重复频率相对比较低（最大只能达到 10kHz），这对阿秒产生过程以及对阿秒实验中，复杂的探测实验的数据采集时间，造成了严重限制。由此可见，阿秒科学领域急需更高功率、更高重复频率的激光系统，因此引入了重复频率为兆赫兹量级的 EUV 激光系统。

现在，产生阿秒的激光源已经慢慢从 Ti:sapphire 激光系统，转向了中心波长为 1030nm 的掺 Yb 激光器。此外，光学参量啁啾脉冲放大技术的应用，大大提高了激光器的平均功率和重复频率，阿秒科学领域正趋向于使用更高功率的激光器来探测基本电子现象。

随着阿秒科学的发展，阿秒技术越来越多地被不同的激光用户所使用。对于研究人员来说，获得支持其科学研究的光学元件是非常必要的。采购复杂的超快光学元件，如阿秒 EUV 反射镜，历来都很困难，因为这些镜子往往需要定制化设计。对于大部分人来说，小批量的价格和漫长的交货时间，令人望而却步。但现在，阿秒 EUV 反射镜可以作为标准的现货组件供应，大大降低了小批量购买的价格和交货时间，这对于快速修复损坏的系统、快速探索系统原型的新想法以及加快科学发现的步伐尤为重要。❑

参考文献


1. M. Hentschel et al., Nature, 414, 509–513 (2001); doi:10.1038/35107000.
2. D. Villeneuve, Contemp. Phys., 59, 1, 47–61 (2018); doi:10.1080/00107514.2017.1407093.
3. T. Gaumnitz et al., Opt. Express, 25, 22, 27506–27518 (2017); doi:10.1364/oe.25.027506.
4. G. Sansone et al., Nature, 465, 763–766 (2010); doi:10.1038/nature09084.
5. M. Drescher, Nature, 419, 803–807 (2002); doi:10.1364/oe.25.027506.
6. M. Lucchini et al., Science, 353, 6302 (2016); doi:10.1126/science.aag1268.
7. A. Zeidler et al., Phys. Rev. Lett., 95 (2005); doi:10.1103/physrevlett.95.203003.
8. S. Bajit et al., Proc. SPIE, 4506, 65–75 (2001); doi:10.1117/12.450946.
9. E. Goulielmakis et al., Nature, 466, 7307, 739–743 (2010); doi:10.1038/nature09212.
10. T. Witting et al., Optica, 9, 2, 145–151 (2022); doi:10.1364/optica.443521.



光学引领未来™



TECHSPEC® 激光反射镜

- 标准激光反射镜全球现货供应
- 自主制造兼镀膜的反射镜定制能力
- 用于 Nd:YAG、Yb:YAG、Ti:Sapphire 和其他常见激光波长的设计
- 用于超快激光器的介质镀膜以及超快增强性银镀膜
- 可保障的激光诱导损伤阈值( LIDTs )

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

关注公众号

Edmund optics | china
欲了解更多信息，请点击此处:
www.edmundoptics.cn/112-8619

新型激光器

# 单模半导体激光器在尺寸和功率上实现可扩展性

*通过在半导体膜上穿孔形成一个可扩展的激光腔，消除了激光的高阶模式，实现了单一模式的高功率激光输出。*

文/Sally Cole Johnson

最近，由加州大学伯克利分校电气工程与计算机科学系的 Boubacar Kanté 副教授领导的研究团队，解决了一项长期存在的光学挑战。Kanté 教授同时也是 Lawrence Berkeley 国家实验室材料科学部的一名研究人员。

Kanté 的研究团队（见图 1）通过在半导体膜上穿孔形成一个可扩展的激光腔，这些均匀分布的微型孔，能够消除激光的高阶模式。这款半导体激光器被命名为“伯克利表面发射激光器”或 BerkSEL。

“未来可能会有制造上的挑战，但是如何提高表面发射激光器的功率这个存在了长达 60 之久的瓶颈问题，现在终于消失了。”Kanté 说，“未来，制造商将不需要集成数百个激光器，它们可以被一个激光器所取代，该激光器能发射足够高的功率。”

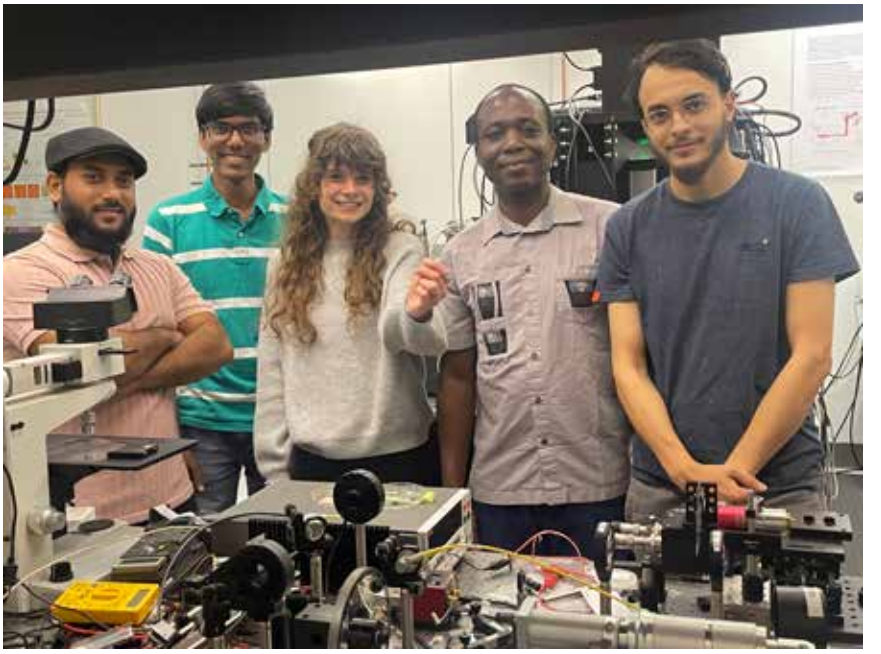


图1：Wayesh Qarony博士、Rushin Contractor、Emma Martin、Boubacar Kanté教授和Walid Redjem博士在实验室。

## BerkSEL的设计

BerkSEL 的设计，使得激光在通过由 InGaAsP 制成的 200nm 厚的膜上的微孔时，实现了单模发射（见图 2）。这些孔洞作为狄拉克点，这是一种基于能量线性分散的二维材料的拓扑特征（见图 3）。

Kanté 团队使用高能脉冲激光作为泵浦光，为 BerkSEL 提供能量，然后使用优化的近红外光谱共聚焦显微系统，测量每个孔洞的激光输出（见图 4）。

BerkSEL 可以通过调整设计规格（如孔的大小和半导体材料），来实现不同的激光波长输出。研究团队选择了合适的半导体材料和结构尺寸，以实现通信波段的激光输出。

自从激光发明以来，一直存在着随着激光腔的增大，相干的单色光开始发散的问题。研究人员利用波导光放大等方法来解决上述问题。因此，激光功率越高，需要的波导也越长。

“提高激光功率的最好方法是通过表面，因为一个表面的面积是其线性尺寸的平方，”Kanté 说，“通过增加面积，功率上升的速度要比使用波导快得多。”

Kanté 对电磁学很感兴趣，他在 2017 年提出并演示了基于光的量子霍尔效应的拓扑激光器的概念。事实证明，这一发现对 BerkSEL 的问世起到

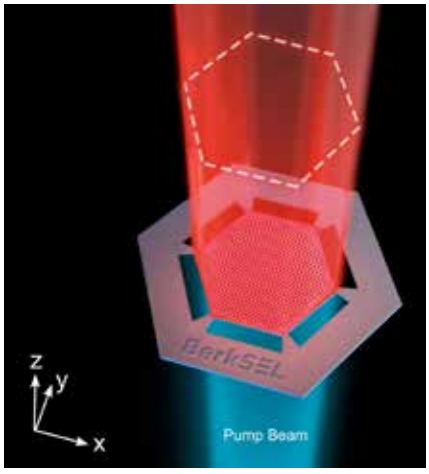



图2：伯克利表面发射激光器（BerkSEL）示意图。其中蓝色为泵浦光束，红色为输出激光。半导体膜的设计使所有的谐振腔在相位上同步，使它们都参与到发光模式中来。

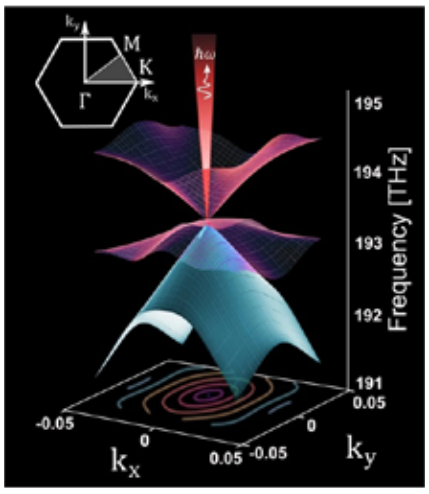



图3：狄拉克锥的示意图。由于狄拉克点是奇点，因此激光从整个半导体腔中同步输出。

了积极的推动作用。

## 将折射率降至零

Kanté 团队通过研究发现，腔体的自由光谱范围（认为腔体内有很多模式），即模式之间的距离，是一个复数，这意味着距离有“实部也有虚部”。目前，随着激光腔的增大，模式的频率越来越近，无法分离。如果一个模式实现激光输出，其他模式也会随着腔体的增大而输出激光。

但是 Kanté 团队想出了一个办法，可以将折射率降至零，因此激光器表面的所有模式都处于同相位。“这在任何现有的激光器中都不会发生”，他指出，“想象一下，阻止所有其他模式的激光输出，将整个腔的功率集中到一个单一模式。你马上就会看到这样的激光器的输出功率非常之高。”

两点之间的光学相位，是两点之间的折射率乘以两点之间的距离。Kanté 说，“如果折射率为零，那么相位在任何地方都是相同的，所有谐振都在贡献能量，这使得整个激光系统非常高效。”

但是到目前为止，单模式激光输出在垂直腔面发射激光器（VCSEL）中还没有实现，因为它们的孔径只有微米量级，无法做得更大。“我们的研究表明，把孔径做得越大越好。由于器件是平面的，制造相对容易。”Kanté 补充道。

## 可扩展性

所有现有的表面发射激光器只从其腔体的中间发射光，而且是来自势阱的本征模式。“激光能量将聚集在中心区域，边界上的能量为零。”Kanté 说，“在 BerkSEL 中，没有高阶模式输出的空间。这种腔体从物理学上来说是禁止高阶模式激光输出的。”

这项工作的优势在于“没有人在任何势阱内预测或观察到过这种类型的模式，”Kanté 说，“我们发现了一种‘open-Dirac’势，使激光器能够扩展。一个可扩展的系统需要某种类型的损耗为代价。open 意味着系统中有一些损耗，因此高阶模式被转储到有损模式中。这将在物理学上有很多应用，特别是在波动物理学领域。”

重要的是，Kanté 团队通过‘open-Dirac’势发现了一种新的解决方案。他说：“这个发现不仅对激光学领域是一个惊喜，对波动物理学领域也是一个惊喜。当今量子科学的最大挑战是可扩展性——我们如何在保持系统相干性的同时，增加量子比特的数量？这和激光器的可扩展性问题是一样的，保持单模腔的同时增大尺寸，意味着在增大尺寸和扩展性能的同时，仍要保持相干性。”

Kanté 团队目前正在开发基于 BerkSEL 的应用系统。“该系统可以用于 LiDAR，LiDARs 与光源的功率息息相关，由于功率可以提高，因此可以开发一个非常紧凑的设备，用于各种 LiDAR 系统。”Kanté 说，“这种小型化的高功率激光器可以安装在任何小型机器人上。我们现在需要将这一发现转化为集成到系统中的技术。”

Kanté 补充道，虽然将这项技术转化为设备可能需要几年时间，但“这个过程应该会相当快，因为这项技术相对简单，而且与目前的纳米制造技术兼容。”❑

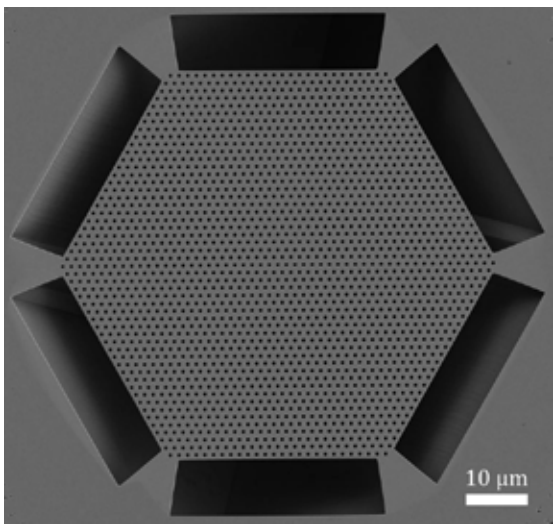



图4：BerkSEL的扫描电子显微图的俯视图。其六边形光子晶体结构形成一个电磁腔。

激光切割

# 超高功率光纤激光切割技术的最新进展

*超高功率光纤激光器能够实现快速且高质量的厚板切割，包括用空气辅助切割不锈钢，并具备许多优于其他切割方案的优势。*

文/Rouzbeh Sarrafi，Jason Jia，Jing Zhang，Marco Mendes；IPG Photonics

在过去的几年中，功率在10~40kW的超高功率（UHP）光纤激光器已快速应用于切割市场，而且用于切割应用的最高激光功率预计将持续提高。本文将展示该功率段内的切割应用效果，并讨论推动超高功率光纤激光器应用的主要因素：显著的生产率优势、切割质量提升和厚板切割能力。

这里，将功率大于10kW的激光器定义为UHP激光器，它们能够实现新的切割工艺，进而促进激光切割能够进入新的市场（例如，使用空气作为辅助气体，可以切割厚度达50mm的不锈钢，并且切割速度比高功率等离子切割快4倍）。应用结果显示：UHP激光器正在改变钢材切割的方式：使用空气辅助切割工艺取代氮气和氧气切割工艺，进而实现高品质、高速度且经济的切割方式。

50多年前，激光切割技术问世。自此，激光切割进入技术高速发展赛道。20世纪70年代，商用激光切割机面世，并且早期使用者将其用于大规模生产；20世纪80年代，二氧化碳（CO2）激光切割设备得到了广泛应用；到了20世纪90年代末和2000年代初，激光切割设备开始使用高功率光纤激光器；2000年代末，千瓦级光纤激光切割机的发展，使激光切割从小规模应用转变成为主流制造工艺。光纤激光切割机在金属板材激光切割市场中占据了主导地位，这主要归功于光纤激光器易于集成、可靠性高、低维护、相对较低的投资和运行成本、高切割产量以及功率提升的可行性。

在21世纪10年代末和20年代初，激光切割市场的增长来自两个方向：第一个方向是低功率切割市场，由于切割设备的成本大幅降低，市场对1~3kW切割机的需求量激增；第二个方向是高功率切割市场，这部分市场需求，驱动了市场对UHP激光器的需求不断增加。UHP激光器能以经济实惠的价格，提供高生产率和强大的技术能力，激光切割领域经历了一场显著的“功率提升”，而在同一时期的其他钣金制造工艺中，并未出现使用功率的显著提升。

在相关的加工制造展会上，展出的切割机的最高激光功率，已经从2015年的6kW提升至2022年的40kW，功率增长了近7倍（见图1）！仅仅在过去的三年中，激光切割设备的最高功率就从15kW升高到了40kW，增长了2.5倍！




图1：自2016年起，切割设备中使用的光纤激光器的最高功率增长情况。

## 为什么现在是最佳时机？

在UHP切割趋势开始前几年，就已经出现了可靠的高功率光纤激光器。早在2013年就出现了100kW的工业光纤激光器。[1] 但是仅仅是在过去的几年中，激光器的每千瓦价格出现快速下降之后，使用UHP激光切割的门槛才得以降低。与此同时，能够在恶劣切割环境中承载如此高功率的激光切割头也随即问世；此外，用于UHP切割系统的切割数据库也日渐完善。

## 切割测试

本次测试使用的是IPG 40kW

的 YLS-40000 和 IPG 30kW 的 YLS-30000-ECO2 高电光转换效率光纤激光器，配置了芯径 100μm 的光纤和 IPG Cut-HP 切割头，来评估不同金属的切割速度和切割质量。

据目前的了解，通过芯径 100μm 的光纤输出 40kW 的激光功率，是目前用于工业激光切割的最高激光强度。之所以选择芯径 100μm 的光纤，是因为与芯径 150μm 的光纤相比，100μm 光纤能将切割速度提高 10%-25%。

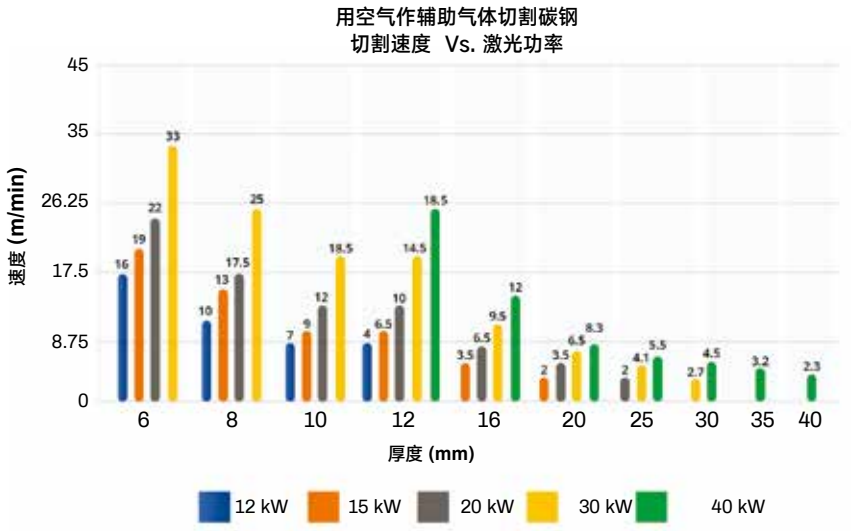



图2：碳钢无渣空气辅助切割的切割速度与功率对比图。

## 更快的切割速度

实验表明，对于所有测试金属（包括不锈钢、碳钢和铝），激光切割速度均随平均功率（最高功率达 40kW）的增加而提高。图 2 显示了使用空气作为辅助气体切割 6~40mm 厚碳钢的情况，图中给出了在 12~40kW 功率段之间，切割速度与激光功率的增长情况。例如，切割厚度 12mm 的碳钢，功率从 15kW 提高到 40kW，切割速度是原来的 280%（功率增加 270%）；切割厚度 20mm 的碳钢，功率从 15kW 提高到 40kW，切割速度是原来的 420%；切割厚度 30mm 的

G&H
安特 Ante
二维AOD高速激光
扫描加工应用解决方案
适用于激光钻孔、激光光镊、光学检测、
印刷制版、数字成像等应用
特点
● 紫外、绿光、近红外、CO2多波段覆盖
● 响应速度优于1μs
● 全扫描角范围内，衍射效率高度一致
广州安特激光技术有限公司
咨询热线：400-666-8955 www.antelaser.com

碳钢，功率从 30kW 提高到 40kW（功率增长了 33%），切割速度比原来快 66%。由此可见，功率更高的 UHP 激光器，将会进一步提高厚板切割的生产效率。

为了利用 UHP 激光器带来的更快切割速度，来显著缩短生产周期，需要在高加速度下切割工件，尤其是较薄的工件。近年来，为了适应更高的激光功率，激光切割机的最大加速度已从 1g 变为 3g。在高端市场，UHP 激光切割机的加速度最高可达 6g，并且其在机械设计上也能够保证切割轨迹不会出现明显的偏差。

## 降低工件成本，快速实现投资回报

与低功率切割相比，UHP 激光切割能显著降低工件的加工成本，并能快速实现投资回报和更高的盈利能力。在激光切割应用中，加工成本主要来自气体消耗，而气体成本往往会随着工件厚度的增加而显著增加。

UHP 激光切割使用与低功率切割相同或更小的气体压力和喷嘴尺寸。但是 UHP 激光器的切割速度更快，这就减少了单个工件的切割时间，并且大幅减少了气体消耗。例如，与 15kW 激光器相比，30kW 激光器仅用一半的时间就能切割出一个厚度 16mm 的不锈钢工件，这能减少一半的气体消耗。

激光器和水冷机的用电量，通常与激光功率呈线性增长关系。除此之外，切割机在其他方面的用电量基本是相同的。因此，在前面提到的案例中，单个工件的生产节拍快了一半，这样通过提高激光功率也降低了每个工件的总用电成本。随着技术的不断发展，高功率光纤激光器的电光转换效率超过 50%，将更有助于减少电消耗。[2]

表1：氧气、氮气和空气切割碳钢的优缺点比较

| | 氧气 | 氮气 | 高压空气 |
|---|---|---|---|
| 气体设备成本 | 低 | 低到高[1] | 高[2] |
| 气体操作成本 | 低[3] | 高[4] | 非常低[5] |
| 通量 | 低 | 非常高 | 非常高 |
| 熔渣 | 无/低 | 中 | 无/低 |
| 生产质量的长期重复性 | 中/高 | 非常高 | 非常高 |
| 对材料表面环境的敏感性[6] | 中 | 低 | 低 |
| 对材料成分的敏感性 | 高 | 低 | 低 |
| 热影响区 | 中 | 小 | 小 |
| 切割复杂或高深宽比工件的能力 | 中 | 高 | 高 |
| 切割表面氧化程度 | 严重 | 无 | 中度 |
| 切割表面粗糙度(Rz) | 低 | 中等 | 中/高 |
| 切割表面美观度 | 好 | 中等 | 较差 |
| 切口宽度 | 大 | 小 | 小 |
| 无渣切割所需的激光功率 | 低 | N/A | 中 |

1-取决于生产规模
2-给空气增压并过滤湿气和油的设备
3-氧气切割使用低压（通常为5~20psi）和小孔口喷嘴
4-氮气切割使用高压和大喷嘴
5-作为切割气体资源的空气没有成本
6-氧化水平和氧化皮厚度

除了更快的切割速度，UHP 激光器还能够节约气体的使用。与使用更昂贵的氮气或切割速度更慢的氧气切割相比，UHP 激光器允许用高压空气快速、无渣地切割厚碳钢。在氮气和空气切割中，UHP 允许降低无渣切割所需的气压。例如，用 15kW 激光器，无渣切割 20mm 厚的碳钢，需要使用大于 16bar 的气压；而用 20kW 或更高的功率时，切割同等厚度的碳钢，10~12bar 的气压就足够了。由于气体使用情况与压力大致呈线性正相关（在相同的喷嘴尺寸下），因此，减压的降低有助于减少气体消耗，同时也能简化对气体发生设备的要求。

高功率激光切割设备的生产效率是低功率激光切割设备的两倍，而设备的价格并非其两倍。这是因为每千瓦成本会随着激光功率的增加而降低。此外，较高功率激光器的成本被包含进了设备总成本中，呈边际增长（相较于较低功率的激光设备）。因此，UHP 激光切割机通过更高的激光功率能够达到两倍的生产效率，而设备成本仅增加了 30%-40%。

由于生产效率显著提高，UHP 设备可取代多个低功率设备，相应地也可以减少占地面积、减少操作员，减少设施准备。另一方面，为了保证生产效率，UHP 光纤激光切割机对激光光源和切割头的可靠性要求更高。也就是说，对于光纤激光光源，需要长期稳定的功率输出和光束质量，这会

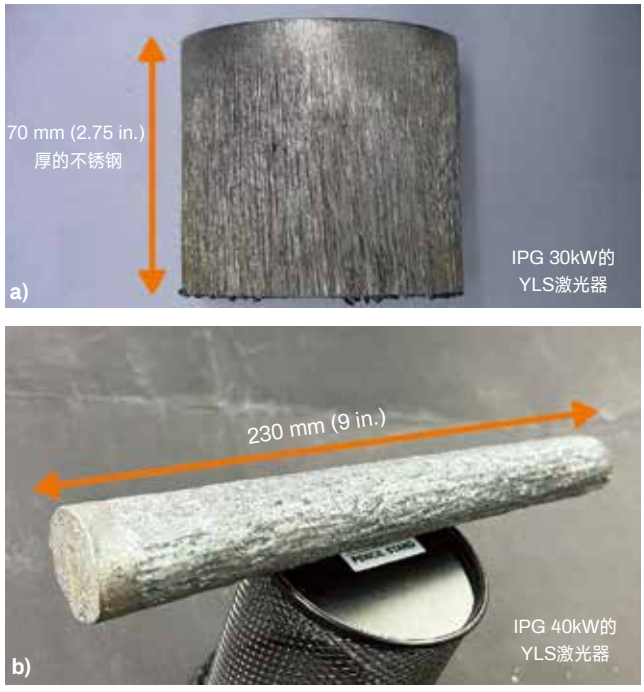



图3：使用UHP激光切割机，以脉冲模式切割板厚的不锈钢：(a)功率30kW，氮气切割70mm厚的不锈钢；(b)功率40kW，空气切割230mm厚的碳钢。

受二极管、组件和光学集成的质量影响。至于 UHP 切割头，需要承受高激光功率、高压气体、灰尘、工艺热量和高加速度，实现稳定可靠的加工。

## 切割不锈钢的新工艺

碳钢可用氧气、氮气或空气作为辅助气体进行切割。表 1 中总结了使用每种辅助气体的优缺点。尽管氧气切割擅长用较低的激光功率切割厚碳钢，但是由于切割速度与激光功率不成正比，因此会降低生产效率。相反，使用空气辅助切割，速度与功率成正比（见图 2）。例如，切割厚度 16mm 的碳钢，功率在 10~30kW 之间，氧气切割速度保持不变，约为 2m/min；而功率在 30kW 时，空气切割速度高于 9m/min，是氧气切割速度的 4.5 倍。

在较低功率和较低速度下，过去仅能用氧气切割的厚度，现在可使用空气辅助 UHP 激光器切割，并且速度能快几倍，而且切割质量良好。对于低功率激光，空气切割会导致难以去除的挂渣和不良的表面质量；而新的高效 UHP 切割方案，对于那些大量依赖厚板加工的行业（如重工行业）来说，则提供了更好的解决方案，广受市场欢迎。

## 提高厚板切割的厚度、产量和质量

测试显示，随着 UHP 激光器功率的增加，切割厚度能力也有所增加。图 3 中显示了在 30kW 下用氮气切割 70mm 厚的不锈钢，以及在 40kW 下用空气切割 230mm 厚的碳钢，两者均在脉冲切割模式下进行。

在连续波（CW）全速切割模式下，用 20kW 功率无渣空气切割 20mm 厚的碳钢、用 40kW 功率无渣空气切割 30mm 厚的碳钢、用 40kW 功率无渣空气切割 40mm 厚的碳钢（见图 2 和图 4a）。对于切割不锈钢，更容易实现无渣效果，所以极限切割厚度比碳钢要厚（见图 4b 和 4c）。

对于连续氮气和空气切割，在任何给定的功率下，仅能在一定厚度内实现无渣切割和良好的切割表面。超过一定厚度，应使用脉冲切割（速度比连续慢）来达到合格的切割质量；否则，必须增加激光功率。通常，低于 2m/min 的切割速度意味着在连续模式下，激光功率不足，难以达到最佳切割质量。

对于碳钢氧气切割，在满足“切割面光滑”的前提下，增加功率将会增加极限切割厚度；例如，4kW 的极限切割厚度约为 6~8mm，而 15kW 的极限切割厚度为 30mm。图 4d 显示了用 15kW 功率切割的 30mm 厚的碳钢样件。

## 穿孔更快、更清洁

通过在脉冲模式下使用 UHP 激光器的高峰值功率，可快速对厚金属穿孔，产生的飞溅很少。16mm 厚不锈钢的穿孔时间从 6kW 的 >1s，大幅缩短至 10kW 的 0.5s 和 20kW 的 0.1s。在实际应用中，通常将 ≤0.1s 的穿孔视为“瞬时”。

较高的峰值功率增加了熔池的深宽比，这使得能够通过更少的横向熔化来更快地连接厚度。材料横向熔化的减少，同样最大限度地减少了顶部表面飞溅。

## UHP激光切割的竞争力

在过去的六年中，有几项技术发展推动了激光切割性能的提高，这项技术进展包括：1）通过可变准直器或多芯光纤，选择聚焦光斑尺寸；2）快速光束旋转，用于提高某些金属的切割效率和切割质量；3）具有高峰值功率的连续激光器，用于更快、更清洁的穿孔 / 复杂切割；4）UHP 激光器。

尽管各个行业的需求各不相同，并且所有的使能技术均在特定领域使用，但 UHP 激光切割是推动激光切割性能提高的领先技术趋势。这一点可以从全球大量激光切割机采用 UHP 激光器中得到验证。随着 UHP 激光器越来越







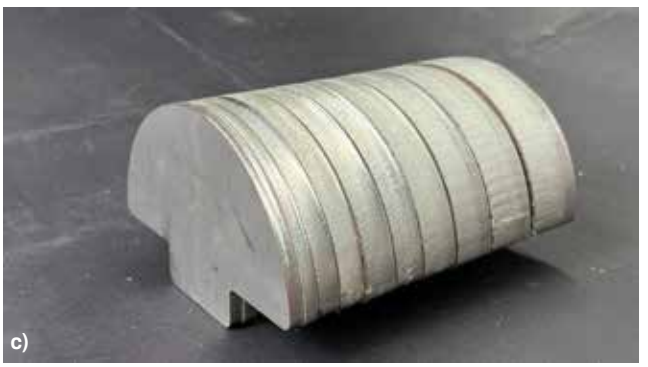






图4：连续模式下的全速切割：(a) IPG 40kW YLS激光器以4.5m/min (177ipm)的速度，空气切割28mm厚的碳钢；(b)IPG 40kW YLS激光器以2.3m/min (90ipm)的速度，空气切割40mm厚的不锈钢；(c) IPG 30kW YLS-ECO激光器，氮气切割3~25mm厚的不锈钢型材；(d) 15kW功率，氧气切割30mm厚的碳钢。

广为人知，应用工程师们正在意识到 UHP 激光切割机在产量和质量方面所带来的优势。

UHP 激光器在厚板切割中的切割厚度、切割质量和成本效益优势显著，特别是在 15kW 和更高的功率下，其比高电流强度等离子切割机更具竞争力。对比测试显示，对于厚度达 50mm 的不锈钢，20kW 光纤激光器比高电流强度（300A）等离子切割机快 1.5-2.5 倍；切割厚度 15mm 的碳钢，速度快两倍以上。计算表明，切割厚度 15mm 的碳钢，与等离子体切割相比，使用 20kW 激光器，每米的总切割成本大约降低两倍。与使用高功率等离子体切割相比，使用 40kW 激光切割厚度 12~50mm 的不锈钢，速度要快 3-4 倍；使用 40kW 激光切割厚度 12~30mm 的低碳钢，速度要快 3-5 倍。

## 使用UHP激光器

与低功率激光器和其他切割工艺（例如等离子切割）相比，采用 UHP 激光器进行切割的主要驱动力是：更高的生产率和由此产生的更低的单工件切割成本。使用 UHP 激光器带来的速度增益为制造商带来了经济效益，例如，从 30kW 到 40kW 功率增加了 33%，但切割速度却提高了 66%。

UHP 激光器能够实现碳钢的高质量、快速空气辅助切割，这比氧气切割（速度慢）和氮气切割（成本高）更具优势。在测试中，用 40kW 空气辅助切割厚度达 50mm 的碳钢，比用高功率等离子切割快 3-4 倍。

UHP 激光器使激光切割在许多其他方面更具竞争力。例如，能够增加切割厚度（切割厚度达 230mm 的材料），提升切割质量，减少或去除后续处理成本（能够最大限度地减少残渣），减少占地面积和设施成本，降低劳动力要求，以及提高穿孔的质量和产量。

随着 UHP 激光器的功率和能效的不断提高，这些优势将变得更加明显：提高其在不同行业中快速、经济地改变切割应用的能力。❑

参考文献

1. E. A. Shcherbakov et al., “Industrial grade 100 kW power CW fiber laser,” Advanced Solid-State Lasers Congress (2013).
2. See https://bit.ly/3BwOdlS.

## 大族光子自研30kW连续光纤激光器

大族光子的 HL-CM-30000 连续光纤激光器，搭载全新的高功率光模块，电光转换效率高于 40%，降低整机用电成本。配套新一代自主研发电控系统，设备兼容性强，操作简单更人性化，实时内部监控，数据反馈响应快，调制脉冲响应处于微秒量级，主要应用于中厚板切割。

激光切割

# 超高功率激光切割市场继续发展

*激光切割市场在激光工业应用中占据最大的市场份额。近年来，随着对中厚板切割需求的增加，激光切割市场呈现出了可喜的增长势头。*

文/Antonio Raspa

目前，切割金属板材主要有两种方法：等离子切割和激光切割。等离子切割可以追溯到 20 世纪 50 年代，当时它是以火焰切割替代品的身份出现的。等离子切割的工作原理是：将过热的电离子化气体（即等离子体）从喷嘴高速向工件喷射，然后在气体中形成电弧，这种电弧使一些气体电离，在这个过程中形成一个导电的等离子体通道；当来自切割等离子体的电力沿着等离子体传输时，会产生足够的热量去熔化工件，随后等离子体和压缩气体将热熔融金属吹走，导致工件分离。

激光切割最早是在 20 世纪 60 年代发展起来的，当时是作为一种在金刚石模具上开孔的方法。这种热切割过程使用计算机引导的高功率激光，在氧气、氮气或压缩空气的辅助下，来燃烧、熔化、汽化或吹走被切割的材料。激光束从激光源中发射出来，然后通过合适的导光线路（包括多个反射镜或光纤）传输到包含透镜的激光切割头中，透镜将光束聚焦到材料表面进行切割和穿孔。

激光切割主要使用两种类型的激光器：工作波长为 10.6μm 的 $CO_2$ 激光器和工作波长约 1μm 的固体激光器（碟片激光器和光纤激光器）。$CO_2$ 激光器成本更低廉，但是它们不适合切割铜、黄铜和铝，因为 $CO_2$ 激光无法在反射性表面上工作。相比之下，固体激光器除了更高的能量 / 电光转换效率、能加工更广泛的材料外，还具有更高的加工速度，因为上述材料对 ~1μm 激光的吸收率，比对 ~10μm 激光的吸收率更高。

当然，每种切割方法都具备各自的功能和好处，每种切割方法也都有各自适用的领域。总的来说，激光切割的主要好处是它的非接触性，它利用热量切割材料，而且更精准；等离子切割的主要好处是，它适用于切割不同类型的金属。激光切割和等离子切割之间存在如下几个关键区别：

（1）**切割技术**：等离子切割使用带有电弧的气体混合物；而激光切割使用聚焦的光束。




图1：激光切割厚度50mm的金属材料。

（2）**切割精度**：有一些高精度切割任务是等离子切割无法处理的，如切割精细的锯片。相比之下，激光切割的精度要高得多。

（3）**所需资本投入**：等离子切割相对较低；而激光切割相对较高。

（4）**切割速度**：等离子切割机相对较慢；而激光切割机通常可以比等离子切割机更快地切割金属，并且能耗更少，是一种更环保的金属切割方法。

（5）**切割厚度**：等离子切割机通常可以切割任何类型的金属，厚度可达 80mm。激光切割机通常只能切割厚度达 25mm 的材料。

（6）**通用性**：等离子切割机仅限于切割应用，可以切割所有类型的金属。激光切割机可以切割、雕刻和焊接，并可用于切割陶瓷和玻璃等非金属材料。

综上所述，相比于等离子切割，激光切割的优势更多。首先，加工的材料范围广，激光切割适用于工业制造中常见的所有材料，从钢到铝、不锈钢和有色金属板，再到塑料、玻璃、木材或陶瓷等非金属材料。第二，在加工形状方面自由度高，激光束仅在局部加热材料，而工件的其余部分几乎没有热影响。这意味着切口宽度与光斑直径差不



图2：100kW光纤激光源。

多，从而能够平滑、无毛刺地切割出复杂的工件轮廓。第三，激光切割还可以通过超短脉冲形成“冷加工”，几乎所有材料都会在超短脉冲的作用下快速蒸发，几乎不产生热影响，实现高质量切割边缘。这使得激光非常适合加工复杂的金属件，如切割医疗用的支架和显示行业使用的化学硬化玻璃。

## 光纤激光器

20 世纪 80 年代末，第一批商用激光切割设备问世，它们使用单模二极管泵浦，输出功率只有几十毫瓦。然而，许多激光应用需要的是瓦级的光功率。随着 4W 掺铒光纤激光器的推出，激光功率实现了向瓦级的跃迁。这一发展为 20 世纪 90 年代激光切割发展的黄金时代奠定了基础，当时，业界开发出了 10W 及更高功率的单模光纤激光器，它们已经能适用于微加工和其他应用，这也是当时开发出的真正的高功率光纤激光器。

很快，有更多高功率激光器进入市场。21 世纪的最初几年，光纤激光切割被引入商业市场。第一台用于切割反射金属的光纤激光器于 2008 年推出，可以通过不同的激光束传输方法来切割铝、黄铜、铜和镀锌钢等金属材料。

## 市场现状

2020 年，全球激光切割机市场估值为 43 亿美元，预计到 2027 年将达到 73 亿美元，复合年均增长率为 8%。[1] 市场增长的主要驱动因素是：对平滑精密切割、高切割速度和易编程技术的需求不断增长，这些需求主要来自国防、消费电子和汽车等制造领域。

意大利 Cutlite Penta 集团开发和制造光纤激光切割系统和 $CO_2$ 激光切割系统，该公司总裁 Martino Burlamacchi 表示，超高功率光纤激光源的可用性，极大地提升了激光切割技术，并且巩固了激光切割相比于机械切割和等离子切割的竞争优势。自 2021 年以来，Cutlite Penta 已经安装了 250 多台 20kW 以上的激光切割机。现在，切割厚度 20~50mm 的材料，激光切割的速度比等离子切割快 3 倍；激光切割比其他竞争技术更快、更便宜、更精确、更高效、更具备可持续性（见图 1）。

高功率激光切割的新市场已经打开，其应用已经渗透到钢结构件制造、造船厂和建筑机械等领域。Martino 认为，激光切割替代等离子切割正引领着一场可持续发展的变革；在这场变革中，对材料和电力的投资有望持续减少 $CO_2$ 排放。

Civan Lasers 是一家总部位于耶路撒冷的高功率光纤激光器生产商，该公司首席执行官 Eyal Shekel 表示，超高功率激光切割正在使用等离子切割替代方法的市场上开辟出新机会。他解释说，其中一种新的可能性是使用 100kW 单模激光器切割和焊接厚度达 50mm 及以上的金属。这种光束直径可调的强大激光器，允许在两种应用中使用一台设备，从而能减少生产成本（见图 2 和图 3）。

nLight 公司切割产品线经理 Michael Hepp 认为，在氮气辅助下，高功率光纤激光器在切割厚度为 5~20mm 的金属方面，表现出了令人满意的高生产率。当然，功率并不是提高生产率的决定因素，在切割薄板时提升功率的用处就不大，因为会有其他特性限制速度；在使用氧气辅助切割厚钢板时情况也类似。在这些情况下，其他技术方面的改进（特别是光束整形），却在提升速度和质量方面取得了重大进步。在 Hepp 看来，激光功率是衡量工具生产率的一个不完整的指标，尤其是在材料种类和厚度方面会灵活变化的车间。因此，对于购买激光切割设备的用户来说，重点是要了解哪些参数能够提供对自身业务最有价值的生产力提升，然后再将资金投向那里。

德国通快公司 TruLaser 产品线高级产品经理 Hendrik Meidert 也对高功率的局限性给出了提醒。他指出，虽然 30kW 或更高的激光功率可以进一步提高激光切割的生产率，尤其是熔合切割，并有可能在厚板切割领域取代其他加工方法，但是它们只能以经济上和生态上可持续的方式使用，适用于可以将高切割速度转化为更短零件加工时间的板材厚度。这取决于用户的零件和材料情况。机器必须




图3：激光光束整形对切割质量的影响。

具有高利用率以降低零件成本。这反过来又需要合适的机械和光学部件以及功能，来提高自主性。用户还必须合理安排仓储和物流，确保材料供应和成品零件的顺利流转，避免出现供应及运输瓶颈。基于这些原因，再加上超高功率激光器的边际效益不断下降，对于许多应用来说，6~25kW 的激光功率仍是最佳选择。

普雷茨特（Precitec）研发经理 Markus Kogel Hollacher 强调了生产率与激光切割头之间的重要关系。在 30kW 的功率范围内，激光功率和生产率之间几乎呈线性相关性；在这些功率下，激光切割头的性能成为焦点，因为它们必须在整个生产过程中保证恒定的切割质量，并且要实现全天候工作。

为此，Precitec 一直在研究光学元件的行为，并针对 30kW 功率完善了 ProCutter 2.0 切割头（见图 4）。ProCutter 2.0 与所有激光源兼容，NA 值达 0.18，并且结构超级紧凑，重量轻，同样适用于开坡口。由于其先进的冷却机制、集成的传感器和扩展的调节范围，ProCutter 2.0 切割头可自动运行，并能在 30kW 激光功率下保持长期稳定性。

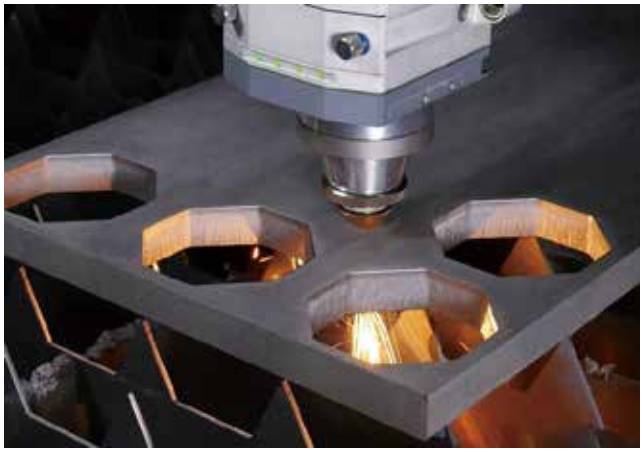


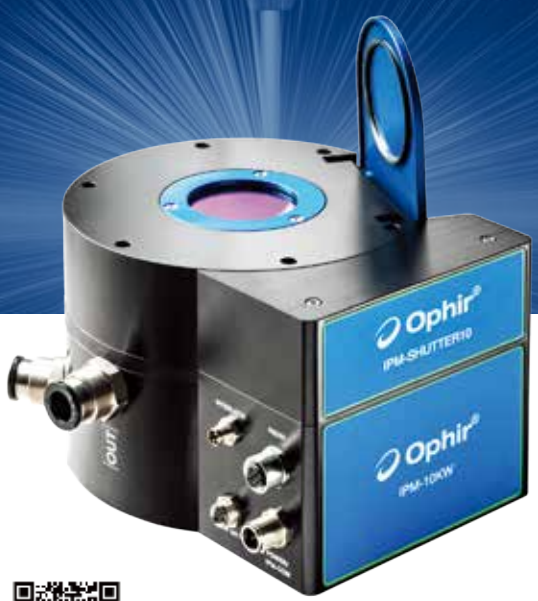
图4：ProCutter 2.0激光切割头在30kW的高功率下工作。

在当前的激光切割市场中，光纤激光器的功率不断增加，这大大提高了激光切割技术的适用性和生产率，并且使激光切割技术相比于机械切割和等离子切割更具竞争优势。❑

参考文献

1. Laser Cutting Machines – Global Market Trajectory & Analytics, Research and Markets (2021).

优化您的激光测量设置




新

工业功率计 IPM

多功能、可靠的高功率测量系统

模块化设计实现高灵活性——使您能够为您的应用打造出色解决方案。恶劣生产环境的理想选择。

· IP62（安装快门）——防尘和防碎屑
· 测量范围大（100W-11kW）
· 光谱范围 0.9-1.1µm
· 入射角，最大 +-5°
· EtherNet/IP、Profinet和 RS232通信
· 可以倒置或正面朝上安装

欲了解更多信息，请致电+86-010-62634840或访问www.ohiropt.com/photonics

mks | Ophir®

激光焊接

# 可调环模光纤激光器实现方形电池罐－盖的高速、高质量焊接

*方形电池的罐–盖焊接在大批量生产中面临挑战。焊接必须经济可行，并且要达到气密性要求，保证电池在整个生命周期内可靠工作。*

文/Jean–Philippe Lavoie，Marc Auger

许多制造商正在努力提高电动汽车（EV）的性能和经济性。这项努力的一个主要方向是致力于改进电池技术，特别是开发新方法和新材料，来降低制造成本（尤其是缩减生产周期）并延长可靠性。方形电池的罐 - 盖焊接就是一个典型案例，激光焊接技术的最新发展，在这项应用中获得了巨大成功。

方形电池的罐 - 盖焊接，具体来说，是指将盖子密封在包含电池所有电极结构的外壳（罐体）上的过程。这种密封是在将这些内部部件组装到罐体中之后完成的。由于这项工作需要在生产周期接近尾声时（也就是在大部分价值已被纳入组装之后）进行，因此在这个阶段报废零部件的成本特别高。

整个密封操作需要进行相当长的连续焊接。典型的方形电池宽约 20mm，长约 300mm，焊缝长度要环绕整个电池周长（约 640mm）。制造商希望通过焊接工艺实现的关键目标包括：

- 即使原始零件不能完美或一致地装配在一起（尤其是在拐角处），但是必须保证焊缝的气密封，整个焊缝上不许有任何间隙。
- 焊接必须达到足够的熔深和低焊缝孔隙率，使焊缝足够牢固，即使在受到振动和机械冲击时，也不会开裂，保障电池的使用寿命。
- 焊接过程不能产生任何金属飞溅。最重要的是，飞溅不能发生在电池内部，否则可能会造成电气短路。焊接铝时（电池罐体通常由铝制成），飞溅是一个显著问题，这主要是因为铝的高反射率和低熔化温度，这些可能导致熔池不稳定，容易引起飞溅。
- 必须限制输入电池的热量，以避免损坏内部零件。

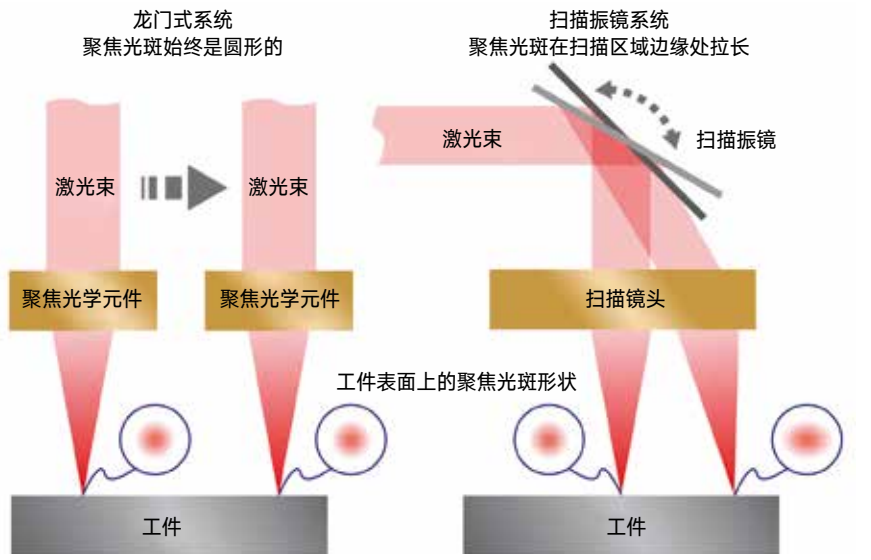



图1：与扫描系统相比，龙门式系统可以产生更一致的焊缝，因为它们不会产生任何光束畸变，但速度较慢，这在焊接较大零件时是个问题。

光纤激光器可以满足所有这些要求，因此，它们已经成为方形电池罐 - 盖焊接的有效生产工具。在最常见的加工中，光束聚焦光学元件在“龙门式结构”上四处移动，以实现所需要的焊缝形状。

这种龙门式方法提供了高度精确的机械对准和高度一致的焊接。这是因为激光束始终在正确的位置以相同的入射角照射到工件上。但问题在于，将光学元件根据方形电池所需的相对较长的焊缝来移动的话（或移动电池），会使龙门式系统变慢。这是个亟待解决的问题，因为较慢的速度会直接转化为较高的生产成本。

## 焊接大面积的更快方法

随着制造商努力大幅提高其生产

能力，以及采用更大尺寸的方形电池，龙门式焊接系统的速度限制成为了一个重要问题（见图 1）。众所周知，扫描系统可以提供更高的焊接速度。这是因为使用扫描振镜移动没有重量的激光束，比移动整个聚焦光学组件要容易得多。

但是，当焊接较大的零件时，扫描系统也面临着一些挑战。首先，光束在接近视场极限时会发生几何变形，从圆形变为椭圆形。由于这些零件的尺寸很大，这个问题在电池罐体的拐角和端部尤其明显。其次，这种光束变形会与拐角处扫描方向的变化相结合，会产生不符合客户质量要求的焊缝。此外，零件上不断变化的光束大小和入射角，也会改变工作表面上的功率密度，从而影响其焊接方式。

直到最近，上述所有问题才有办法完全解决。解决方案是引入光纤激光器，其空间光束分布可以动态变化。这允许焊接系统补偿扫描场边缘处的几何光束变形，以及加工过程中的扫描速度变化。

相干公司将这项技术化身于可调节的环形模式（ARM）光纤激光器。在这种类型的激光器中，光束不仅仅是传统的单一光斑点。相反，它拥有一个传统的高斯分布的中心光斑，在这个中心光斑的周围，还环绕着另一个同心的激光环。

最重要的是，可以在非常短的时间内，对中心光斑和环形光的功率进行独立控制。

这样，可以对激光能量在焊接过程中的空间分布方式，进行精确的高度动态控制。

## 强大的功率控制

正确使用该方法，允许 ARM 激光器使用扫描振镜系统，实现高质量的方形电池盖焊缝。具体地说，就是可以即时更改中心光束和环形光束的功率比，使激光器始终如一地产生相同的焊接结果，即使在光斑被拉长的情况下也是如此。

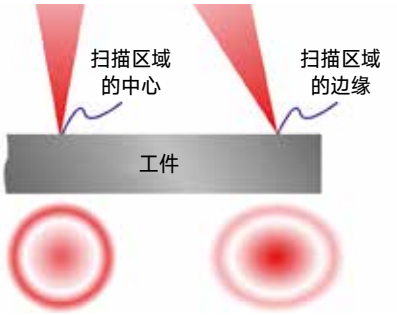
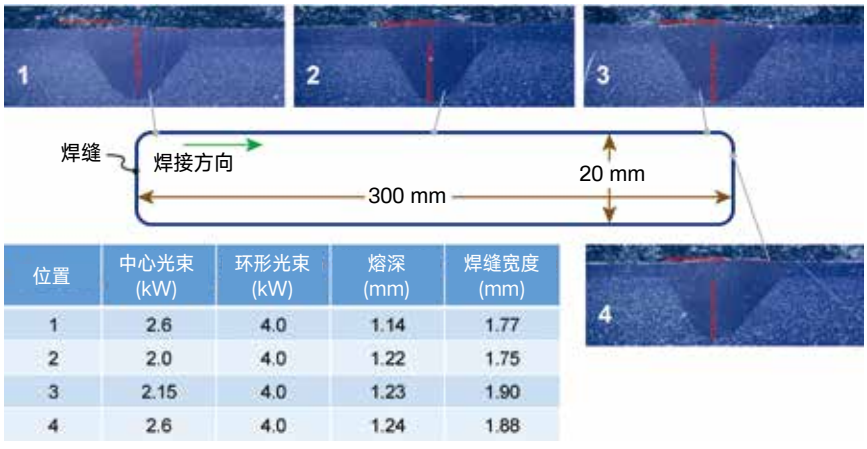



图2：改变中心光束和环形光束之间的功率比，可以补偿扫描区域边缘光斑尺寸的变形，以保持一致的焊接质量。

总功率（和功率比）也可以足够快地变化，以校正扫描振镜速度的变化（见图 2）。这一点非常必要，因为光束在进入焊缝拐角时会减慢速度，然后在离开拐角时重新加速。此外，这种功率调制在先进的主动闭环控制下执行，以确保高工艺稳定性、一致性和可重复性。

ARM 激光器还可以独立控制焊缝宽度和熔深。这样就无需在部件装配时保持严格的公差（间隙宽度），而降低该公差可以降低生产成本。它还可以最大限度地缩小热影响区(HAZ)，实现高速扫描（>350mm/s），并能够覆盖大扫描区域（见图 3）。




| 位置 | 中心光束 (kW) | 环形光束 (kW) | 熔深 (mm) | 焊缝宽度 (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.6 | 4.0 | 1.14 | 1.77 |
| 2 | 2.0 | 4.0 | 1.22 | 1.75 |
| 3 | 2.15 | 4.0 | 1.23 | 1.90 |
| 4 | 2.6 | 4.0 | 1.24 | 1.88 |

图3：在300mm×20mm的方形电池上，实现了连续的罐-盖扫描焊接。使用HighLight FL-ARM 100/290激光器和II-VI RLSK扫描振镜，以350mm/s的速度工作，在整个大扫描区域上保持了高度一致的焊缝几何形状（见表格和照片）。沿焊缝不同位置的中心光束和环形光束的功率如表中所示。

## 克服速度和质量之间的权衡

光纤激光器在工业材料加工应用中取得了巨大的成功，在过去的 20 年中取代了许多其他激光技术和非激光技术。然而，在大部分时间里，光纤激光器制造商都专注于开发更高的输出功率。

但目前在生产中能够支持电动汽车和轻量化的最苛刻的焊接工艺，需要的不仅仅是更高的功率；这些应用更需要巧妙的工艺。具体而言，这意味着要能够精确地控制激光功率在工件表面上的分布方式，无论是在时间维度还是空间维度。这对于成功地焊接薄材料或热敏材料、难加工材料（如铝、铜和高强度钢等）以及焊接异种材料，都是非常必要的。

ARM 技术是为满足上述需求而推出的一项创新。它克服了方形电池的光纤激光焊接在速度和质量之间的传统折衷，并使扫描焊接系统成为一种具有成本效益的、高性能批量生产方法。❑

增材制造

# 蓝光激光器提升金属 3D 打印的速度、质量和效率

*目前正在开发的蓝光激光技术，有望在金属3D打印中，实现更快的打印速度、更高的打印分辨率和更好的打印质量。*

文/Mark Zediker，Jean-Michel Pelaprat

五年前，第一台商用蓝光工业激光器的问世，改变了材料加工应用。由于所有金属对蓝光的吸收能力都比对红外光的吸收强得多，特别是铜、铝和金，它们对红外光的反射率很高，所以蓝光工业激光器很快就受到了市场的青睐。这种基本的物理特性直接提高了金属加工应用的性能。蓝光激光的应用，首先影响了焊接领域。通过增强光吸收提高了焊接速度和焊接质量。由于金属对蓝光优异的吸收能力，目前，蓝光正被引入增材制造领域。

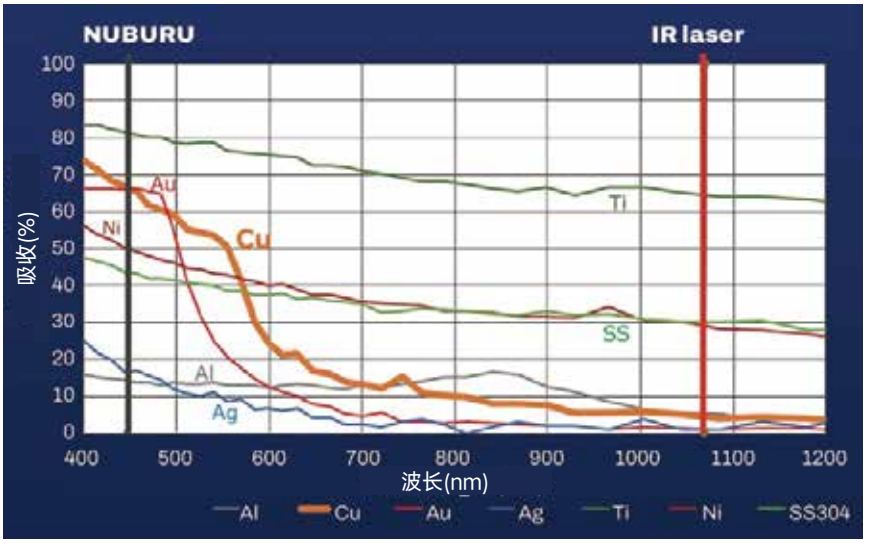



图1：金属的基本物理属性决定了其吸收电磁辐射的能力。数十种工业应用中重要的金属对蓝光的吸收能力比红外光强得多，尤其是铜，其对蓝光的吸收能力是红外光的13倍。

增材制造最初是用塑料、聚合物打印原型件。虽然这些打印的原型件有助于检查部件的外形、匹配性和功能，但打印材料的有限性限制了增材制造的应用范围。只有将增材制造技术扩展到金属件的制造中，其应用才能得到进一步扩展。现在，蓝光工业激光器已经可以集成到激光金属 3D 打印机中，如基于直接能量沉积（DED）和粉末床熔融（PBF）技术的 3D 打印设备。

增材制造面临着众多挑战，而蓝光激光器为克服这些挑战应运而生。例如，蓝光 3D 打印的打印速度、效率和质量为大规模生产提供了可能性。激光技术和增材制造工艺的进步，都将促进增材制造的进一步发展，并实现新的应用。

## 基本原理

金属原子的电子结构，决定了它们与电磁辐射相互作用的原理。对于反射率很高的金属，如铜、铝、金等，它们固有的原子结构使其对红外光的吸收能力非常弱。因此，红外光辐照时，较低的功率密度只是被金属表面反射掉；而只有当功率密度非常高的时候，金属才能吸收一部分能量。

然而，随着功率密度的增加，光束照射会在工件上形成孔洞；红外光在孔洞边沿多次反射，会导致金属对能量的吸收大幅增加。这时，能量吸收过高又导致了不可控的情况：吸收的增加会引起剧烈的汽化，这将产生空洞和飞溅，最终导致焊接质量变差。相反，如图 1 所示，这些金属对蓝光的吸收性能非常好。因此，用蓝光熔化反射率很高的金属，相对平稳且可控。

对于焊接而言，其目标是产生一个坚固的机械连接（有时是电气连接），其特点是焊缝要均匀、连续平滑。蓝光激光可以精确调控加工速度、光

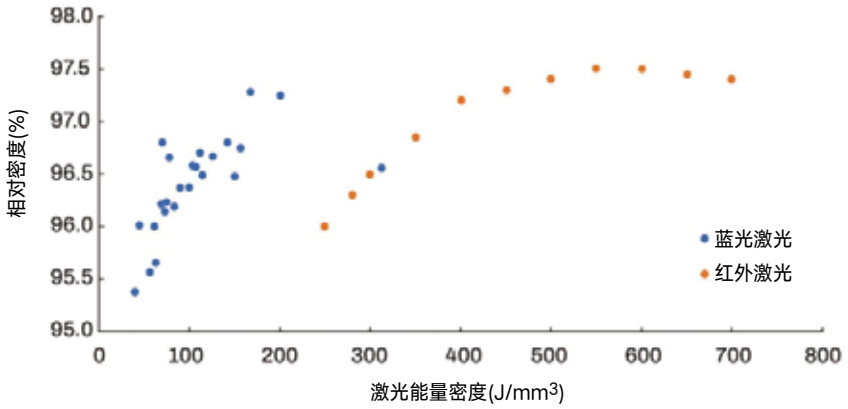



图2：与红外激光相比，蓝光激光增材制造能以较低的能量密度，打印更高密度的金属件。

斑大小、光束能量等参数，因此可以实现高质量焊接。此外，蓝光激光还可以实现不同金属、不同厚度以及不同几何形状的工件之间的焊接。相比之下，使用红外激光工艺参数的窗口非常窄，这不仅限制了生产效率，而且也不能实现高质量焊接。

金属增材制造在本质上是小范围的连续焊接，金属粉末相当于焊料。金属粉末吸收激光能量后熔化，使其与相邻材料相连。激光增材制造之所以具有吸引力，是因为激光在众多应用中具有独特的优势：激光可以灵活地、无接触地将能量传输到精确的位置。直接能量沉积技术和粉末床熔融技术，提供了两种不同的给料方式。例如，直接能量沉积技术，直接将原料导向激光打印头；而粉末床熔融技术，则在粉末床上铺上均匀的粉末材料，激光在其上以特定的模式移动，逐层融化粉末。

与焊接一样，铜、金、铝合金等高反射金属，为红外激光增材制造带来了两个挑战。第一个挑战是，当用高强度红外激光熔化金属粉末时，较小的粉末颗粒大量被汽化，这就需要控制汽化颗粒的再沉积。第二个挑战是，如果使用环形激光，在激光作用之前粉末预热会浪费大量能量。

蓝光可以被大多数金属吸收，因



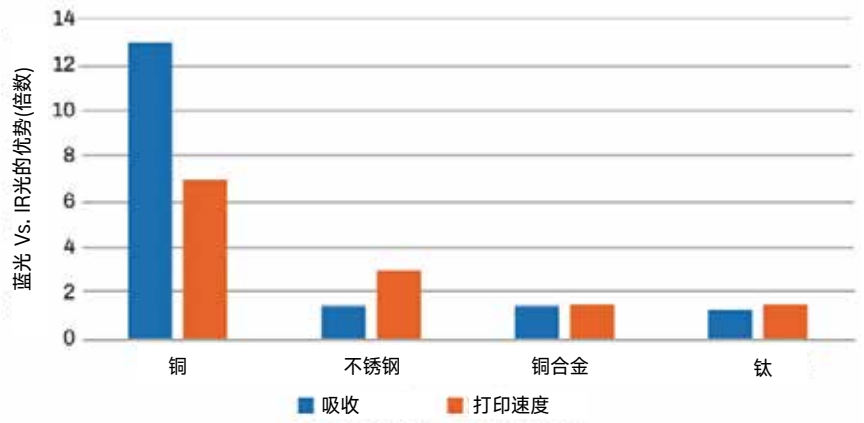



图3：多种工业级重要金属对蓝光的吸收率，比对红外光的吸收率更高，这使得蓝光增材制造能够实现更高的打印速度。

此可以用较低能量的蓝光激光实现可控的熔池，并将汽化降到最低。这为多激光系统的扩展提供了一种手段，而不必求助于复杂的气流管理。因此，蓝光的打印件密度更高，打印速度更快，并能通过多个并行激光提高打印速度。如图 2 所示，与红外激光相比，打印相同密度的金属件，蓝光激光的效率更高。

## 投入应用

尽管基础物理学为蓝光激光在材料加工应用中取得成功提供了一个必要因素，但实现这一前景还需要工程实践。当 DED 和 PBF 采用蓝光打印时，在没有后处理优化的情况下，打印的铜块密度大于 97%，并且具有良好的表面质量和尺寸精度。而打印的不锈钢测试片的最小密度高达 98%。因此相比于红外激光，蓝光增材制造优势明显。

图 3 对比了蓝光相对于红外光在增材制造打印性能上的改进。打印效率的关键指标（本质上是衡量每瓦的打印速度）表明，蓝光比红外光要提高 1.4 倍到 7 倍以上。这些优势在不锈钢、钛、铜和铬铜合金中也是一致的，这也表明蓝光能进一步拓展到其他更多的应用领域。

具体来说，红外激光打印高反射材料如金、铜或铝时，速度比较慢，并且打印质量较低。蓝光激光不仅在珠宝、牙科和医疗植入器件等领域得到应用，而且也可以用于金属增材制造，用来打印用于航空航天和电动汽车所需要的黄金或纯铜部件。例如，图 4 显示了一个典型的 3D 打印件——火箭发动机喷管的缩比件，其中包括了复杂的内部冷却流道。更高的打印速度和更好的气流管理，将使 3D 打印更加大众化，用于批量生产，并推动 3D 打印的广泛应用。

## 当前的能力和未来的可能性

自 2017 年问世以来，蓝光工业激光器的规格迅速提高。激光功率和亮度等关键指标的提升，扩大了其应用范围。早期的蓝光激光器用于电池制造，可以将几十个薄箔焊接在一起，并且机械强度和电信号保真度都非常高，展示了其优异的加工性能。

在早期成功应用的基础上，随着蓝光激光器的输出功率进一步提高，（超过了 500W，然后实现了 1kW 的里程碑），其应用范围也在逐渐扩大。例如，用单一激光源可以将电池的箔片、标签、母线和外壳连接起来。众多的技术进步使激光可以与工业化的扫描系统集成，提高激光加工的质量和效率，因而促进消费电子的应用。这些应用反过来又促进了电动汽车零部件连接工艺的发展，并将其应用于航空航天和医疗领域。为了实现上述应用目标，激光技术的进步和加工工艺的发展并驾齐驱，并且这一趋势必将在增材制造中继续下去。

增材制造要用于汽车零部件等领域，需要进行工艺优化，以进一步提高体积打印效率。目前正在开发的蓝



图4：3D打印的喷气发动机喷嘴，展示了蓝光激光打印精细结构（包括内部冷却流道）的能力。

光激光技术将通过提高打印速度、打印分辨率以及打印质量，促进增材制造的发展。更高亮度的蓝光激光器即插即用，可以直接替代红外激光器，显著提高 3D 打印机的打印性能，扩展可打印材料的范围。图 5 展示了将蓝光激光器直接集成到商用 3D 打印机中。

## 稳步快速发展

蓝光工业激光最有发展前景的一项应用就是区域打印（area printing），这是一种新型 3D 打印技术，其特点是多光束并行扫描，可以实现大面积 3D 打印，但该技术仍处于发展的早期阶段。NUBURU 公司正在和 U.S. Air Force 开展合作，研究区域打印技术。

与其他新技术的发展一样，蓝光激光性能的持续增强和用于区域打印等工艺参数的优化，都面临着相同的挑战。技术性能的提升，对于任何新产品的应用增长都是必不可少的，但是供应体系也必须支持市场的需求。由于其优异的材料加工特性，蓝光工业激光器正在被众多行业采用，必然要求供应链发生变化。但随着这些变化的发生，将会有更多的蓝光激光器应用于医疗保健、显示和生物仪器等众多行业。




图5：蓝光工业激光器灵活的模块化设计，可以直接用来设计先进的增材制造打印机，也可以很方便地集成到现有的3D打印机中。

从过去的历史来看，蓝光激光器带来的增长似乎是不可避免的，增材制造提高了材料利用效率，加快了跨行业创新设计的上市时间，显著降低了运营和维护成本。但是，如果金属 3D 打印仍然价格昂贵且效率慢，这些优势就无法实现。蓝光工业激光器消除了这些障碍，提供了快速、经济、高质量的金属件制造，达到了增材制造的最终目的。❑



增材制造

# 光束整形技术将激光粉末床熔融技术带向新维度

*光纤激光器光束整形技术，能够显著提升金属激光粉末床熔融技术的打印速度和工件打印质量，并大幅降低成本。*

文/Rob Martinsen，Andreas Rudolf，Dahv Kliner

增材制造涉及多种技术，其所使用的材料与所生产的产品一样，具有多样性。激光，由于其出色的可操控性和高功率，已经成为增材制造的一种有效工具，并且为增材制造的大批量生产提供了可能性。

自 1996 年问世以来，激光粉末床熔融技术（L-PBF）已经发展成熟，成为了金属增材制造的一种领先工艺。材料的逐层熔化使工件设计获得了前所未有的自由度。最初，L-PBF 仅用于原型设计和开发；如今，现成的工业化 L-PBF 打印机甚至可以打印像铜这样具有挑战性的材料。此外，激光粉末床熔融技术打印的产品几乎能应用到各个商业领域，包括医疗、航空航天、汽车和机械等。

虽然增材制造在工件设计自由度方面有着巨大的吸引力，但是 L-PBF 的生产成本和时间成本仍然太高。只有将 L-PBF 的生产成本和时间成本降低一个数量级，才有望使增材制造在传统工艺链上得到广泛应用。

激光源对降低增材制造的成本起着关键作用。通常情况下，激光的输出功率可以在时域上高频调整，但其空间强度分布是固定的。为了提高生产效率，光束轮廓必须进行实时调整，以匹配工件局部所需要打印的结构尺寸。

为了打印非常精细的结构（如格栅或薄壁结构），L-PBF 打印机使用的是具有高斯强度分布的单模激光。当打印大块截面时，这种光束形状会限制打印速度，因为：

- 由于光束直径较小，打印时光束每次扫描的间距比较小，导致面扫描速度较低。
- 线扫描速度与激光功率密切相关。激光功率通常被限制在几百瓦，因为过高的高斯峰值强度会导致熔池穿孔，产生过量的飞溅和烟尘，使打印过程不稳定。

使光束散焦和放大光束都不能解决这些问题，因为这两种方法并没有改变高斯光束的形状。理想情况下，光束轮廓在其形状和直径上是相适应的，而不会给精密的自由空间光学装置增加复杂性。初步分析表明，环形光束和鞍形光束（即中心有一定强度的环形光束）最适合在熔化的粉末中产生均匀的横向温度场分布(见图 1)。因此，理想的 L-PBF 激光源，应该既能提供单模光束用于打印精细结构，同时还能提供一系列较大的环形光束和鞍形光束，用于打印更大的特征。

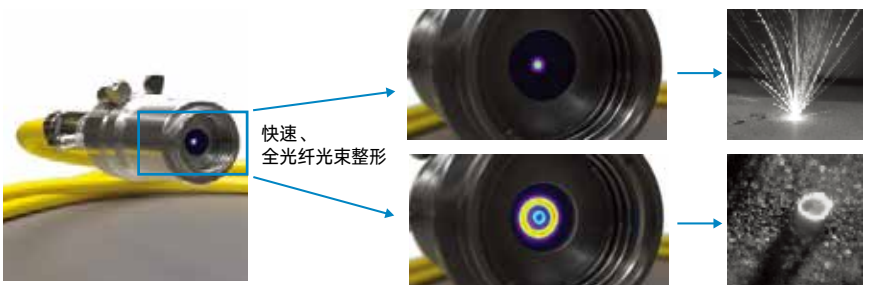



图1：AFX激光采用了全光纤光束整形技术，可以快速切换输出光束的大小和形状。光束轮廓可以在单模、环形以及两者之间的任意一种形状之间进行切换。当与工件相互作用时，环形光束和鞍形光束产生的烟尘和飞溅明显减少。

## 全光纤光束整形

能够满足上述所有要求的独特光束整形技术，是 nLIGHT 公司的 Corona 系列光纤激光器的基础，该系列中包括一款专为 L-PBF 应用优化的激光器 AFX，其最大输出功率为 1.2kW。

AFX 的导光光纤有一个单模纤芯（模场直径 14μm），单模纤芯被一个环形纤芯（直径 40μm）包裹。输出光束可以在单模纤芯和环形纤芯之

间任意地分配比例，因此从光纤中既可以输出单模高斯光，也可以输出直径为 40 μ m 的环形光，同时也可以输出介于两者之间的任意一种形状的光束（见图 2）。

因此，输出光束的直径（光束直径定义为强度分布的二阶矩，D4σ）可以在 15~45μm 之间调节，从而使光束面积的动态范围扩大约 10 倍。值得一提的是，所有 AFX 的输出光斑形状，都可以通过激光通信接口进行切换（就像调节激光功率或重复频率一样简单），切换时间小于 25ms。

加速寿命测试表明，光束形状切换 2000 万次的情况下，光束性能仍没有发生变化。光束在到达 QBH 输出连接器之前从未离开过光纤，这就消除了任何污染或错位。AFX 保证了每种形状的光束（每种光束通过设置“Index”值来切换）输出都有优异的光束质量，其 $M^2$ 值在介于 1-5 之间，从而产生了较大的聚焦深度。例如，在 5 倍聚焦的情况下（L-PBF 应用的典型值），单模光（Index 值设为 0）的瑞利距离（ZR）为 3.4mm，而最大环形光束（Index 值设为 6）的瑞利距离则增加到 8.1mm。由此可见，AFX 输出光在束腰两侧较长的距离内（~1/2 ZR），仍能保持其光斑形状。因此，AFX 为每一种光束形状都提供了较大的加工窗口。

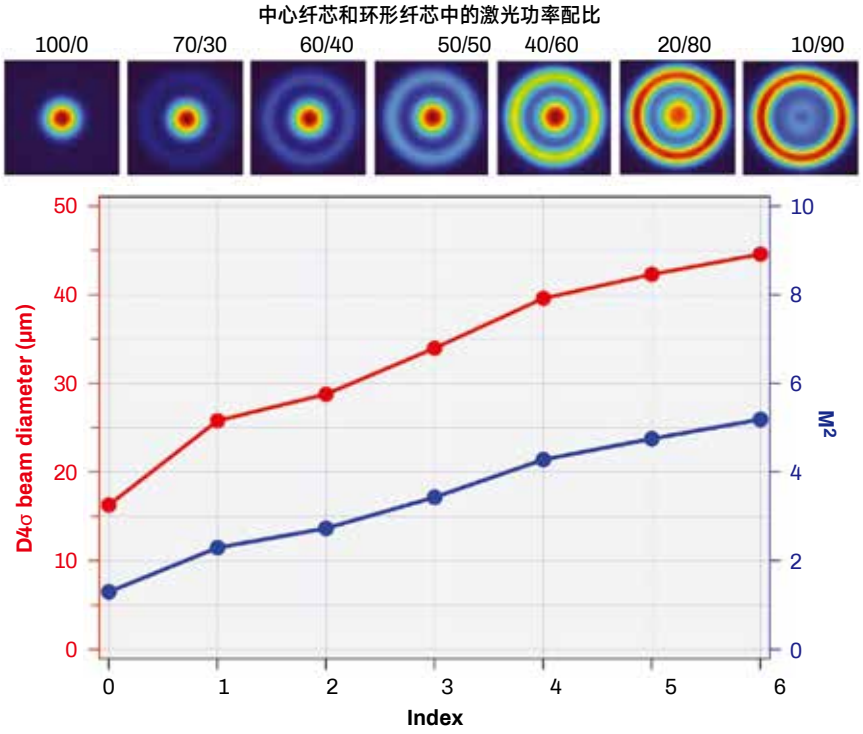



图2：AFX通过设置“Index”值来切换不同的光束形状输出。上图：激光功率在中心单模纤芯和环形纤芯之间不同功率配比形成的近场形状剖面图。下图：计算得到的光束直径（D4σ）和相应的$M^2$值。

## 提高L-PBF的打印速度和稳定性

一些 L-PBF 工具集成商和研究室，已经证明并量化了 AFX 在提高 L-PBF 生产率和打印件质量方面，所具备的优势。具体而言，AFX 不仅能显著提高 L-PBF 的打印速度（提高达 7.8 倍），而且还能增加工艺窗口，并且保持了优异的打印质量。这种无可比拟的优势组合，源于 AFX 精确控制工件热沉积的能力。与标准的单模光束相比，AFX 优化后的光束轮廓，极大地减少了熔池的不稳定性，减少了对材料质量和产量有负面影响的烟尘和飞溅的产生。这一优势反过来又使激光功率、扫描速度和 L-PBF 打印速度得到大幅提升。最近获得的结果如下：

- Aconity3D 公司证实，AFX 可以将钛合金的打印速度提高 7.8 倍，标准单模光纤激光的打印速率为 5.4cm3/hr，而 AFX 能将打印速度提高到 42.1cm3/hr。打印速度的提高包括两方面：第一，熔融区域的体积提高 4 倍；第二，扫描速度提高了两倍。打印速度提高的同时，也保持了优异的打印质量（密度 >99.8%）。[1]
- 2021 年，德国慕尼黑工业大学（Technical University of Munich，TUM）的 Grünewald 等人表明，AFX 可以同时提高 316L 不锈钢的 L-PBF 打印速度（约两倍）和工艺窗口。AFX 能够使用更高的激光功率和更快的扫描速度，并具有更大的工艺窗口（即在一定的功率范围内保持良好的打印件质量）。具体来说，试图提高单模高斯光束的功率会导致不良的球化或小孔效应，这就限制了 L-PBF 的生产效率。相比之下，Index 的值设为 4-6 时，AFX 功率增加的同时不会引起球化或小孔效应，因此可以提高打印效率。[2]
- 德国研究机构 Fraunhofer IAPT 的 Powder Bed Metal 研究团队，将一种铝合金（AlSi10Mg）的打印速度提高了 3 倍，并且在保持优异打印质量（密度 >99.9%）的同时，也提供了较宽的工艺窗口（见

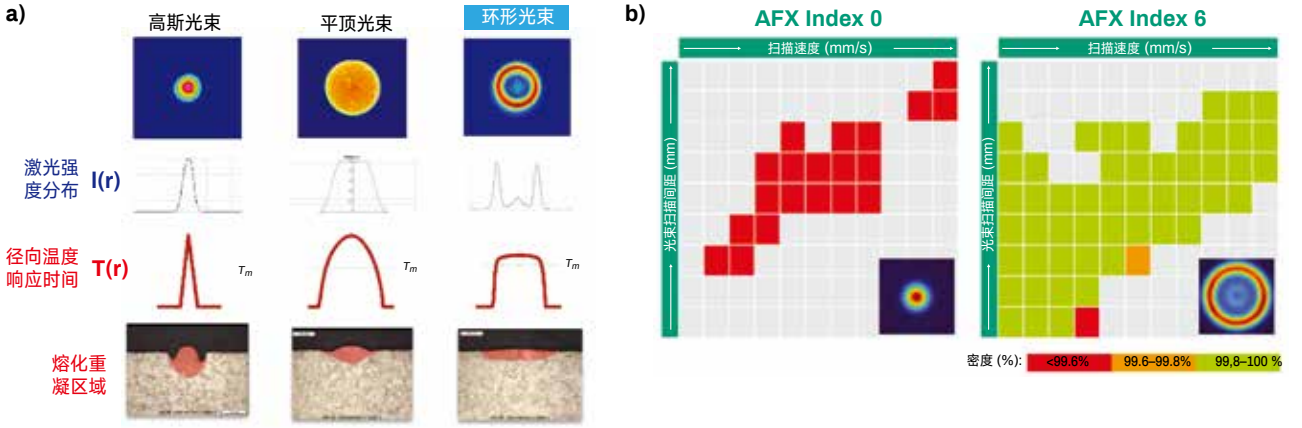



图3：熔池内的温度分布和重新凝固的材料形状，在很大程度上取决于激光强度分布。（a）高斯光束和平顶光束都会导致中心过度加热，从而产生次优的轨道截面。相比之下，环形光束产生了平坦的温度分布，形成宽而平的轨道横截面；（b）AFX环形光束结合了高扫描速度和较大的扫描间距；相比高斯光束，提高了打印速度，增加了工艺窗口，同时保持了优异的打印质量（打印件的密度不会降低）。

图 3）。随着进一步的优化，打印速度将会进一步提高。[3]

- 2022 年，Fraunhofer ILT（激光技术研究所）的 Laser Powder Bed Fusion 研究团队中的 Lantzsch 等人证明，AFX 提高了镍基合金（型号 625）的打印速率、工艺窗口和打印质量。

AFX 通过提高打印速度，使打印零件的总体成本大幅降低，如图 4 所示，对于一个典型的铝制增材制造工件，其成本能够降低 60%。

## 材料特性的局部控制

除了生产力和成本优势外，AFX 还通过控制局部微观结构和材料性能，为 L-PBF 制造开辟了新的维度。AFX 独特的激光输出模式，可以控制熔池内的热梯度和凝固动力学过程，因此可以控制材料的微观结构，为打印工件提供了全新的设计可能性。因为 AFX 光束的形状可以动态改变，微观结构可以在局部进行设计，可以为整个打印件赋予新的功能和优化特性：

- Aconity3D 公司比较了 AFX 环形光与单模高斯光（两者有效直径相同）对 L-PBF 打印镍基合金（型号为 Inconel 718）性能的影响。研究发现，AFX 环形光可以提高打印件的屈服强度和屈服伸长率。这些关键的材料性能通常是反相关的，需要进行权衡，但 AFX 解除了两者的反相关。这种能力为优化打印件的功能和性能提供了潜力，特别是可以在同一打印件中实现可变的材料特性。[5]
- TUM 的研究团队表明，AFX 可以控制不锈钢 316L 的微观结构和材料性能。不同的 AFX 光束形状，能够优化熔融轨道的几何形状和温度曲线，从而控制晶粒生长的方向和纹理，进而决定材料的性能。领导这项研究的 Wudy 教授指出，通过对晶粒生长的战略性控制，“打印件的性能可以被微调”。例如，在不需要任何后处理的情况下，可以使打印件的某个局部特别坚硬或柔韧。使用复杂的激光辐照方法，单个打印件中也可以实现性能的改变。[6]

## 消除L-PBF的限制

AFX 光纤激光器提高了 L-PBF 打印众多金属和合金的生产率，大大提高了 L-PBF 的经济效益。特别需要指出的是，L-PBF 优化的光束形状，可以输出直径为 14μm 的单模高斯光，也可以输出直径为 40μm 的环形光，同时也可以输出介于两者之间的任意一种形状的高质量光束。光束形状可直接从光纤端口快速切换，光路中没

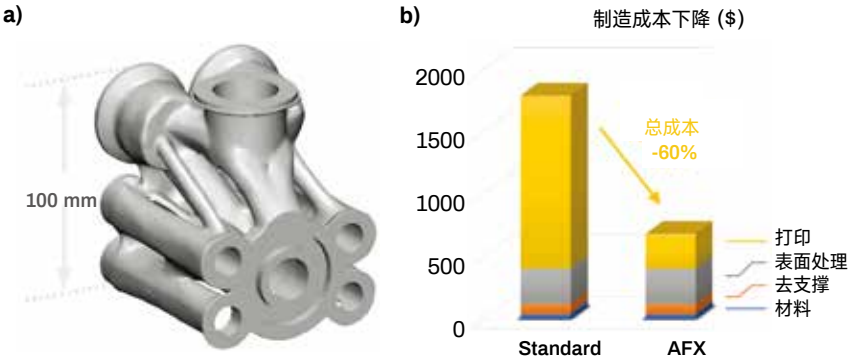



图4：（a）一种典型的增材制造工件，由铝制成，重量558g；（b）由于其体积较大，适用于AFX激光打印，打印速度平均提高5倍，总体成本降低了60%。

下转第36页

光束测量

# 如何避免激光加工过程中的隐患？

*为了确保高质量的激光加工，需要特别注意激光系统中存在的六大隐患。测量激光器的性能是避免这些隐患的最佳方法之一。*

文/John McCauley

如今激光加工的可靠性和可重复性，已经使制造商能以更高的效率生产更高质量的零件。从增材制造中的烧结到电动汽车中的部件加工，每天业界都在开发激光技术的新应用，而激光技术也随之发展，激光加工变得更加稳固可靠、更加普遍。

但是在工业激光器的部署、操作或维护过程中，仍然存在着许多隐患。对于在激光加工过程中保持一致性，激光操作人员可能会产生一种错误的安全感，并养成坏习惯。这些隐患可以归因于几个不同的问题，包括了解激光在材料加工应用中的行为、了解现在的激光产品与传统激光产品的区别，以及了解应该在什么时间、什么位置测量激光性能。区分事实与假象，是确保高质量激光加工的关键。



图 1：激光常用于汽车制造中的焊接应用。激光系统监控有助于确保焊接的一致性和高质量。

## 隐患 1

不要以为现在的激光加工都非常稳定，以至于无需太多监测（见图 1）。在 20 世纪 50 年代激光出现后不久，材料加工应用就得到了发展。二氧化碳（$CO_2$）激光器可以产生波长 10.6μm 的激光，凭借其强大的功率、相对低廉的操作成本和易维护性，$CO_2$ 激光器一直以来都是激光制造的支柱。得益于大量激光操作人员开发出的沿用至今的操作和维护规范，目前仍有数十万台 $CO_2$ 激光器在使用中。

20 世纪 80 年代，1μm 激光器（光纤激光器、直接半导体激光器、碟片激光器）作为工业加工工具开始兴起；此后 1μm 激光器继续改变着工业激光制造业的发展前景。1μm 光纤激光器具有高电 - 光转换效率（WPE）、高光束质量和低维护需求等优点；但是最初它成本高昂，并且无法为工业激光应用提供足够高的输出功率，而且很难维护。现在，1μm 光纤激光器制造商已经克服了大部分障碍，正在提供更实用的光源和系统。但是还有一个问题：随着 1μm 光纤激光器在工业环境中取代 10μm $CO_2$ 激光器，但是操作和维护规范并没有随之改变。1μm 激光器不能像 10μm 激光器那样操作和维护。

现在的激光系统已经变得更加优质、可靠，这导致用户往往会忽视以下这点：激光系统仍然是由具有物理特性的物理零件组成的。激光系统中的机械和电气部件，在使用一段时期后，会逐步退化或失效。恶劣的工业环境中充斥着加工废料，这只会增加这些部件退化和失效的可能性和频率；其结果是激光系统的效率下降，而操作成本更高昂。尽管激光系统设计人员在加工废料的管理上已经实现了创新，但是如果没有对激光系统性

能的测量，激光用户就不能充分理解这些系统组件的退化将如何影响激光加工，也不能完全知道如何以及何时采取措施来最大化系统效率。

激光系统需要大量的资金投入，才能快速有效地生产零件。定期对系统进行维护极为必要，并且最大化投资回报需要将维护系统所需的时间最小化。

## 隐患 2

很多时候，单纯依靠别人来解决自己的激光问题，可能要付出昂贵代价。对于制造商来说，与应用工程师和系统集成商等行业专家保持良好的关系，尤为重要。这些专家不断改进方法，将加工要求转化为帮助制造商持续生产高质量零件的工具。但是激光加工也可能会出问题。当使用肉眼不可察觉的“隐形”工具工作时，总是很难确定问题的来源。而当激光测量产品不在故障排除范围内时，则需要花费更多的时间和资金来恢复系统。

在这种情况下，使用激光测量解决方案很快就能收回成本。这些解决方案不仅可以用来确定系统内激光器的基准性能，还可以用来找到激光器的问题所在，使系统更有效地恢复到基准性能。集成激光测量产品有助于确定激光状态的变化，即检测激光性能变化趋势，以帮助操作人员制定更有效的维护方案，并能在出现问题时帮助排除故障。

另一项挑战源于 $CO_2$ 激光器和 1μm 光纤激光器之间的差异。$CO_2$ 激光器的工作波长为较长的 10.6μm，其光学系统非常稳固，不容易受到周围加工废料的破坏，并且更容易维护。现代光纤激光器、碟片激光器和半导体激光器的工作波长约为 1μm，其光学元件更容易受到恶劣工业环境下产生的废料的破坏，更换元件时务必非常谨慎。一些激光操作人员习惯于按照更换 $CO_2$ 系统中光学元件的传统做法，来为 1μm 激光系统更换光学元件，除非特别小心，否则很容易损坏 1μm 激光系统的加工头。

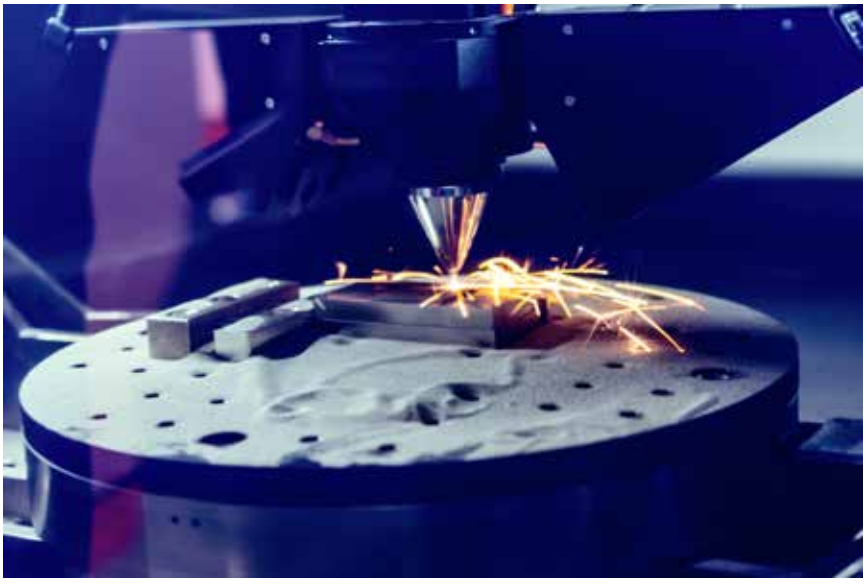


图 2：基于激光的增材制造系统，需要在加工中确保精确的输出功率和焦斑尺寸，以持续生产高质量的零件。

## 隐患 3

如果激光器没有按需要工作，仅仅调高功率并不能真正解决问题。如前所述，这种情况往往发生在 $CO_2$ 激光应用中。激光操作员明白“时间就是金钱”的道理，他们的工作绩效往往与生产的合格零件数量挂钩。当激光器的性能表现不良时，激光操作员通常会采取最快的措施使系统恢复正常。例如，在激光切割应用中，操作员通常会提高激光功率以保持零件正常生产；但实际可能发生的情况是：由于激光系统长时间工作导致光学元件的老化、损坏或污染，这会大大增加激光系统的热效应。热效应会导致聚焦光斑上移，从而使落在工件上的功率密度降低。因此，在激光切割过程中，调高功率可以暂时解决问题，但是不能解决功率损耗的根本问题。

光束分析仪允许用户调整他们的激光工艺，以达到一种精确的、足以完成任务的激光强度，同时又能保证强度不能太大导致工件过热而不能达到最佳加工效果。现在的激光测量方案，够帮助用户更好地了解激光性能，同时也能使系统的操作和维护比以往更加高效（见图 2）。

## 隐患 4

不要认为对激光系统进行测量，既昂贵又耗时。

很多人认为，激光测量系统的投资回报率很低。这主要源于人们头脑中的一种误解：即激光测量方案不但价格昂贵，而且设置和使用起来都很困难。还有一种心态是：虽然拥有激光测量设备是好事，但是它可能无法为应用提供有用的信息。

确实，以前购买激光测量系统的成本很高。但如今，随着相机技术、光学元件、网络、通信、计算能力和

软件的进步，激光测量产品已经变得更小、更快、更便宜，并且能提供非常有用的激光信息。

激光功率计和光束分析产品，已经发展成了具有成本效益的维护工具，可以直接集成到激光工作单元中。例如，在焊接传动零件、电池组件或座椅组件时，激光必须始终如一地按照设计好的加工流程进行焊接。现在，汽车制造商越来越普遍地将工业组合功率测量和光束分析设备集成到他们的工作单元中，定期监测激光性能，以实现趋势分析、过程跟踪和更智能的维护预测。使用这些工具的制造商，很快就会意识到投资回报很可观。

除了成本优化之外，还有一些改进使得这些产品的操作更加容易。激光测量系统在设计时，充分考虑了系统集成商、操作人员以及维护人员的需求。例如，它们采用工业标准通信协议，并设计了坚固的工业硬件连接。它们还整合了安全强化的设计，以防止加工废料、过热等造成的损坏。

激光功率计和光束分析产品，广泛应用于科学和研究领域，它们通常也是为科研环境设计的。这些产品也可以用于工业领域，因为它们可以提供相关的激光性能信息。正因为如此，这些产品在设计上就考虑到了适应更恶劣的生产环境。

## 隐患 5

没有激光测量系统，就无法管理激光加工过程。在某些情况下，一项激光应用的开发、部署和执行，都会简单地假定激光器的性能保持一致；直至加工出现问题，才会排除这一假定。

许多消费市场都在要求提供可靠、安全的产品，同时还有降低生产成本。但是由于很多激光应用（例如高反材料的快速聚焦 / 高激光功率焊接）的参数都很严格，实现一致的激光加工过程，并不总是那么容易。为了确保激光器的运转保持一致的性能，必须对激光器的关键性能进行测量、分析，并主动采取相应的措施（见图 3）。

当这些激光参数没有被测量而无法得知时，激光加工可能会偏离标准，最终导致零件报废。例如，在铜焊接应用中，如果焦斑偏离其设计位置，则可能因为焊接过程中光斑尺寸的增大而导致工件焊透的损失。如果能够对激光系统的焦斑位移进行跟踪，就可以避免这种偏离。



图 3：在没有激光性能数据的情况下，激光操作人员的工作十分具有挑战性。测量、跟踪和分析激光系统的长期性能趋势，有助于操作人员更好地操作和维护激光系统，并快速解决激光器出现的问题。

可持续性问题是一个主要的考虑因素。通过更明智地使用资源来减少对地球的影响，努力提升智能化制造。任何参与过这些可持续计划的人都知道，激光加工领域的每一点改进都很有帮助。对激光性能进行测量、预测和分析，并采取行动保持一致，这将提供很大帮助。合理维护的激光系统将能显著降低能耗，并能最大限度地提高产量，这不仅有助于降低运营成本，也有利于我们保护地球。

## 隐患 6

不是所有的传统激光测量技术都经过时间的检验，并能提供激光器的充分信息。

一些激光系统检修人员，仍在使用非常简单的工具进行维护和故障排除。例如 “Power Pucks” 激光辐射计、丙烯酸模块和磷涂层荧光板，都是快速易用的工具。但是这些传统工具无法完整描绘激光器在任意指定时间的性能表现。利用这些方法，激光射入一个大型热装置并持续数秒，产生一个与输出功率相对应的数值。激光束被成像到丙烯酸模块或荧光板上，并在没有任何测量的趋势数据或行业标准的情况下，进行主观分析。

当前的电子激光测量产品，能提供基于时间的测量，能够对激光性能进行短期或长期的趋势分析，它们根据 NIST（美国国家标准技术研究所）

可追溯标准进行校准，并使用符合 ISO 标准的光束测量方法。这使得对激光特性的分析更全面，测量精度更值得信任。

随着工业 4.0 的发展，来自加工工具的反馈信息，对改进工业加工非常有价值。激光加工系统也不例外。现在激光测量产品，可以通过几种不同的方法提供激光器的性能特征信息。在加工中对激光参数进行测量，可以提供激光器工作情况的实时反馈，但通常只分析系统的一部分，所提供的信息有限。

另一方面，在加工过程中，测量产品可以更完整地分析激光在加工点的性能；但这些产品必须在零件加工之间使用，因此本质上不是实时的。

应该鼓励激光用户不断改进他们的工艺。制造领域的从业人员一直在寻求改进激光加工的方法，包括节省加工时间、降低成本，这将直接影响公司的效益。除了工艺改进方面的挑战外，激光器有时也很难操作、维护和排除故障。正因为这样，通过独立或集成的产品，测量激光器的性能，是实现这些目标的一种最佳方法。❑

上接第32页

有降低光束质量、稳定性或可靠性的部件。AFX 光纤激光器的输出功率最高可达 1.2kW，而且该技术可扩展到更高的功率，也可以实现其他光束形状输出。

虽然本文给出的结果是在 AFX 单激光器配置下实现的，但其优点也适用于多激光器配置（如双激光器、四激光器、八激光器等）。多激光器配置可以显著提高 L-PBF 的生产效率。AFX 提高了 L-PBF 的性能，为 L-PBF 成为主要的金属增材制造技术铺平了道路。此外，AFX 具有控制局部微观结构和材料性能的独特能力，可以打印出其他方式无法实现的高质量工件。❑

参考文献


1. See https://youtu.be/TsumIEibbk8 (see results at time 49:45).
2. J. Grünewald, F. Gehringer, M. Schmöller, and K. Wudy, Metals, 11, 12, 1989 (2021); https://doi.org/10.3390/met11121989.
3. See https://youtu.be/bvqBRtGxwCY.
4. See https://youtu.be/OVemoWOtu5w.
5. See https://youtu.be/OjUj23tH4fg.
6. See https://youtu.be/wbMEf1i28Ko.





## 高相干1060nm波长扫描光源模块

安立公司的扫描光源 AQA0600A，输出 1060nm 的高相干性连续光，扫描频率 1.25kHz，具有紧凑的金属封装（40mm × 27mm × 31.6mm）和低吸水性，非常适合用于医疗和化学 OCT、生物成像设备以及薄膜测试仪。



该光源支持单窄带垂直模式相位连续扫描，具有高相干性，可在宽距离范围内进行精确测量。它是光学传感应用的理想选择，适用于活体和生物材料的 OCT 测量和生物成像。医疗领域的应用主要是医疗 OCT；化学领域的应用主要是生物成像和膜厚测量。

安立公司，www.anritsu.com

## 高功率半导体激光侧泵模块SP17和SP18

炬光科技的高功率半导体激光侧泵模块 SP17 和 SP18，采用炬光科技的高功率半导体激光器作为核心元器件，使用五相泵浦结构，利用独特的光学设计和水路设计，以及有效手段控制 ASE 效应，实现了高泵浦峰值功率、更高的小信号增益（SSG）和高荧光分布均匀性（>90%）。



SP18 峰值功率为 5kW，SSG>30；SP17 峰值功率为 30kW，SSG>55。荧光分布均匀性是半导体激光侧泵模块非常重要的指标要求之一。SP17 和 SP18 采用炬光科技独特的光场匀化技术，可实现 90% 以上的荧光分布均匀性，从而抑制侧泵模块的热效应，可为 DPSSL 提供更高的光束质量。

可用于高功率固体激光泵浦，也适用于材料精密加工、表面处理、泛半导体制程等先进制造领域。

炬光科技，www.focuslight.com

## 514nm半导体激光器

艾迈斯欧司朗发布首款可产生特定的 514nm 波长的商用半导体激光发射器 Metal Can PLT5 522FA_P-M12，应用于生命科学研究与诊断。

这款 514nm（±1nm）标准激光器能够替代传统峰值波长为 514.5nm 的氩离子激光器在科学和测量设备中的应用，它比氩离子激光器更经济、体积更小、工作寿命更长，且不需要繁琐的水冷机制。一个单模激光器的重量仅为几克，而传统氩离子激光器的冷却和电源通常重达数公斤。



这款 514nm 激光器将使客户能够使用 VBG（体布拉格光栅）或外部腔设计产生窄带宽，进一步降低带宽至 < 0.1nm，可用于拉曼光谱和全息影像等应用。

输出光功率 50mw，可与 514nm 范围内的荧光剂兼容，也可与各类第三方透镜兼容，广泛适用于生命科学领域，包括流式细胞术、共聚焦显微镜和光谱学、材料识别和分析、诊断、DNA 测序和法医分析等。

艾迈斯欧司朗，www. ams-osram.com

## nanoLevante3半导体泵浦纳秒OPO

nanoLevante3 是一款紧凑坚固的近红外和中红外纳秒 OPO，波长范围 1.65~3μm（1.4~4μm 可定制），脉冲能量达百 μJ，重频 kHz 量级。其采用主动调 Q 技术，可以在不同频率下保持其他参数不变，可通过内部或外部控制实现单脉冲到 1kHz 的重频。nanoLevante3 的波长、重频、脉冲能量等参数设置均可通过软件完成，并具有内部功率监测功能。



主要特点包括：2.8~3.1μm 高峰值功率纳秒脉冲输出；高光束质量；紧凑的风冷结构；全电脑控制；脉冲控制，外触发和远程控制接口；功率监测和集成衰减器。

应用领域包括中红外激光辅助生物打印、波长选择性微材料加工以及 IR MALDI 质谱分析等。

顶尖科仪，www.psci.cn

## 500W~12kW闪电系列光纤激光器

凯普林闪电系列光纤激光器，功率覆盖 500W~12kW，采用高度集成化和模块化设计，对泵浦源、光路系统、热



控管理和电控系统进行了全面升级，体积和重量都大幅缩减，其中闪电 1000W 光纤激光器，尺寸堪比笔记本电脑。

闪电系列采用密集空间排列理论的第四代高功率高亮度泵浦技术，整机光电转化效率高达 40% 以上。多重抗高反设计，能有效消除 99% 以上回返光，冗余功率更高，且抗衰能力提升 120% 以上，确保了光纤激光器性能稳定、品质可靠，满足各种金属加工的长期使用。

监控更完善，智能化控制系统，可接入物联技术，实现设备状态的实时监控与故障预警。基于移动设备和智能传感技术的蓝牙功能，可在线监控激光器的运行状态、工作参数及报警信息，快速准确地把握设备的运行状态。

凯普林光电，www.bwt-bj.com

## TruLaser Weld 5000系列智能激光焊接系统

TruLaser Weld 5000 系列智能激光焊接系统，进一步拓展了通快的 BrightLine Scan 亮面扫描焊接技术。

新版本中的 TruLaser Weld 5000 焊接头，将自动变焦模组与扫描振镜模块结合，为激光焊接带来了更多工艺可能性，比如，精确控制焊缝横截面尺寸，改善深熔焊接头强度；将热导焊板材厚度提升至最大 6mm；通过熔池搅拌作用改善铝合金焊接，为降低气孔裂纹提供更多工艺选择。



最大扫描频率 2700Hz；最大振幅 4.5mm；可实现多种扫描形态，如一字形态、八字形等；可通过通快 TruControl 功能，实现更自由的专家编程操作。

通快，www.trumpf.cn

## 1310nm扫频激光器HSL-20

Santec 的扫频激光器 HSL-20，是一款基于 MEMS 技术的集成扫描激光器。具有高速扫描、长相干长度和宽扫描范围等特性，体积更加小巧。可实现 100kHz 稳定的高速扫描，内置 K-trigger 和启动触发器，用于系统同步。



主要性能包括：中心波长 1310nm；宽带扫描范围≥ 105nm；相干长度≧ 16mm/ ≧ 20mm；扫频速率 50kHz/100kHz；k-trigger 信号输出。

主要应用包括心血管成像、缺陷检查（树脂、模压塑料等）、外形检测（半导体等）、生物及医学显微镜、光谱学及光学传感等。

Santec，www.santec.com.cn

## 30kW激光切割头

Coherent 高意的 BIMO-FSC3 系列激光切割头，能够承受金属切割应用使用的高功率。



其中，BIMO-FSC3-Z-HP 可处理高达 30kW 的激光功率，并具有高度感应功能和大焦深，能够实现高切割速度，同时保持在切割超大金属板时的高质量和一致性。BIMO-FSC3-L 可处理高达 20kW 的激光功率，具有大数值孔径，非常适合环形激光束及其相关应用。BIMO-FSC3-Z 可处理 12kW 的激光功率，并通过 IP-65 认证，可承受最恶劣的应用环境。

Coherent高意，www.photonics.com

## 适用于小批量加工的小型桌面激光焊接系统

Evosys Laser 公司的 EvoWeld Mini 桌面型激光焊接系统，外观尺寸 663mm × 320mm × 533mm，专为小批量加工而设计，如原型制造或小批量装配。它主要面向塑料零件的焊接。



配备扫描振镜，大大增加了加工的灵活性和可操作性。使用直观的 EvoLaP 工艺软件，对焊缝轮廓进行编程和调整，因此很容易将在 EvoWeld Mini 上开发的焊接工艺，转移到 Evosys 的自动化程度更高的焊接产品上。

Evosys Laser，www.evosys-group.com

## 万瓦以上插箱式单模块光纤激光器

热刺激光推出插箱结构的单模块光纤激光器系列产品 FC6000 和 FC12000，其中 FC12000 实现了插箱式结构单模块光纤激光器的功率达到万瓦以上。



新产品结构紧凑，FC6000 的体积约 0.057m$^3$（含脚垫把手等），FC12000 的体积不超过 0.096m$^3$（含脚垫把手等），实现了更高的集成度、更少的占地面积、更低的物流成本等，大大丰富了该类设备的工作场景。

新产品优化了散热方案，通过优化内部水路，针对性地向发热元件、模块等供水，散热效率和效果大幅提高；光纤光路方面的制冷工艺升级，也在原有基础上大幅降低了同功率输出时的光纤及器件温度。

热刺激光，www.recilaser.com

## 300W红外飞秒激光器

奥创光子的300W红外飞秒激光器，基于CPA技术，采用“全光纤结构锁模的飞秒种子源＋LD端泵固体放大技术＋板条放大技术”，放大结构稳定可靠，克服了放大过程中产生的非线性效应。



该款激光器解决了高平均功率放大下的晶体热效应问题，实现了高平均功率、高单脉冲能量的输出，最大单脉冲能量可达3mJ，脉冲宽度600fs，重频在50kHz~1MHz范围内可调。高功率使其兼具高品质高效率，将加工工艺带到一个新高度，帮助攻克众多加工瓶颈。该产品已经开始小批量出货。

奥创光子，www.ultronphotonics.com

## 激光送丝熔覆加工头CoaxPrinter

Precitec的创新的激光送丝熔覆加工头CoaxPrinter，首次实现了多方向送丝的增材制造加工工艺。市场上同类基于丝材的激光熔覆解决方案，几乎不可能改变90°的方向。CoaxPrinter不仅解决了这个技术瓶颈，而且还在加工过程中为用户提供了前所未有的灵活性。



CoaxPrinter还可以实现光路无遮挡同轴送丝。其光束轮廓是环形的，工作时可直接聚焦到丝材和工件表面之间的交汇区域处。因此，CoaxPrinter送丝时不会遮挡到激光，并且能量强度全向分布均匀预热，完全控制过程的能量输入。其送丝本身由传感器监控，非常适合自动化制造。

Precitec，www.precitec.com

## 手持激光焊接机红桐A1SE40

创鑫激光子公司桓日激光自主研发的新一代手持激光焊接机红桐A1SE40，去除水箱，采用智能相变导热技术方案，整机重量小于38kg，单人可搬。采用20μm光纤芯径，光束质量更好、能量密度更高、金属穿透力更强、焊接速度更快（焊接相同工件，速度是传统焊接方式的4-10倍），焊接性能稳定，对铝合金/黄铜/紫铜等高反材料焊接效果好。



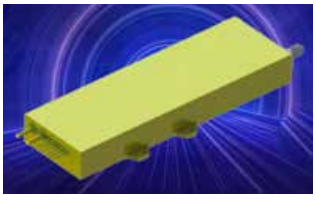

自研高集成手持焊枪，采用准直QCS接口，重量仅680g，光学设计与QCS输出头完美匹配，传输效率高，发热量小。焊枪内置激光摆动功能，可实现宽焊缝焊接。

红桐A1SE40采用7寸工业级LED触控屏幕，智能操作系统，简单易用，新手仅需30分钟培训即可掌握焊接操作。焊缝质量好，可免除后期的打磨抛光。

创鑫激光，www.maxphotonics.com

## 878.6nm泵浦源激光器

北京大族天成半导体技术有限公司的878.6nm 180W高功率泵浦源激光器，功率余量大，产品可靠性高；转换效率高，寿命长；波长锁定电流范围宽，2A开始波长锁定；波长锁定温度范围宽，20～40℃均可实现波长锁定；产品规格多样化，芯径200μm/400μm可选，并可提供定制服务。



该泵浦源模块适用于更大功率的皮秒固体激光器；产品经过公司内部数千小时的严格验证，各项性能稳定可靠。

天成半导体，www.tc-semi.com

## 新型声光可调谐滤波系统

安扬激光的声光可调谐滤波系统AOTF-Pro，是最新一代的分光模块，它可实现超连续谱光源和单波长的切换输出。单波长输出范围430~1450nm，在一个光斑内实现最大范围的单波长可选范围。可选用单模光纤直接输出，与共聚焦显微镜、光谱仪等拥有单模光纤输出装置的分析系统，实现无缝对接。



主要应用包括超高分辨显微技术、荧光光谱与成像、纳米光子学、代替多个单色激光器以及材料检测与分析等。

安扬激光，www.yslphotonics.com

| Advertiser | 广告客户 | 网址 | 页码 |
|---|---|---|---|
| ACS Motion Control (China) | | https://acsmotioncontrol.com/zh/acs/ | 1 |
| Ante Laser | 安特激光 | www.antelaser.com | 17 |
| BWT | 凯普林 | www.bwt-bj.com | 7, 29 |
| Edmund Optics China | 爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司 | www.edmundoptics.cn/112-8619 | 13 |
| Mean Well | 明纬 | www.meanwell.com.cn | 27 |
| Medtec China 2022 | 第十七届国际医疗器械设计与制造技术展览会 | www.medtecchina.com | IBC |
| MWCS 2022 | 中国国际工业博览会-数控机床与金属加工展 | www.metalworkingchina.com | IFC |
| Ophir Photonics | | www.ohiropt.com/photonics | 23 |
| 2022厦门国际光电博览会 | | www.xmipe.com | 36 |

**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)**
Annie Liu (刘映妮)
anniel@actintl.com.hk

Jenny Li (李文娟)
jennyl@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8572

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

**Wuhan (武汉)**
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

MedTechWorld China

# Medtec China

Technology · Networking · Education

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

2022

12.7-9

苏州国际博览中心

B1-E1馆

Hall B1-E1

Suzhou International Expo Centre



**40,000+** 人次专业观众

**800+** 展商

**1,900+** 会议代表

**80+** 会议活动


**参展 Exhibit**

Linc Cai 蔡锋

T：+86 21 6157 7217　E: Linc.Cai@informa.com

**参观 Visit**

Sophia Xu 徐镭月

T：+86 10 6562 3307　E: Sophia.xu@informa.com


扫码预登记参观赢好礼

www.medtecchina.com

informa markets




**国际知名媒体授权**
**引领全球高新科技信息**

**8本专业杂志(双月刊)**
**欢迎免费索阅**

**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**

雅时国际传媒集团成立于1998年，在高增长的中国市场上为众多高科技领域提供服务。通过其产品系列，包括印刷和数字媒体以及会议和活动，雅时国际为国际营销公司和本地企业提供了进入中国市场的机会。雅时国际的媒体品牌为电子制造、机器视觉系统、激光/光子学、射频/微波系统设计、洁净室/污染控制和半导体制造，化合物半导体，工业AI等领域的20多万名专业读者和受众提供服务，雅时国际也是一些世界领先的技术出版社和活动组织者的销售代表。雅时国际的总部设在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有分公司。