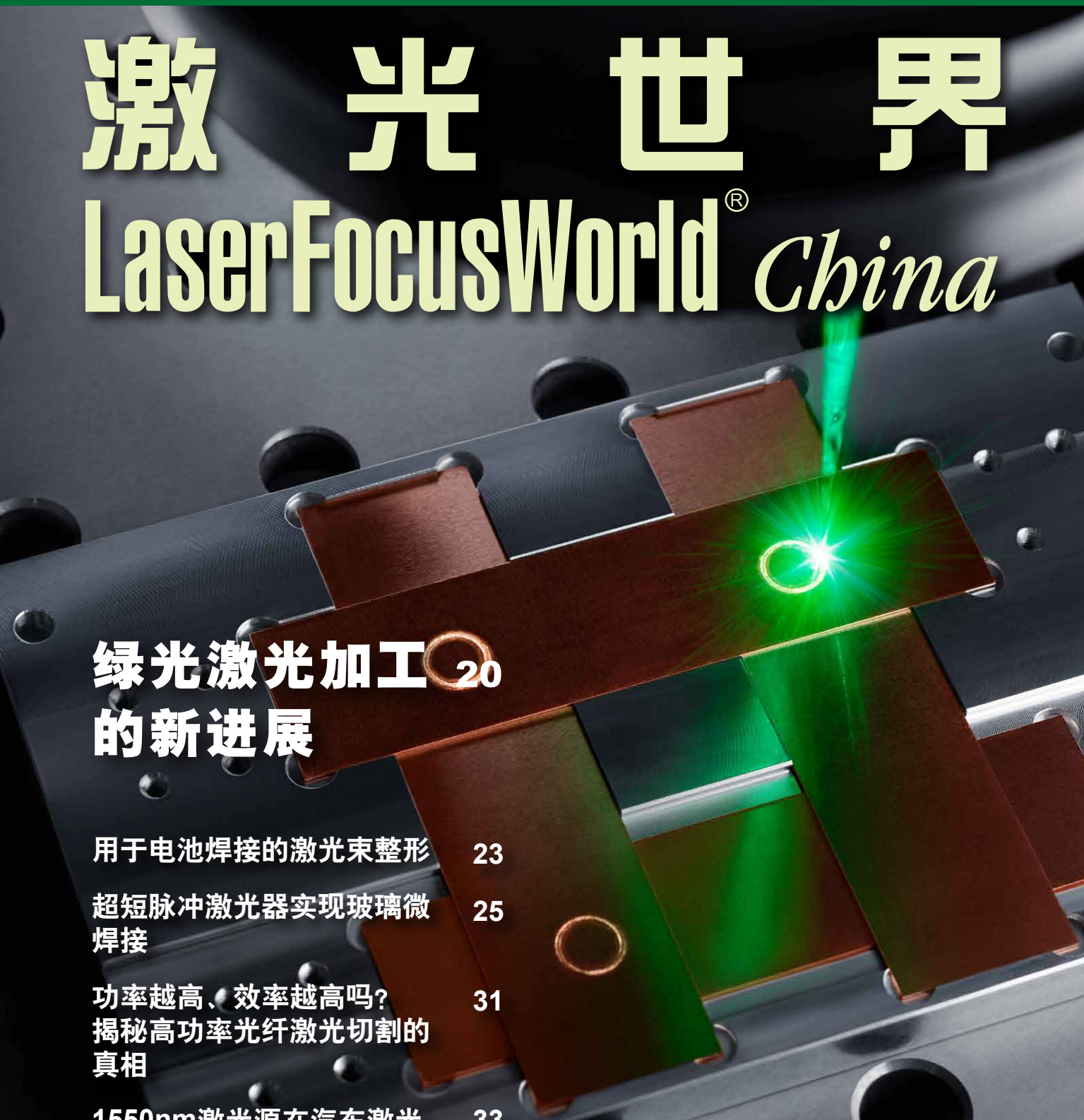
光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2021年11/12月 第6期
ISSN: 1817-6917

激光世界

LaserFocusWorld® China



绿光激光加工的新进展 20

用于电池焊接的激光束整形 23

超短脉冲激光器实现玻璃微焊接 25

功率越高、效率越高吗？揭秘高功率光纤激光切割的真相 31

1550nm激光源在汽车激光雷达中表现出色 33

ACT

ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

微信公众号

深圳机械展 SIMM

ufi Approved Event 国际展览业认证展会

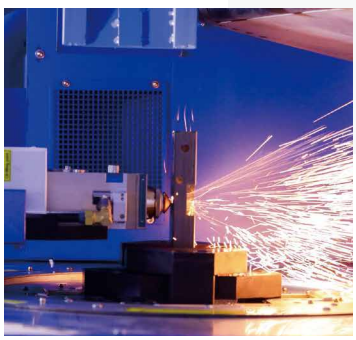
BPA WORLDWIDE EVENTS

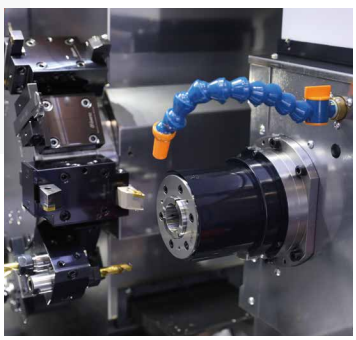
ITES 深圳工业展

2022.3.30-4.2
深圳国际会展中心（宝安新馆）

展会官网：www.iteschina.com







展览范围

金切机床及核心功能附件 | 激光加工及钣金设备

工业测量设备及技术 | 刀具、工具及夹治具 | 精密加工零件

模具模配、工业材料及紧固件 | 3D打印及三维扫描 | 机器人及自动化设备

运控技术与机械传动设备 | 电子智能制造

ITES深圳国际工业制造技术及设备展览会

暨SIMM深圳机械展

联系方式

电话：0577-83458909
邮箱：info@simmtime.com

主办方

深圳市协广会议展览有限公司
深圳市环悦会议展览有限公司

OPTICA | Formerly OSA
Advancing Optics and Photonics Worldwide

一道新的光
新的一天
一个新的品牌

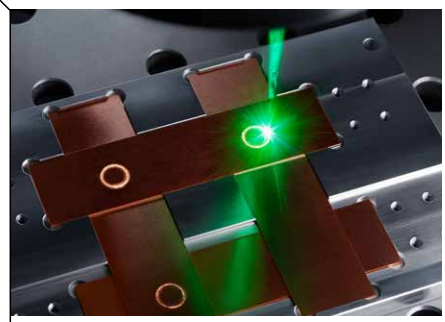
我们非常高兴地宣布，我们协会将启用新名字Optica（前OSA，美国光学学会）。受到我们在全球范围内推动光学和光子学工作的启发，我们的新名字及其外观很好地反映了我们的社区宗旨。

Optica是一个为现在和未来服务的协会。现在，我们比以往任何时候都更多地将一个多元化的社区团结在一起，面向未来，进一步增强探索和创新能力。

要了解更多我们的新品牌，请访问optica.org/brand。



Credit: Albetro Tufaile, Soft Matter Lab, EACH-USP



20 封面故事

绿激光加工

绿光激光加工的新进展

绿光激光器已经找到了独特的材料加工应用，最新的应用是使用铜粉进行3D打印。

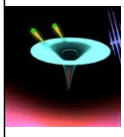
市场观察

10 光子学股票市场：自由市场 Vs. 监管障碍

光子学领域的很多市场机会，需要经历漫长的设计和测试周期，其中包括行业标准和监管方面的各种障碍。

技术中心

12 极紫外激光



更紧凑的XUV激光器有望使无数研究受益

一项新技术有助于产生更强烈的极紫外（XUV）脉冲，它可以克服现有的激光稳定性限制，并加强成像和光谱等领域的研究。

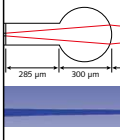
13 VCSEL



VCSEL阵列作为一个激光器促进医疗和通信应用

将VCSEL阵列相干地组合成一个激光器，有望实现紧凑的高功率、高亮度激光源，进而在医疗设备、通信等方面开辟出新应用。

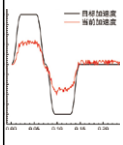
14 光学传感



新型传感器可快速检测传染病原体

一种灵敏的感染源测试方法，已经提高了测试的速度、灵敏度和可靠性，正在向临床应用迈进。

16 运动控制



如何为电动系统确定最优的比例加速度？

在运动控制系统中，为电动位移台找到最优的比例加速度，是其实现最优性能的一个关键环节。

工业应用专栏

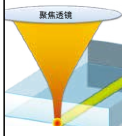
23 光束整形



用于电池焊接的激光束整形

本文对用于铜和铝电池应用的单模和环形光束焊接示例进行了比较。

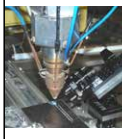
25 玻璃焊接



使用超短脉冲激光器实现玻璃微焊接

高功率、高脉冲重复频率的皮秒激光，非常适合玻璃的微焊接。

28 增材制造



光子技术是增材制造的基础

从微精密医疗器件到大型承重件的制造，增材制造技术正应用于各行各业。

31 激光切割

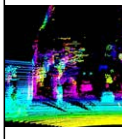


功率越高，效率就越高吗？揭秘高功率光纤激光切割的真相

提高激光切割机的功率并不一定能提高生产效率，是否应该购买高功率激光源，应该根据具体情况单独分析。

产品特写

33 雷达用激光器



1550nm激光二极管在汽车激光雷达中表现出色

激光雷达系统的进步，使自动驾驶汽车离我们越来越近。激光雷达系统有潜力在任何光线和道路条件下，识别车辆、行人和其他物体。

4 编者的话
6 前沿简讯
37 产品撷英
40 广告索引

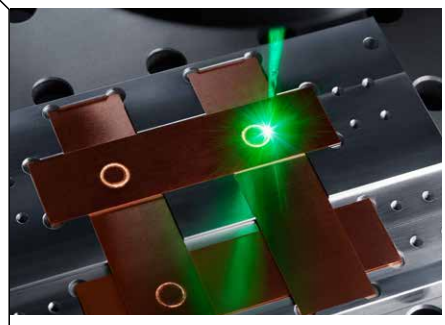
关于《激光世界》

《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



20 COVER STORY

Green Laser Processing

Advances in green laser processing

Green-wavelength lasers have found distinctive materials processing applications, with the latest being 3d printing using copper powder.

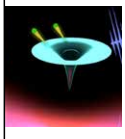
MARKET WATCH

10 **Photonics stocks: Free markets vs. regulatory speedbumps**

Many market opportunities for photonics have incredibly long design in and testing cycles, which include obstacles such as industry standards and regulatory hurdles.

TECHNOLOGIES CENTER

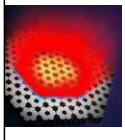
12 Extreme-Ultraviolet Lasers



More compact XUV lasers may benefit a myriad of research

A new technique is aiding in the generation of more intense extreme-ultraviolet (XUV) pulses, which could overcome existing laser stability limitations, and also enhance research in areas such as imaging and spectroscopy.

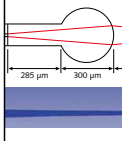
13 VCSEL



VCSELs array acting as single laser boosts medical and communications applications

Coherently combining an array of VCSELs into a single laser could lead to very compact high-power, high-brightness laser sources, opening up new applications such as in medical devices and communications areas.

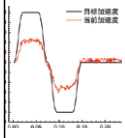
14 Optical Sensing



New sensor rapidly detects infectious agents

A sensitive flexible infectious agents test platform have improved the speed, sensitivity, and robustness, and moving toward clinical application.

16 Motion Control



How to determine the optimal proportional acceleration value for a power-driven system?

In motion control systems, finding the optimal proportional acceleration for a power-driven displacement table is a key aspect for achieving optimal performance.

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN

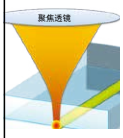
23 Beam Shaping



Laser beam shaping for battery welding

Single-mode and ring beam welding examples for copper and aluminum battery applications are compared in this article.

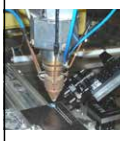
25 Glass Welding



Glass microwelding with ultrashort-pulse lasers

High-power, high pulse-repetition-frequency picosecond technology is well suited for glass microwelding.

28 Additive Manufacturing



Photonic technology is the bedrock of additive manufacturing

Additive manufacturing techniques are now used in applications running the gamut from micro-precision medical components to large-scale load-bearing structures.

31 Laser Cutting

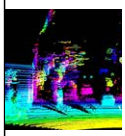


The higher power, the higher efficiency? Realities of high-power fiber laser cutting

High-power lasers will not necessarily increase production efficiency, and the legitimacy of buying lasers with very high powers should always be individually analyzed.

FEATURED PRODUCT

33 Lasers for lidar



1550 nm triple-junction laser diode excels for automotive lidar

Autonomous vehicles are moving closer to reality, thanks to advancements of key systems such as lidar—which has the potential to recognize vehicles, pedestrians, and other objects in any light and roadway conditions.

4 EDITOR'S NOTES
6 LEADING EDGE SNAPSHOTS
37 PRODUCTS HIGHLIGHTS
40 AD INDEX

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 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
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

光子学技术推动整个科技生态系统的发展

半导体市场是当下备受关注的市场之一，半导体行业的发展可以说代表着全球科技发展的最尖端，随着芯片上晶体管的集成度越来越高，半导体制造工艺也在向着越来越窄的线宽快速发展，从 28nm 发展到了 14nm、再到 10nm、7nm 甚至 2nm！

相比于半导体行业的快速发展，光子学行业通常被人们认为是一个发展得并不快、并且有点深奥的小行业。当然，从市场规模上来看，光子学行业的确跟半导体行业不在一个量级上。但是，这里却有一个大胆但准确的说法：如果没有光子学领域的创新和进步，整个半导体领域就没有、也不会有进步！其实，从半导体制造的核心设备光刻机的技术含金量方面，我们也能推测光子学技术所发挥的重要作用。

事实上，光子学技术在众多领域都拥有很多市场机会，包括通信、半导体、物联网（IoT）、医疗创新、移动性以及人工智能（AI）等众多领域的发展，背后都离不开光子学技术的支持。光子学行业之所以发展相对缓慢，是因为要经历漫长的设计和测试周期，其中也包括通过行业标准和监管要求所要经历的流程时间（p10）。

事实上，光子学领域始终没有停下发展创新的脚步，激光技术在工业应用中的很多技术创新，已经帮助产业界实现了更精密、更高效、甚至是过去无法实现的加工任务。

在本期的封面故事中（p20），介绍了绿光激光加工的新进展，包括在铜等高反射材料焊接方面的应用情况，以及用铜粉进行 3D 打印方面，绿光激光不但吸收率高，并且无飞溅，是实现工艺稳定性和制造灵活性的完美选择。

本期的工业应用栏目，为读者精选了针对电池焊接应用的光束整形、玻璃焊接、激光切割、增材制造等方面的内容。

在电池生产中，涉及大量的铜、铝焊接环节，这两种金属既具有高反射性，又具有高导热性、低液体粘度和熔池吸收气体的特征，焊接过程容易产生飞溅和气孔。单个激光源中的光束整形和单模光束质量的创新组合，能控制小孔稳定性和焊接质量，同时保持焊接电池材料所需的高强度（p23）。超短脉冲激光在工业应用中发挥着越来越重要的作用，比如能够实现玻璃 - 玻璃、玻璃 - 铝片的焊接工艺（p25）。另外，在激光切割方面，人们可能习惯性地认为功率越高，就越能提高切割效率；事实上情况并非如此，而是要根据具体情况单独分析(p32)。

本期中还包括通过 VCSEL 阵列组合实现紧凑的高功率高亮度激光源(p13)，以及新颖的更适合汽车雷达应用的 1550nm 激光二极管等内容，供读者参考。❑

本刊编辑部



PRECITEC

2D和3D激光切割
最高功率30kW

激光焊接
最高功率20kW

普雷茨特 激光焊接精益之道

2021.12.1-12.5　展台号：NH-D001

www.precitec.cn

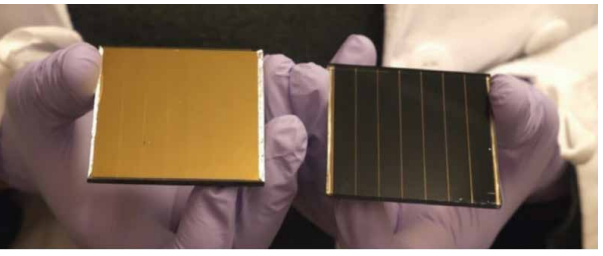
中國國際工業博覽會
CHINA INTERNATIONAL INDUSTRY FAIR
23 2021 THE 23 RD SESSION 第23届
ufi Approved International Event

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

氯为下一代太阳能电池提供更高的稳定性

对下一代太阳能电池光吸收层表面的原子进行成像，有助于研究人员解开太阳能技术研究领域中，关于氯的作用和存在的长期谜团。

在日本冲绳科学技术大学研究生院（OIST）能源材料与表面科学部教授 Yabing Qi 的领导下，一个研究小组已经证明了氯在融入金属卤化物钙钛矿（一种在下一代太阳能电池中收集光的晶体材料）中时，具有提高功率、增强稳定性的功能。金属卤化物钙钛矿电池有望超越或补充现有的硅太阳能电池。领导这项研究的 Afshan Jamshaid 博士说：“钙钛矿有可能比硅更便宜、更高效、更通用。但是这种材料的缺点是：钙钛矿太阳能电池在效率、规模化和稳定性方面存在问题，导致其无法实现商业化。高温、潮湿和紫外线会使钙钛矿材料降解，从而降低其将光能转化为电能的能力。”

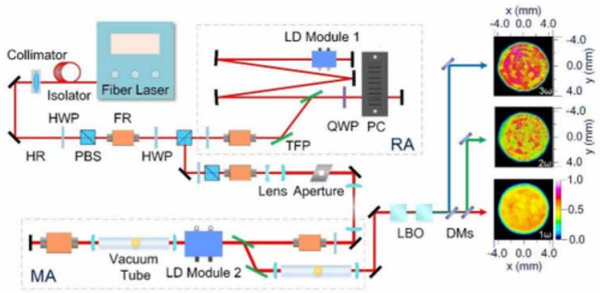


研究人员长期以来一直致力于克服此类问题，包括通过使用掺杂剂来改进钙钛矿太阳能电池，即在制造钙钛矿晶体层的过程中添加少量另一种化学物质。根据 OIST 的研究，掺杂剂（氯）改变了钙钛矿材料的物理和化学特性，提高了太阳能电池的稳定性和效率。具体来说，氯已被证明可以延长钙钛矿太阳能电池的寿命并提高其功率转换效率。

在他们的研究中，研究人员创建了掺有氯的金属卤化物钙钛矿 - 甲基碘化铅铵薄膜。采用扫描隧道显微镜对钙钛矿层的表面进行成像。研究小组发现，在钙钛矿材料表面层中氯的最佳浓度略低于 15% 时，该浓度使钙钛矿材料具有更高的稳定性。❑

上海光机所固态激光器实现突破性的三倍频转换效率

近日，中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室研究团队，获得了脉冲能量 91mJ、脉宽 470ps 的 355nm 激光脉冲，三倍频转换效率高达 76%，这是目前已知的重频皮秒固态激光器中实现的最高三倍频转换效率。



图：时域可编程紫外激光器光路原理图以及输出光束近场光斑。

高功率紫外激光在激光预处理、微纳加工、量子光学和非线性光学测量等领域有着广泛的应用需求。重频亚纳秒和皮秒紫外激光器由于缺乏精确的时空调制，三倍频转换效率通常低于 50%。提高激光脉冲的时空填充系数，使激光脉冲在时间和空间上各点的功率密度保持一致，可提高三倍频转换效率。

该研究中，紫外激光器由前端可编程种子源、光隔离系统、再生放大器（RA）、光束整形器、主放大系统（MA）、谐波转换单元等部分组成。研究人员通过精确调控 Nd:YAG 激光器放大后基频激光脉冲的时间波形和空间分布，以提高其时空填充系数。120mJ、100Hz 的 1064nm 激光脉冲，通过两块 LBO 晶体进行三倍频后，获得了脉冲能量为 91mJ、脉宽 470ps 的 355nm 激光脉冲，三倍频转换效率高达 76%，脉冲能量稳定性在 3 小时优于 1.07%（RMS），实现了重频皮秒固态激光器中最高的三倍频转换效率。❑

单端泵浦激光器获得高达 53.8% 的光 – 光转换效率

中科院合肥研究院健康所医用激光技术实验室江海河课题组与安光所晶体材料实验室张庆礼课题组合作，提出了平滑泵浦光场和温度场均匀化的设计方案，大大提高了激光转换效率，为后续高质量激光器批量制造和定标放大奠定了重要基础。

全固态端泵技术是获得紧凑、高效、高质量激光器的重要方法之一。然而，在高重复频率泵浦下，增益介质中的严重激光热效应已成为阻碍输出功率增强和降低光束质量的主要因素，这也是激光界长期难以攻克的瓶颈。特别是在 LD 单端泵浦的激光器中问题尤为突出，其关键原因在于泵浦高浓度均匀掺杂晶体时，泵浦光被初始端高浓度掺杂离子的强烈吸收，其强度迅速降低，造成了晶体棒轴向泵浦和温度分布极为不均匀，难以产生性能优越的激光。而在低浓度均匀掺杂晶体时，由于吸收系数小，难以获得高激光转换效率。

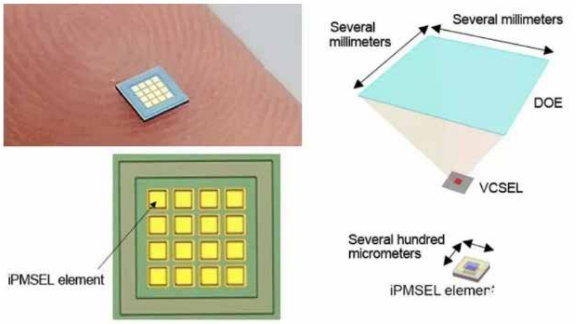
鉴于此，研究团队通过改进提拉法，生长了高质量的梯度浓度掺杂晶体，设计了 LD 单端泵浦激光器，进行了两种梯度掺杂和三种均匀掺杂晶体的激光实验研究。结果发现，梯度掺杂晶体使得泵浦光在传播过程中获得了较均匀的吸收，大大降低了泵浦晶体端面的温度和晶体棒轴向的温度梯度，显著减少了热效应，在 35W 泵浦时的热焦距较等效均匀掺杂晶体的数值增大了 60%，改善了激光的有效模体积、束斑尺寸和激光模式，明显提高了激光脉冲输出特性。在 2kHz 重复频率运行时的最大激光输出功率达到了 24.2W，激光器光 - 光转换效率高达 53.8%。

这项研究证明了梯度浓度掺杂晶体在泵浦和温度分布方面呈现出优异的性能，提高了晶体棒中末端对泵浦光的吸收，并降低了入射端的温度，平滑了沿棒轴上的温度梯度，明显减小了热效应，显著提高了单端泵浦脉冲激光器的输出性能，为未来高效率激光技术提供了一条新途径。❑



滨松光子开发出用于表面发射激光器的新型集成技术

近日，滨松光子（Hamamatsu Photonics）开发出一种高密度集成技术，用以创建 iPMSEL（可集成相位调制表面发射激光器）阵列元件。该公司表示，作为全球最小级别的半导体激光器，它能够发射 2D 模式的激光束。



左图：iPMSEL阵列由16个发光单元组成；右图：由VCSEL、DOE和iPMSEL阵列组成的光束模式光源概念图。

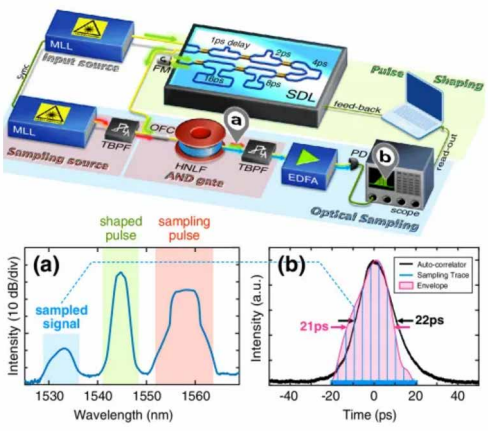
上述芯片上的每个 iPMSEL 阵列单元都可以独立控制，以切换其所输出的激光束图案，从而使该 iPMSEL 阵列适用于需要高精度的三维测量仪器（系统）。该阵列由 16 个 iPMSEL 阵列单元组成，每个单元是边长约为 200μm 的正方形，并在 2mm^2 的芯片上完成高密度和高精度一体成形。该阵列在发射激光束的同时，通过对每个发光单元的电气控制来实现各种高精度激光束图案之间的切换输出。

iPMSEL 阵列能够切换输出 10000 多个点、条纹、网格、字符、CG 等图案。滨松表示，他们已开发出利用其自主的全息设计和精微加工技术，以及基于光子晶体表面发射激光器的 iPMSEL 发光单元。光子晶体垂直腔面发射激光器是以京都大学野田研究室所开发的二维光子晶体（按光波长尺寸排列的微型结构）作为谐振器的垂直腔面发射激光器。

滨松表示，其目前开发的 iPMSEL 阵列能够执行高精度 3D 测量，例如相移法。同时，iPMSEL 阵列还可用于提高 3D 动作捕捉和 3D 脸部识别的准确性。通过高密度集成技术实现的小型轻量化优势，使其适用于医疗和工业领域的紧凑型便携式光纤内窥镜等应用。❑

片上集成光信号发生器，可输出高性能可重构皮秒脉冲

无论是互联网、医疗诊断、还是卫星通信，均离不开光学技术的支持。这些技术的共同点便是使用光脉冲进行信息的传输、检索和计算。因此，提高对光脉冲的控制是这些技术进一步发展的必要因素。这其中的关键器件便是光信号发生器（OWG），而 OWG 理想情况下应该具有以下三个特性：(1) 自主输出目标波形（用户友好性）；(2) 最小化驱动系统和读出（或监测）波形的实验要求；(3) 具有长期可靠性、低损耗、光纤连接性和最大功能性。



图：光脉冲整形装置示意图。

然而，至今为止，绝大部分集成式 OWG 仅能实现其中一个或两个关键特性，且其时间分辨率都很难达到皮秒量级。为此，法国国家科学研究所（INRS）的研究人员，基于时间相干合成概念，设计并开发了一种片上集成的智能光信号发生器，该设备可以使用预设的脉冲采样方案，输出时间分辨率高达数十皮秒的任意光脉冲形状，且具有即时可重构性。

在这项工作中，研究人员将新颖的可重构皮秒脉冲整形技术、超快全光采样方法和粒子群优化（PSO）算法相结合，以实现光波形的动态可重构性输出。具体来说，首先在低损耗氮氧化硅芯片平台上，通过使用热可调的非平衡马赫 - 曾德尔干涉仪（UMZI）实现时间上的相干合成，以完成用户定义的脉冲整形；其次，基于种子四波混频（FWM）的全光采样实现自我优化，并提供一个缓慢变化的输出信号用于波形重建；最后，将该装置与 PSO 算法结合，以实现系统性能和收敛速度的提高。

未来，该团队将对更复杂的芯片进行设计和开发，以实现器件性能的提高以及检测方案的集成，直至实现完整的全片上集成智能光信号发生器。❑

少周期飞秒激光脉冲研究获得新进展

少周期飞秒驱动源是产生极紫外波段孤立阿秒脉冲的重要条件，采用常规方案需要经过光谱展宽与脉冲压缩两个过程，效率低且压缩元件对大能量脉冲的承受能力十分有限。

近年来，人们利用光谱展宽过程中的非线性效应实现色散补偿，即自压缩效应，为解决该问题提供了新思路，不仅简化了脉冲压缩过程，也有利于大能量超短脉冲的产生。然而，自压缩效应存在复杂的非线性过程，既要展宽脉冲光谱，还要满足脉冲传输过程中的正负色散匹配，因此对自压缩效应的控制较为困难。尤其是常用的 800nm 波段的钛宝石激光，由于缺乏具有合适负色散的光学材料，通常较难实现自压缩。

中科院物理所 / 北京凝聚态物理国家研究中心光物理重点实验室研究员魏志义研究组，长期致力于少周期激光脉冲产生的研究。最近该组博士研究生高亦谈在副研究员赵昆、研究员魏志义等的指导下，基于组内发展的薄片组光谱展宽技术，利用飞秒钛宝石放大激光电离产生的锥状辐射效应，通过在空间上精确寻找到色散匹配最佳位置，并配合空间滤波，获得了少周期飞秒自压缩脉冲。

实验中，科研人员所用钛宝石激光器的中心波长约为 800nm，脉宽小于 40fs。在该激光脉冲注入下，其产生了光谱覆盖 650~900nm、脉宽短至 8.8fs 的少周期脉冲，数值模拟的最短脉宽达 5.0fs。该工作展示出在 800nm 中心波长附近能稳定产生少周期自压缩脉冲的方法，首次实现了在固体材料自压缩中对电离的调控，其在高功率少周期脉冲产生以及后续的阿秒脉冲产生方面存在潜力。

此外，由于通过空间滤波后的自压缩脉冲光斑为环形分布，而环形光斑在高通量、高次谐波的产生过程中被证明有独特优势，因此可为后续极紫外激光的产生研究提供稳定可靠的光源。❑

AEROTECH

白皮书下载：

精密加工领域2D校准的挑战及解决方案



当前精密和超精密加工精度已经从微米发展到到亚微米，乃至纳米水平，而如此高精度的加工应用已经在汽车制造、半导电制造、电子制造、面板显示制造等领域展露头角。在高速发展的工业时代下，加工精度又有了新的挑战，今天我们来探讨Aerotech高性能控制器A3200如何在高加工精度的挑战下保证必要的机械精度。在一定的应用环境下，Aerotech的解决方案可以到达纳米级精度，这将确保高精密度加工的可靠性和稳定性。

光子学股票市场：自由市场 Vs. 监管障碍

光子学领域的很多市场机会，需要经历漫长的设计和测试周期，其中包括行业标准和监管方面的各种障碍。

文/John Dexheimer，LightWave Advisors总裁



在过去的一年里，我们已经分享了我们的 LightWave Advisors 光子学指数（见 https://bit.ly/Photonics StockIndices）是如何与著名的半导体 SOX 指数（见图）同步跟踪的。一个大胆但准确的说法是：如果没有光子学领域的领导和创新，整个半导体领域就没有、也不会有进步。一个很好的例子是荷兰光刻机公司 ASML 及其激光创新，这些创新催生了半导体领域新一轮的建设竞赛。ASML 公司的价值在三年内增加了两倍，现在的价值接近 3000 亿美元，已经超过了英特尔。

虽然光子学经常被认为是一种零散的、发展也不怎么快的深奥技术，但是它的影响却是广泛而深远的。它值得投资者更多的关注，因为它在推动整个科技生态系统的新产品和服务方面发挥了重要作用——不仅仅是在通信领域，而是在整个半导体、物联网（IoT）、医疗创新、移动性以及人工智能（AI）相关的众多领域。

“监管障碍”问题是：许多光子学的这些市场机会，有着令人难以置信的漫长的设计和测试周期，其中包括行业标准和监管方面的各种障碍。在通信领域，在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初，对于任何公司而言，最大的障碍都是 Telcordia 的审批周期和成本。对于那个时代的许多公司来说，筹集几亿多美元的私人或公共资本，并不足以在审批、设计周期和市场需求的转变中得以生存下来。受美国食品和药物管理局（FDA）周期限制的医疗设备公司，也面临着类似的繁琐道路和费用，这可能会耗尽资金和投资者的胃口。

对通信行业来说，幸运的是，数据中心和无线分配的兴起，加上软件在管理交换和服务质量方面的灵活性，使得重新架构的规格可以摆脱 Telcordia 的束缚。光电厂商从这些举措中获益匪浅，在过去的十年里，数据中心企业在建设、对光学供应商的影响和股票市场价值方面，已经超过了老牌电信运营商。

在过去的一年里，光子学界享受到了来自 10 家新上市的激光雷达公司的资本流动和可喜的未来预测的激励，最近 Cepton、Aurora 和 Quanergy 公司都已投入运营，还有更多的公司在努力吸引着投资者的兴趣。

在这些公司中，有些公司的客户应用重点以汽车或卡车为中心，也有一些公司最初的关注点是用于仓储或智能城市监测的智能移动。所有这些公司都预计，收入将在目前微薄收入的基础上大幅增长。最初完成特殊目的收购公司（SPAC）合并的六家公司（每家公司都带来了几亿资金），预计在 2022-2024 年实现盈利，2025 年的收入将从 3 亿美元增长到远远超过 10 亿美元。然而，所有这些公司在最近几个月都遭遇了重大的股票下跌（见表）。

为什么这些公司的股价会下跌呢？这是个很自然的问题。对特斯拉观察时间最长、且非常有见地的一位股市分析师 Loup Ventures，在最近的分析指出了一个问题：美国国家公路运输安全管理局（NHTSA）在 2021 年 8 月 16 日宣布，它正在开始对几起特斯拉自动



8/20/21 price vs. 1/4/21	Stock price decline in 2021
Aeva	62%
AEYE	35%
Innoviz	50%
Luminar	58%
Ouster	46%
Velodyne	76%
Median	**54%**

驾驶汽车碰撞事故进行正式调查。特斯拉股价在 NHTSA 宣布后的第二天收跌 4.32%。Loup Ventures 评论说：“对科技公司进行更严格的主动驾驶性能的审查，可能会推迟任何主流的自主性技术的可用性。我们一直希望能在 2025 年看到公共的完全自动驾驶的车辆，而这看起来有点过于乐观了。”

从本质上讲，激光雷达和自动驾驶汽车正在经历类似 Telcordia 和 FDA 的测试和审查时刻，这需要时间。就像所有涉及对人和财产造成巨大损害风险的情况一样，解决方案也将伴随着额外的法律和保险政策及费用，这将作为监管过程的一部分一并出台。同以往一样，这意味着时间和金钱。

公共激光雷达公司的问题是：1）他们如何在通往大批量运输的道路上，穿越这些障碍？是否需要调整战略或预期？他们是否有资本经历多年的收入疲软？2）非汽车市场是否足够大？是否有足够的利润来吸引投资者的支持？3）非美国市场是否是这些公司关注的更好地方？4）并购，包括与一些电动汽车公司合并，是否是一些公司可能采取的途径？

经常有人问我，难道这些公司不应该被加入到光子学股票指数中吗？一方面，它们为光电子行业带来了大量资金和新的客户及供应链关系；但另一方面，与这些好处相抵触的是，它们表现出了极强的波动性，这可能会拖累更广泛的行业股票业绩指标，而这些股票是基于具有可持续商业模式和战略的公司。

现在的激光雷达公司更类似于 FDA 批准前的公共生物技术公司，很高兴看到他们如何推进创新。对于公共投资者来说，这个投资市场会有波动，也会有赢家和输家——这也是我们之前在光子学最有前途的市场应用中所看到的。进军这类市场，请系好安全带！❑

光学引领未来™



极紫外激光

更紧凑的 XUV 激光器有望使无数研究受益

一项新技术有助于产生更强烈的极紫外 (XUV) 脉冲，它可以克服现有的激光稳定性限制，并加强成像和光谱等领域的研究。

文/Justine Murphy

由德国 Max Born Institute 领导的团队开发的新方法基于高次谐波生成（HHG），它依赖于将近红外（near-IR）激光脉冲聚焦到气体靶上。发射出频率为近红外驱动激光谐波的非常短的光脉冲，这些通常落在 XUV 区域。据研究人员称，为了获得强烈的 XUV 脉冲，必须产生尽可能多的 XUV 光，这可以通过在大型实验室中产生非常大的近红外驱动激光的焦点来实现。

该团队还包括来自匈牙利 ELI-ALPS 和罗马尼亚 Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Izotopice si Moleculare 的研究人员，在他们的研究中，能够通过使用延伸长度仅为 2m 的装置来缩小强烈的 XUV 激光器。[1] 具体而言，研究人员不是在近红外驱动激光器的焦点处产生 XUV 光，而是将“非常密集的原子射流”放置在离近红外驱动激光焦点相对较远的地方。

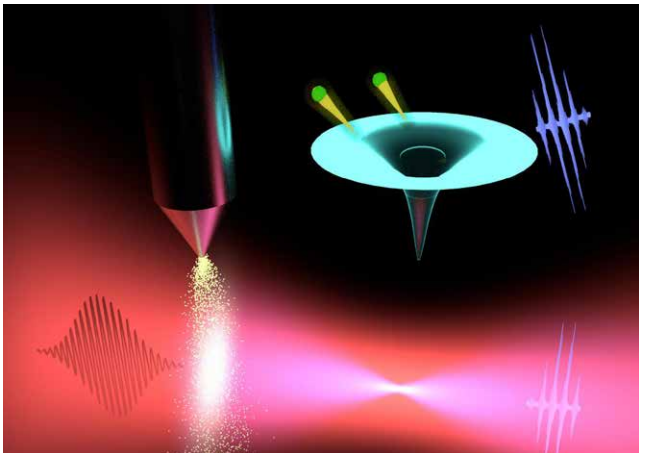


图1：近红外脉冲（红色）被聚焦，并在位于近红外焦点之前或之后的气体射流中产生高次谐波。这样，产生的XUV光具有与近红外光束相似的尺寸和发散度。由于波长较短，因此XUV光束的焦点远小于近红外光束的焦点。这允许产生强烈的XUV脉冲，用于原子的XUV多光子电离（见图上部分）。

优势

研究人员指出，他们的新技术有两个显著优势：由于射流位置的近红外光束很大，因此产生了许多 XUV 光子。此外，产生的 XUV 光束很大，发散度很大，可以聚焦到很小的光斑尺寸。“大量的 XUV 光子结合小的 XUV 光斑尺寸，”研究人员说，“使得产生强烈的 XUV 激光脉冲成为可能。”

缩小激光器系统可以更好地帮助科学、工业和医疗应用，因为这些应用受益于电磁光谱可见范围内紧凑型激光器的可用性。据研究人员称，这在 XUV 波长上是不同的，“已经建造了非常大的装置（所谓的自由电子激光器）来产生强烈的 XUV 脉冲。”

通过氩原子的多光子电离，该研究展示了 XUV 脉冲的高强度（见图 1）。然后原子可以倍增和电离，研究人员指出，这产生了 Ar^{2+} 和 Ar^{3+} 的离子电荷态。这需要分别吸收至少两个和四个 XUV 光子。据研究人员称，尽管这种强 XUV 光源的占地面积很小，“但是获得的 $2\times10^{14}W/cm^2$ 的 XUV 强度，已经超过了许多现有的强 XUV 光源。”

新开发的紧凑型强 XUV 激光器和方法可以在实验室中实施，加强各种研究，包括阿秒泵浦、阿秒探针光谱学（研究人员表示，现有技术很难实现这些研究）。其他可能受益的应用领域还包括纳米级物体的成像，如生物分子成像。❑

参考文献

1. B. Major et al., Optica, 8, 960–965 (2021); doi.org/10.1364/optica.421564

VCSEL

VCSEL 阵列作为一个激光器促进医疗和通信应用

将VCSEL阵列相干地组合成一个激光器，有望实现紧凑的高功率、高亮度激光源，进而在医疗设备、通信等方面开辟出新应用。

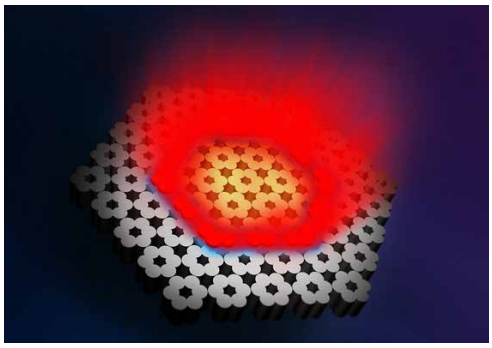


图1：VCSEL拓扑阵列的艺术图。沿着拓扑界面（蓝色）的30个微型激光器作为一个整体，共同发射相干激光（红色）。

文/Justine Murphy

将垂直腔面发射激光器（VCSEL）阵列相干地组合成一个激光器，将有望实现非常紧凑的高功率、高亮度激光源，进而开辟出很多新应用。虽然只有“沙粒大小”，但最近开发的激光网络已经证明了 VCSEL 的有效性，并且它们还显示出了在医疗设备等方面的应用前景。

以色列理工学院的研究人员，与德国维尔茨堡大学（Julius-Maximilians-Universität Würzburg）和卓越中心 ct.qmat 组成的团队一起，在芯片上采用了一种独特的 VCSEL 几何排列——光子拓扑绝缘体平台，迫使其以特定的路径流动。

研究人员描述说：“拓扑绝缘体是革命性的量子材料，它在内部绝缘，但是其表面是导电的，并且没有损耗。”[1]

迄今为止，科学家们一直通过组合众多 VCSEL 单元、并迫使它们作为一个单一的相干激光器，来提高 VCSEL 的发射功率，但遗憾的是，他们并没有取得成功。

突破

以色列和德国的研究人员合作，实现了拓扑绝缘体激光器，即“它是一个半导体激光器阵列，该阵列利用拓扑结构的基本特征，使所有发射器作为一个单一的相干激光器”，将激光强制锁定在一个平面芯片内。这促使来自每个微小激光器的光与其相邻的激光器相干同步，使得发射的光在该芯片的表面上是相干的，并垂直于芯片发射（见图 1）。据研究人员称，他们的“实验体现了光的拓扑传输的力量。光线大部分时间都在垂直方向上振荡，但小的面内耦合足以迫使单个发射器阵列作为一个单一的激光器来发挥作用。”

该项目负责人、维尔茨堡大学教授 Sebastian Klembt 说：“这种 [组合] 激光器的拓扑原理一般可以适用于所有波长，从而适用于一系列材料。”Sebastian Klembt 教授主要从事光 - 物质相互作用和拓扑光子学研究。

此前，以色列理工学院的一个研究小组已经展示了第一个光子拓扑绝缘体——光在二维波导阵列的边缘传播，并且不受缺陷或无序的影响。此外，该小组还能利用光子拓扑绝缘体的特性，迫使一些微型激光器锁定在一起，作为一个单一的激光器发挥作用。然而，研究人员指出，“该系统仍然有一个主要的瓶颈：光在光子芯片中不断循环，被限制在用于提取光的同一平面内。”这意味着整个系统再次受到发光设备的功率限制。

该团队此次获得的新突破避免了上述限制，它使用了一种新方案，使激光被强制锁定在平面芯片内，与此同时光通过芯片表面从每个微小的激光器发射，并且可以很容易地被收集。

“早在 2015 年，我们就开始研究拓扑绝缘体激光器了，当时没有人相信这是可能的，因为当时已知的拓扑概念仅限于实际上没有增益的系统。”以色列理工学院领导这项工作的教授 Mordechai Segev 说，“但是所有的激光器都需要增益。所以拓扑绝缘体激光器在当时看来就是天方夜谭。那时候，我们的探索可能在大家看来跟疯子差不多，我们在寻找人们普遍认为不可能实现的东西。而现在，我们已经朝着拥有众多应用的真正技术迈出了重要的一步。”

最值得注意的是，这些应用领域包括医疗设备和通信系统。❑

参考文献

1. A. Dikopoltsev et al., Science, 373, 6562, 1514–1517 (Sep. 24, 2021).

光学传感

新型传感器可快速检测传染病原体

一种灵敏的感染源测试方法，已经提高了测试的速度、灵敏度和可靠性，正在向临床应用迈进。

文/Richard Gaughan

新冠疫情（COVID-19）的爆发表明，首先，不断变化的气候和无法阻挡的全球化脚步，增加了人们被传染的风险。第二，我们需要能够快速且准确地检测这些作为感染源的微生物的测试方法。

最近几年，韩国一个研究小组一直在开发这样一种敏感且灵活的测试平台。现在，他们已经提高了测试的速度、灵敏度和可靠性，正在向临床应用迈进。[1] 该研究小组使用的传感器是围绕硅微环谐振器（SMR）建立的，其表面经过修改，可以结合特定的目标生物体 DNA。当分子与 SMR 结合时，有效折射率会发生变化，从而改变谐振波长。通过测量波长扫描激光源的光功率变化，可以确定谐振波长的变化。

这项创新使用球透镜来优化输入和输出的耦合，从而改善设备的性能。

单步测量

理想的临床测试，能通过一个易于使用的流程，快速提供准确的测试结果。对快速、准确和简单性的要求，往往会使设计朝着不同的方向发展，所以开发不仅需要严谨，而且需要创新。该研究小组由来自韩国延世大学和其他三个韩国组织的成员组成，他们将围绕灵敏的 SMR 开展工作。

SMR 是在小型圆形环中形成的硅波导。几何形状和折射率决定了谐振频率。当一个环形谐振器与一个线性波导相邻时，延伸到线性波导外部的瞬逝场，将在环形谐振波长上传递能量。对于一个宽带光源，这种能量转移显示为通过线性波导传输的功率谱密度的下降。在这个实施过程中，韩国研究人员使用了一个带有四个 SMR 的设备：他们将一个 SMR 埋在氧化硅中以监测温度影响，将另外三个 SMR 从氧化层中蚀刻出来，并实施了一种创新的生物化学检测方法。

他们将前向 DNA 引物结合到三个传感 SMR 的表面，并将传感器浸入含有额外引物、酶和测试样品的溶液中。传感器保持在 38° C，如果样品 DNA 与引物相匹配，该 DNA 就会在与 SMR 结合的引物上进行原地复制。在 SMR 的共振模式中，很大一部分能量处在消逝波中，所以波导中的光和结合在 SMR 表面的分子之间，会产生很大的相互作用。

研究人员在临床上通过感染柯萨奇菌（Coxiella burnetii）的患者验证了共振的变化。这是一种难以诊断的感染，可能导致发热，是一种严重的人类疾病。共振波长的变化与未受感染的病人的特征明显不同，整个检测过程只需 30 分钟。[2]

灵敏度和速度都达到了要求，但是该传感器需要仔细对准输入光束，这限制了其在临床的使用。为了减少对入射光对准的敏感性，研究人员在光纤上增加了球透镜，以耦合进出传感器的光线。这带来了两个额外的好处：首先，它增加了线性波导中输入光的聚焦深度，也就是说，光束在更长的距离内保持更窄的聚焦，这最大限度地提高了与 SMR 的耦合；第二，光进入和离开传感器的耦合也得到了改善，带来了更高的信噪比，也就是更高的探测灵敏度。

现在，这个设计已经满足了对灵敏度、速度和可靠性的要求；下一步将是临床验证。

真实世界的测试

更新后的传感器配置，将来自中心波长为 1550nm 的扫频可调谐激光器的光送入保偏光纤，然后送入一个定制的、直径为 300 μ m 的球透镜。球透镜将光束引导到 SMR 传感器波导中，在那里光束与三个功能化谐振环和单个非功能环接近传播。透射光被一个匹配的球透镜 / 光纤组件

收集，然后被一个光电二极管检测。两个球透镜组件被自动对准，以产生最大的吞吐量（见图 1）。

在操作中，当波长扫过所需的范围时，传感区被浸入酶 / 引物 / 分析物溶液中，监测 SMR 共振的任何变化。在目标分析物存在的情况下，更多的分子被结合到表面，产生更大的共振位移。研究人员通过测量来自 18 个不同发热病人的临床样本，验证了该传感器的性能。经过 20 分钟的测试等待后，9 名 Coxiella burnetii 感染者与 9 名由其他原因引起的发热患者被明确地区分开来。

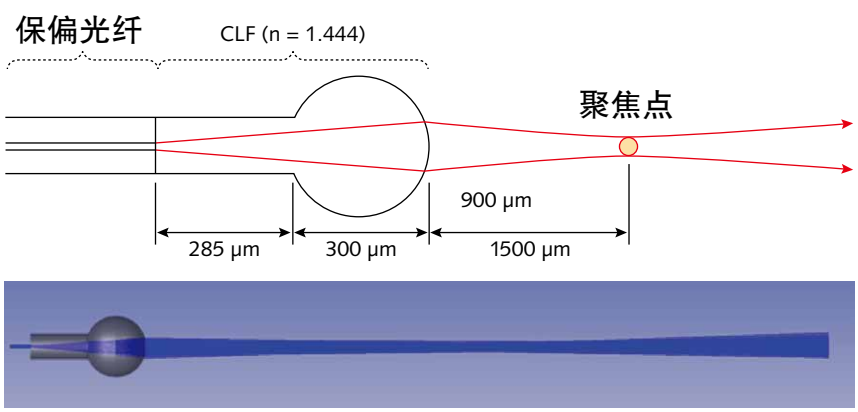


图1：球透镜耦合，提高了基于硅微环谐振器的传感器的灵敏度和易用性。

该传感器还可以被修改为检测其他传染病原体，只需改变引物的设计。研究小组成员、韩国延世大学的 Yong Shin 教授说，他们现在正在测试更大的临床样本群，并且正在走向“将光学传感器在临床应用中商业化”的道路。❑

参考文献

1. B. Park et al., Biosensors, 11, 125 (2021); doi:10.3390/bios11040125.
2. B. Koo et al., J. Biophotonics, 11, 1–9 (2018); doi:10.1002/jbio.201700167.



运动控制

如何为电动系统确定最优的比例加速度？

在运动控制系统中，为电动位移台找到最优的比例加速度，是其实现最优性能的一个关键环节。

文/ MKS/Newport

电动系统由电机控制器、位移台和需要移动的负载组成。根据电机参数、电机驱动器的功率输出能力和负载的质量，可以计算出位移台的理论加速度值。

然而，实际运动系统的加速度，会受到电机驱动器、电机功率以及运动系统本身局限性的限制。控制器使用此推算加速度和加速度限值来生成运动轨迹。这种运动轨迹以指定的速度和加速度来完成所需的从 A 点到 B 点的运动。在 stages.ini 文件中，无刷电机位移台和线性电机位移台的理论加速度值是其比例加速度参数，加速度的限值是极限加速度值（Acceleration Limit）。

找到正确的比例加速度，会使电动位移台达到最优性能。这个过程类似于校准磁针罗盘的磁偏角。如果要使用磁针罗盘向北方前进（朝着地理北极），但是只能偶尔通过更绝对的方法（例如地图、GPS 等）进行位置验证，那么就必须事先校准测量系统的方向。否则，当检查在计划路线上的进度时，就需要校正与向地理北极前进的偏差。

比例加速度，表示针对指定负载的期望系统响应。如果比例加速度值与实际值不对应，那么反馈回路系统将需要进行额外的校正，才能最好地实现所需的运动。反馈回路负责监控运动期间的位置，需要有校正信号才能将运动的位移台的实际性能，与运动前计算的运动轨迹相匹配。

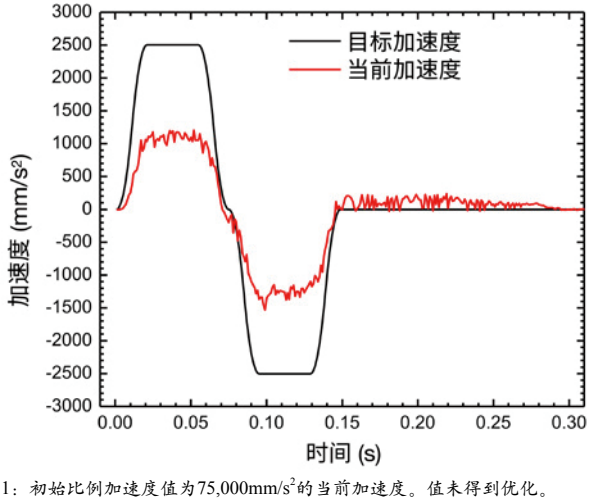


图1：初始比例加速度值为75,000mm/s^{2}的当前加速度。值未得到优化。

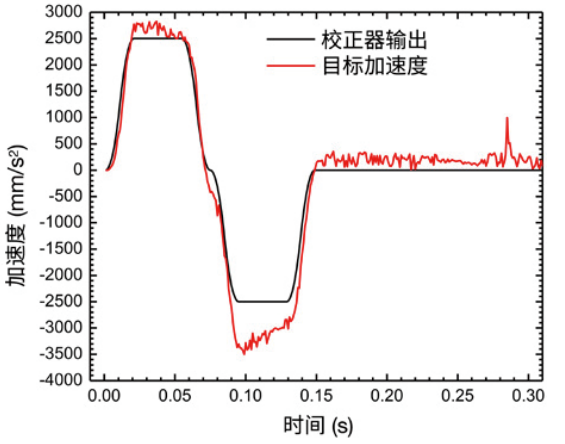


图2：比例加速度值为30,000 mm/s^{2}的当前加速度。与初始观察结果相比，响应已得到优化。

以下是为指定负载找到适当的比例加速度的三种实证方法。附录 A 展示了根据电机规格和负载特征，来确定比例加速度和极限加速度值的理论方法。对于采用线性电机和无刷电机的 Newport 位移台，请参考附录 B 中展示的图形和公式。

方法1：开环，当前加速度优化

如果不知道可靠的 PID 参数，那么首先需要在开环模式下确定比例加速度。在找到适当的参数值之后，优化 PID 设置。然后，可以使用两种闭环比例加速度优化方法（方法 2 和方法 3 部分）之一，进一步优化比例加速度值。

此示例中假定了一个未知负载，以及一台参数不详细的电机。理论上，优化运动系统之后，当前加速度将与目标加速度相匹配。假定初始比例加速度为 75,000mm/s^2。图 1 显示了在 10mm 的运动期间，采集的当前加速度和

目标加速度数据。在位移台开始加速时，目标加速度为2,500mm/s^2，当前加速度约为 1,000mm/s^2。实际加速度值与目标加速度值之比为 0.4。将比例加速度值 75,000mm/s^2 乘以此比值，得出新的比例加速度值 30,000mm/s^2。图 2 显示了使用 30,000mm/s^2 的比例加速度时采集的加速度曲线。性能有所提升，但需要继续改进。图 3 显示了比例加速度为 32,400mm/s^2 时的加速度曲线。

具体实现步骤：

1、如果需要，从“Stage/Modify（位移台 / 修改）”页面中，为要优化的位移台设置以下参数：

HomeSearchSequenceType = CurrentPositionAsHome

然后重新启动 XPS，以便参数加载到内存中。

2、导航到 XPS 页面上的“Tuning（调谐）”选项卡。

3、验证闭环设置是否 = 0。

4、用手（如果可能）将位移台移动到起始位置。

5、初始化位移台。

6、使位移台回到原点。

7、输入所需运动的运动参数（速度、加速度、加速时间等），或验证已有参数是否正确。

8、配置当前加速度和目标加速度的数据采集。

9、配置采集点数和频率。

10、移动位移台。

11、从显示的数据中，找到目标加速度保持恒定的时间区域。

12、计算当前加速度与目标加速度之比，以及后续新的比例加速度值。如果当前加速度浮动或者不稳定，可以尝试确定平均值或者其他期望的稳态值。

新的比例加速度 = 旧的比例加速度 ×（当前加速度 / 目标加速度）

13、从“Stage/Modify（位移台 / 修改）”页面中，找到所需的位移台并点击“Modify（修改）”。

14、在参数列表中，找到 ScalingAcceleration = 并输入计算得出的值。注意：极限加速度值必须小于或等于比例加速度值。

15、重新启动 XPS。

16、转到第 2 步并重复移动和采集。

17、确定比例加速度值是否得到优化。合理的优化是测得的当前加速度值处在目标加速度的 ±5% 的范围内。如果得到优化，则终止该过程。如果没有得到优化，则转到第 11 步。

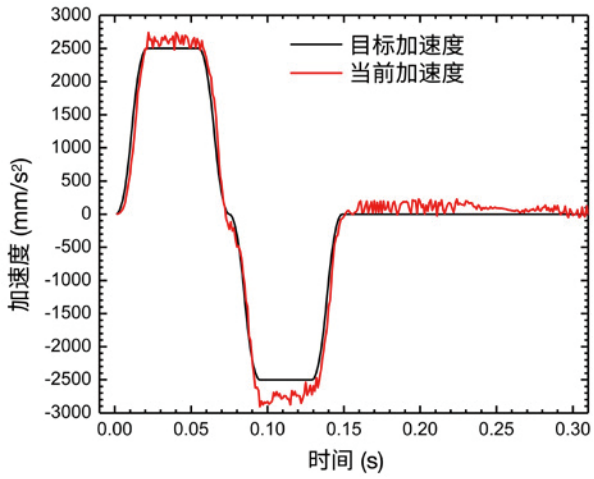


图3：比例加速度值为32,400mm/s^{2}的当前加速度。与图2中观察到的性能相比，响应再次得到优化。

方法2：闭环，校正器输出优化

要优化的位移台是 Newport XMS50。XMS50 上的负载约为 6.0kg。除非另有说明，否则优化测试的运动参数为：速度 = 300mm/s，加速度 = 2,500mm/s^2，最小和最大加速时间 = 0.02s，行程距离 = 20mm。

Amonics
Specialist in Optical Amplifiers
ISO 9001 : 2015
Certificate No.: CC 5346
高功率EDFA模块
(自由空间通信应用)
光纤耦合输出功率 > 15W
1550nm人眼安全波长
窄线宽
低相对强度噪声及低相位噪声
宽工作温度范围: -20 ~ +65°C
坚固可靠、结构紧凑
低功耗的24V直流电源
高可靠性和免维护
高功率扩展L波段
DWDM掺铒光纤放大器
高增益、极低噪声
高输出功率 > +27 dBm
扩展工作波长: 1570 nm ~ 1620 nm
增益平坦度 (峰间值) < 2.0 dB
网站： https://www. amonics.com
电话： +852 2428 9723
地址： 香港九龙新蒲岗五芳街12号利景工业大厦14楼
邮箱： contact@amonics.com
Advancement of Optical Technology
Brightening the world with Advanced Photonics platform

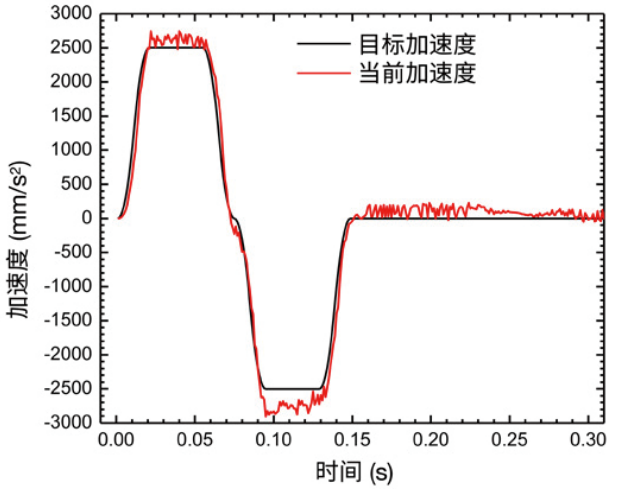


图4：默认比例加速度值为56,740 mm/s²时的校正器输出。值未得到优化，系统响应失控。

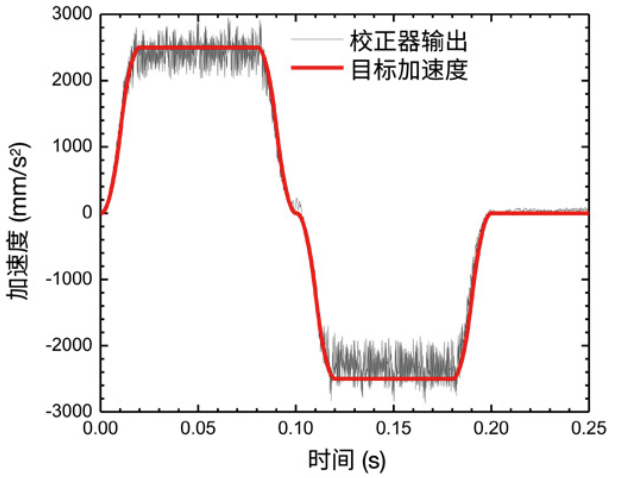


图5：计算得出的比例加速度值为8,851mm/s²时的校正器输出。值得到优化，系统响应符合期望。

使用默认的比例加速度值 56,740mm/s² 和负载 6.0kg 时，此运动系统的校正器输出未得到优化。图 4 显示了在 20mm 的运动期间采集的校正器输出和目标加速度数据。理想情况下，优化运动系统之后，校正器输出将与目标加速度相匹配。在这里，XPS 检测到真实的加速度与期望的加速度不匹配。因此，校正器输出与目标加速度不匹配。在位移台初始的恒定加速度期间，目标加速度为 2,500mm/s²，然而，校正器输出约为 16,000mm/s²。目标加速度值与校正器输出值之比为 0.156。将 56,740mm/s² 的比例加速度值乘以此比值，得出新的比例加速度值 8,851mm/s²。

在 stages.ini 参数文件中输入新的比例加速度值后，重新启动 XPS，然后进行相同的运动，采集到的数据如图 5 所示。新的值更符合运动系统的实际性能。

具体实现步骤：

1、导航到 XPS 页面上的“Tuning（调谐）”选项卡。

2、验证闭环设置是否 = 1。

3、将位移台移动到起始位置。

4、输入运动参数（速度、加速度、加速时间等）或验证已有参数是否正确。

5、配置数据采集器采集校正器输出和目标加速度数据。

6、配置采集点数和频率。

7、移动位移台。

8、从显示的数据中，找到目标加速度保持恒定的时间区域。

9、计算目标加速度与校正器输出之比，以及后续新的比例加速度值。如果当前加速度浮动或者不稳定，可以尝试确定平均值或者其他期望的稳态值。

新的比例加速度 = 旧的比例加速度 ×（目标加速度 / 校正器输出）

10、从“Stage/Modify（位移台 / 修改）”页面中，找到所需的位移台，并点击“Modify（修改）”。

11、在参数列表中，找到 Scaling Acceleration = 并输入计算得出的值。注意：极限加速度值必须小于或等于比例加速度值。

12、重新启动 XPS。

13、转到第 1 步并重复移动和采集。

14、确定比例加速度值是否得到优化。合理的优化是测得的校正器输出值处在目标加速度的 ±5% 的范围内。如果得到优化，则终止该过程；如果没有得到优化，则转到第 8 步。

方法3：自动比例

当系统接近最优时，自动比例可用于自动计算比例加速度值。一种示例情况是系统之前得到优化，而负载只有少量变化。

具体实现步骤：

1、导航到 XPS 页面上的“Tuning（调谐）”选项卡。

2、点击“AutoScaling（自动比例）”按钮。请注意，如果位移台之前已初始化，则首先终止初始化。

3、确定计算得出的值是否与负载的变化保持一致（负载越大，则比例加速度值越小；反之亦然）。

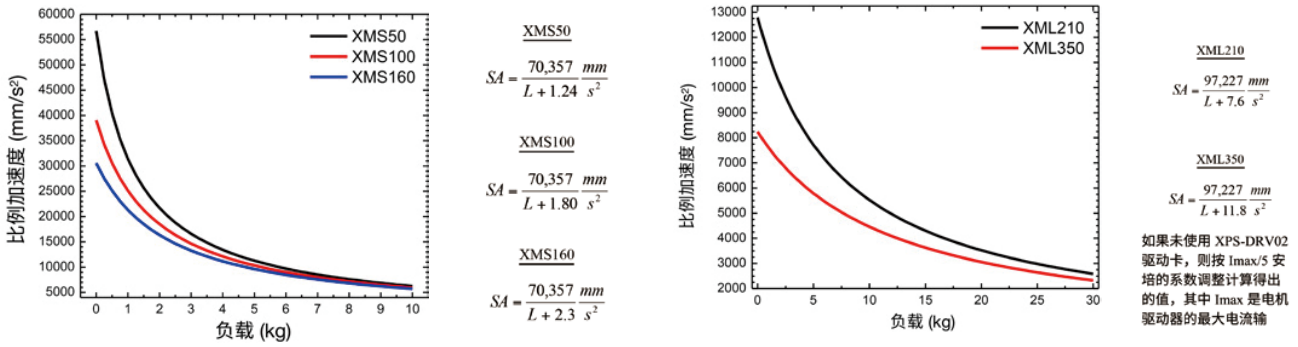


图6：使用XPS-DRV02驱动卡时，XMS和XML系列线性位移台在不同负载(L)下，计算得出的比例加速度(SA)值。

4、如果需要，保存数据。

5、使用闭环部分中所述的数据采集来验证优化情况。

附录 A：比例加速度和极限加速度的理论计算方式

比例加速度是将完整的 10V 信号输入到电机驱动器时的理论最大位移台加速度。可以使用以下方程针对无摩擦情况初步计算得出该值：

$$ScalingAcceleration = \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{MotorForceConst * 10 * TransimpedenceDriver}{Mcar + Load}$$

其中：

1) MotorForce Constant（电机力常数）：是由电机制造商提供的规格。单位为牛顿 / 安培。（以安培为单位的电流是 RMS 值）。

2) TransImpedence Driver（跨阻抗驱动器）：是驱动卡的特征。对于 XPS-DRV02，该值为 0.5 安培 / 伏特。

3) Mcar（载台质量）：表示载台的质量，单位为千克。载台，是在位移台上移动并且能够运载负载的部件。

4) Load（负载）：由用户提供，在位移台载台上的负载。单位为千克。

注意：该方程将得出 m/s^2 作为线性位移台的单位。然而，XPS 的单位通常为 mm/s^2。

极限加速度是由位移台的安全运行参数确定的最大加速度。此极限能够防止过热和其他动态错误。直驱位移台的极限加速度由以下方程来确定：

$$AccelerationLimit = ScalingAcceleration * \frac{StagePeakCurrent}{MaxDriverCurrent} * 0.95$$

其中：

1) Scaling Acceleration（比例加速度）：之前确定的比例加速度值（见上文）。单位为 mm/s^2。

2) MaxDriverCurrent (Imax)（最大驱动器电流）：驱动卡的特征。XPS-DRV02 为 5 安培，XPS-DRV11 为 6.4 安培。

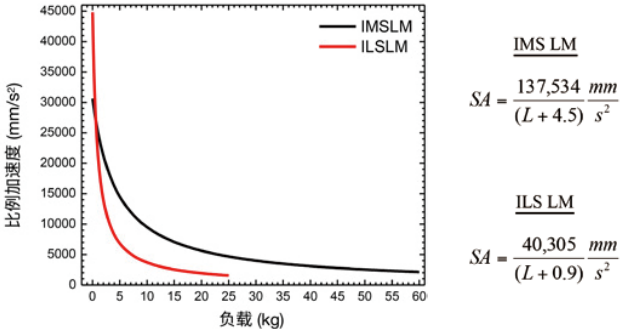


图7：使用XPS-DRV02驱动卡时，IMS和ILS线性电机系列线性位移台在不同负载(L)下，计算得出的比例加速度(SA)值。

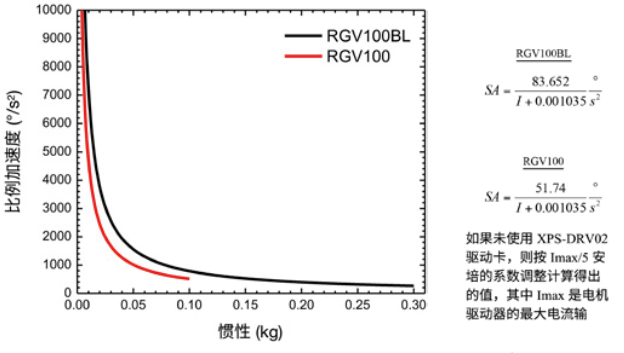


图8：使用XPS-DRV02驱动卡时，RGV系列旋转台在不同惯性负载(I)下，计算得出的比例加速度(SA)值。

3) StagePeakCurrent（位移台峰值电流）：输出到电机的最大安全电流。单位为安培。

附录 B：使用 XPS-DRV02 驱动卡的 Newport 位移台的比例加速度值公式和计算得出的图形（见图 6- 图 8）。

如果使用其他驱动卡，请按 Imax 为 5 安培的系数调整确定的值，其中 Imax 是驱动卡的最大电流输出。L 表示增加的负载（千克）。❑

绿激光加工

绿光激光加工的新进展

绿光激光器已经找到了独特的材料加工应用，最新的应用是使用铜粉进行3D打印。

文/ Tracey Ryba，Travis Stempky

在过去的三年里，电动汽车市场出现了爆发式增长。这种电气化需要非常大的电池组，而电池组的生产需要大量焊接环节。

除了机动车辆的电气化之外，人们对电子设备的需求继续以惊人的速度增长，从用于太阳能电池板的家用蓄电单元到工业蓄电单元、手持蓄电设备、备用电池单元、计算机、手机和平板电脑等，市场需求快速增长。这些设备大多使用铜或铝，因此很难用红外（IR）激光焊接，尤其是铜箔或铝箔。就在几年前，可见波长激光器都非常昂贵，而且对于高利用率的工业制造来说，可见光激光器在耐用性方面也存在不足。但是，经过最近几年的发展，现在可见光波长激光器已经能够提供高光束质量、工业稳定性和有吸引力的价格。

通快公司是工业 OEM 激光器的全光源供应商，能提供包括 CO_2、光纤、碟片、二极管、棒状、连续波、脉冲和超快激光器等种类丰富的激光器产品，这使得通快公司有极大的灵活性去研究应用，以确定加工材料的最佳激光源。仅以电动汽车为例，对其电池、马达和配电网络，通快使用了五种不同类型的激光器，其中一种是绿光波长激光器。

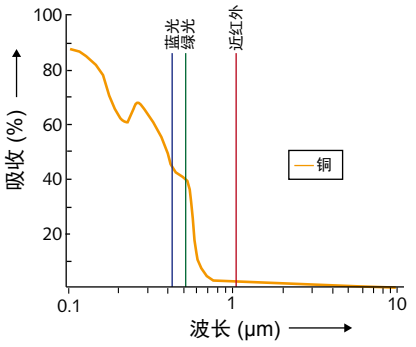


图1：铜在室温下的波长吸收。

让我们来看看为什么可见光波长激光器会备受关注。这一切都始于铜的吸收（见图 1）；铜对近红外激光的吸收仅为 1%~5%，具体取决于铜的表面条件（如抛光、氧化、清洁等），而在室温下铜对可见光的吸收却高达 40%~45%，并且与表面条件无关。

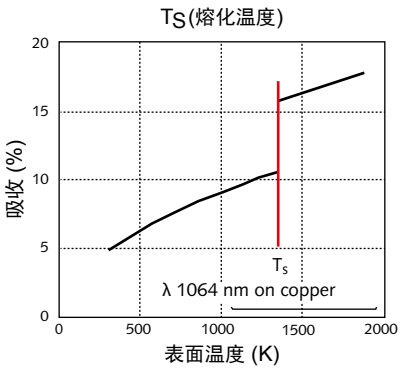


图2：在小孔形成过程中，铜从固态转变为熔融状态时，对红外激光的吸收变化情况。（图片来源：S. Amorosi，T. C. Sidler，R. P. Salathe，H. P. Schwob 和 J. Hertzberg，Proc. SPIE [2003]；https://doi.org/10.1117/12.540460）

图 2 给出了铜对 1064nm 红外激光的吸收情况。从图中可以看出，随着熔化温度的逐渐升高，在温度达到铜的熔点之前，铜对红外光的吸收在 5%- 10% 之间；当铜达到熔点之后，吸收急剧跃升至 17% 左右。这种巨大的尖峰通常会产生剧烈的反应，导致一些熔化的材料以飞溅的形式排出。在许多情况下，这会导致小孔塌陷，使整个工艺不得不重新开始。

绿光激光器的优势

由于铜在绿光波段的初始吸收很高，因此几个百分比的吸收变化并没有什么大影响，并且可以更精细地控制该过程。图 3 给出了焊接过程的另一种分解，显示了铜从固态转变到熔融状态后的吸收情况，并且清楚地表明铜对可见光波长的吸收，与对红

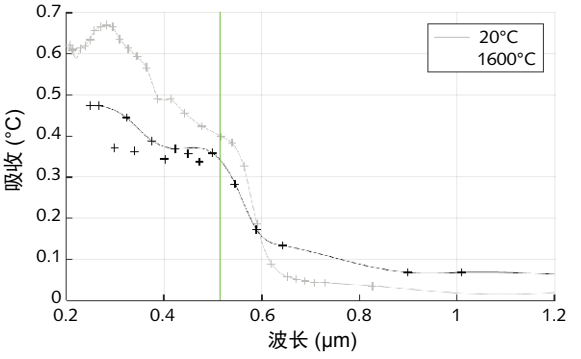


图3：铜在固态和熔融状态下对可见光的吸收情况。（图片来源：S. Kohl，德国光子技术研究所）

外光的吸收具有相反的效果，即铜融化后对可见光的吸收略有下降。这一特性有助于在加工铜时获得稳定的小孔，并能达到几乎是零飞溅。

那么，绿光激光器的优势在哪里呢？简短而言，使用铜的传导焊接、铜的薄箔焊接，以及基本上任何需要无飞溅或需要控制热输入和焊接深度的铜焊接应用。传统焊接通常是关于强度和外观的，但在电气化加工中，导电性 / 低电阻同样重要，甚至在许多情况下比强度更重要。

焊接薄的铜箔堆叠是绿光激光器的一项完美应用。这里所说的薄箔堆叠，指的是 5~25μm 厚的箔和典型的 10~100 张堆叠，任何三张或超过三张的堆叠都是理想的。与所有激光焊接一样，层与层之间的间隙是一个问题，因此消除间隙的夹紧方法对于成功的激光焊接至关重要。使用红外激光，需要建立小孔以获得一致的吸收，因为吸收随温度变化而变化很大，而且过程非常不稳定。小孔非常易挥发，并且随着飞溅物被喷射出来，也可能有几乎没熔化的材料来桥接很小的间隙，导致上层被切穿，因此无法形成良好的电接触。

对于绿光波长，在该过程中存在受控吸收，并且可以使用热传导焊接或稳定的小孔，用于更厚的堆叠，结果是没有飞溅并且所有熔融材料都能够帮助填充任何间隙，提供理想的焊缝。图 4 显示了焊接到两个 0.5mm 铜母线的 100 片 6μm 厚铜箔的横截面。这是通过一台 2kW 的绿光激光器使用振镜扫描头创建运动图样以优化焊接完成的。焊缝长 10mm，焊接耗时 477ms；焊点用黑色勾勒出来了，以便于查看。

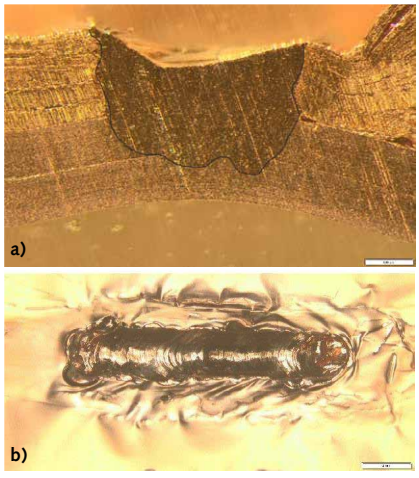
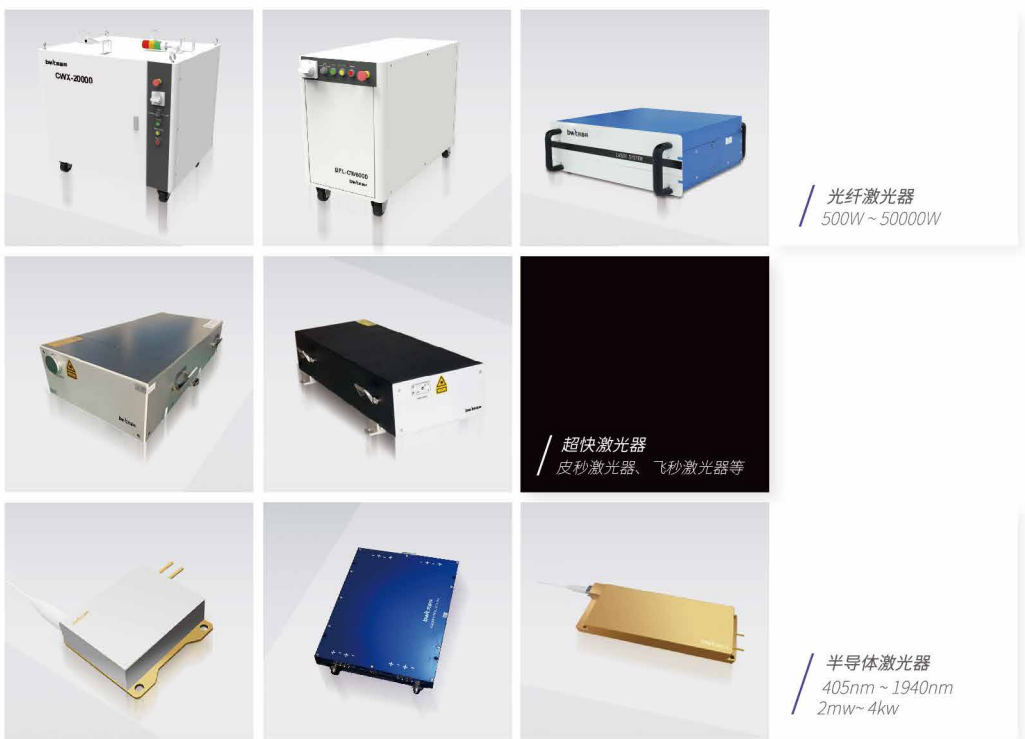


图4：焊接铜箔堆叠，图中显示了显示横截面（a）和俯视图（b）。

具有最小热输入和消除飞溅的成品电子元件，在这个加工阶段至关重

bwt 凯普林
INSPIRE THE WORLD



敬请关注，更多精彩！

中国国际工业博览会 展位号-NH馆 D020
CHINA INTERNATIONAL INDUSTRY FAIR
2021 / 12 / 01-05 国家会展中心（上海）

产品与技术咨询
电话 010-83681053
邮箱 sales@bwt-bj.com

凯普林光电
地址 北京市丰台区航丰路甲4号
网址 http://www.bwt-bj.com

全球激光解决方案领跑者
GLOBAL LEADER IN LASER SOLUTIONS

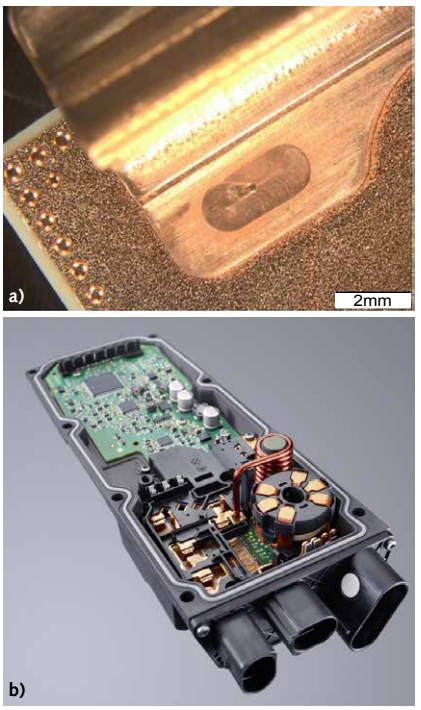
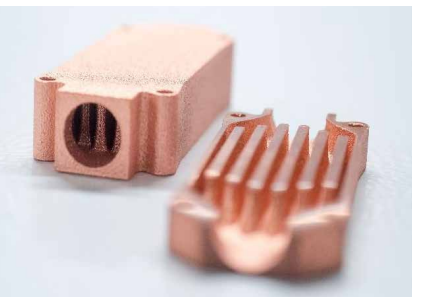


图5：在直接铜键合板上（a）和控制模块（b）上焊接铜触点。

要，因为报废成品零件非常昂贵（见图 5）。在直接铜键合（DCB）中，加工控制和热输入都至关重要。将铜触点焊接到与陶瓷结合的非常薄的铜层时，需要进行深度控制；完全熔透和过多的热量输入会损坏陶瓷，因此需要一致的热传导焊接。由于近红外光的吸收不同，因此很难产生部分穿透焊缝，并且生产的一致性是很大的问题，而这正是可见光擅长的领域。吸收非常一致，带来可重复的渗透深度，并且不会产生飞溅。

其他范例包括电路板、控制电路和配电 / 充电组件；同样，加工控制和热量输入很重要，但在这些应用中消除飞溅至关重要。一个小的飞溅球可能会导致产品发生灾难性的短路，从而损坏零件甚至对附近的人员造成危险。



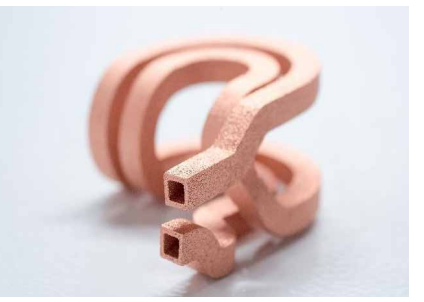


图6：用绿光激光3D打印的铜部件。

应用增长

令人兴奋的 3D 打印新兴市场是铜的激光金属沉积（LMD）和激光金属熔合（LMF）（见图 6）。3D 打印不是快速的过程，大部分关注点还是在原型零件上，可用于打印无法以任何其他方式构建的配置、打印具有非凡强度和惊人的轻重量的高端零件，以及制造昂贵材料。由于工艺波动、重复性差和加工速度慢，在 3D 打印中用红外激光器加工铜并不理想。相比之下，使用绿光激光器，可以实现非常稳定和可重复的过程，实现低热输入和快速加工速度。

2021 年，通快推出了适用于绿光激光的 BrightLine Weld 双核技术。这项技术可以改善一些困难的加工，例如厚度大于 2mm 的铜的深熔焊和无飞溅焊接。

结论

随着电池技术的普及，汽车电气化程度不断提高，未来几年铜和铝的加工将走在前列。绿光激光器将成为这场加工革命的重要工具。铜的高吸收率（大于 40%），及其对不同表面条件的不敏感性，使绿光激光器成为工艺稳定性和制造灵活性的完美选择。这对于焊接电池箔、将箔焊接到母线、控制安装在陶瓷绝缘体上的铜的深度和热量等至关重要。在完成的电路上进行焊接时，低热输入、一致的熔深和无飞溅是关键，因为由于焊接飞溅造成的热损坏或电气短路，而不得不报废昂贵的零件，并不是一种明智的选择。随着新激光器的开发和工艺的改进，绿光激光器将在不断增长的电气化市场中发挥重要作用。❑

上接第24页

总结

随着电池市场在性能、价格和制造规模方面屡屡打破记录，电池生产商正在寻求为其焊接解决方案套件添加新工具和新功能，以应对生产速度和产品发展方面的新挑战。

虽然电池制造商面临的大多数制造挑战对激光加工来说并不陌生，但系统制造商面临的任务的规模和复杂性是独一无二的。激光光束整形已被证明是激光加工工程师工具箱中的宝贵工具。单个激光源中的光束整形和单模光束质量的创新组合，增加了加工灵活性，以控制小孔稳定性和焊接质量，同时保持焊接电池材料所需的高强度。随着电池价格的下降和产量的增加，电池应用和电动汽车市场的前景对激光行业来说尤其令人兴奋。❑

光束整形

用于电池焊接的激光束整形

本文对用于铜和铝电池应用的单模和环形光束焊接示例进行了比较。

文/ Tim Morris，Brian Victor

电池市场正接近临界点；当电池价格低于行业共识的100美元/千瓦时时，电动汽车（EV）将在购买价格上与内燃机汽车 (ICE) 相匹敌。乘用车市场是电池最大的应用市场，一直在推动电池技术和制造效率的进步。随着电动汽车和混合动力汽车销量的持续增长，性能和价格的提升正迫使其他电池市场加速发展。对于固定式电源市场，电池的进步为清洁能源存储和高峰调节提供了更有价值的解决方案。商用车市场的送货卡车和公共交通，以及个人出行的两轮交通工具，将在乘用车市场驱动下推动电池的能量密度、充电周期和可靠性的改进。EV和ICE之间的价格持平预计将在短短几年内实现。

激光集成商、系统制造商和热衷于激光行业的人士，都知道这个快速增长的电池市场，对激光行业来说是多么令人兴奋。市场对“电池封装效率、电池组能量密度的减重，以及更高生产量的更快循环时间”的需求日益增长，新的激光加工解决方案正在解决这些需求。医疗和航空航天领域的电池制造商，已经使用传统的脉冲YAG激光焊接、超声波焊接或电阻点焊来连接薄铜、铝、不锈钢和镍组件，但这些传统工艺的循环时间较慢，或者需要较大的焊片几何形状，因此不符合电动汽车的生产需求和重量限制。

在电动汽车市场，光纤激光器凭借卓越的加工价值（生产速度与运营成本），已经迅速超越了这些传统工艺。光纤激光器可用于切割阳极和阴极箔、焊接箔片、密封棱柱罐、组装电流中断装置、汇流电池成模块，以及将模块连接成结构包。随着电池封装效率要求的提高，单模光纤激光器正比多模激光器更受欢迎，因为它们具有更窄的焊缝尺寸、更低的热输入和更高的强度。

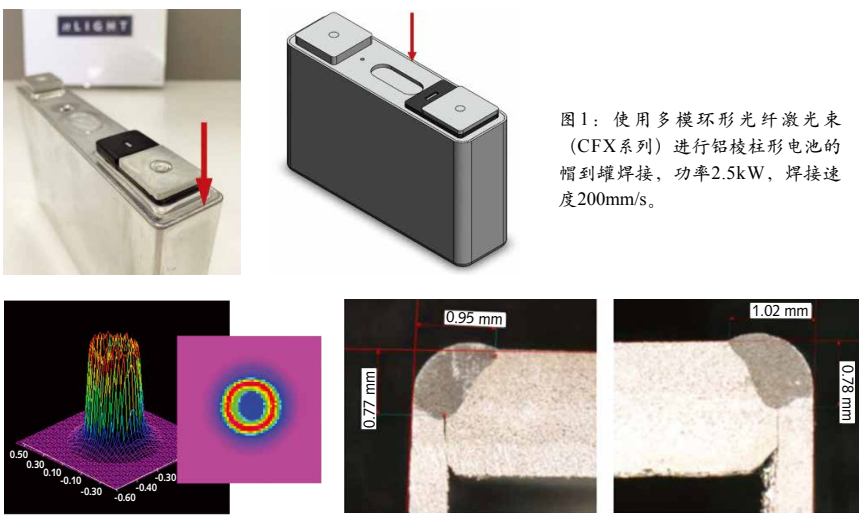


图1：使用多模环形光纤激光束（CFX系列）进行铝棱柱形电池的帽到罐焊接，功率2.5kW，焊接速度200mm/s。

激光焊接的挑战

与其他制造工艺一样，电池焊接仍然有几重挑战摆在制造商面前。不断变化的产品设计和供应链的改变会影响待焊接部件的质量和可重复性，从而导致部件间的显著差异。

在电池生产使用的金属中，铜和铝比钢、不锈钢和镍更难焊接。铜和铝都具有高导热性、低液体粘度和熔池中吸收气体的亲和力。要在铜和铝中进行熔焊，焊接过程必须非常快且热量输入低，以避免附近组件过热。为了避免焊缝飞溅和气孔，焊接过程也必须在高速下保持稳定。

对于结构连接，焊缝需要尽可能坚固，而不需要增加焊接过程的接头面积，因为这种额外的重量会降低能量密度。对于电气连接，焊接区域需要足够宽以提供电流承载能力，同时限制可能由大量熔体引起的变形。对于电气结构组合接头，焊接过程必须在产品设计的约束范围内进行，以达到最佳平衡。所有这些挑战，再加上

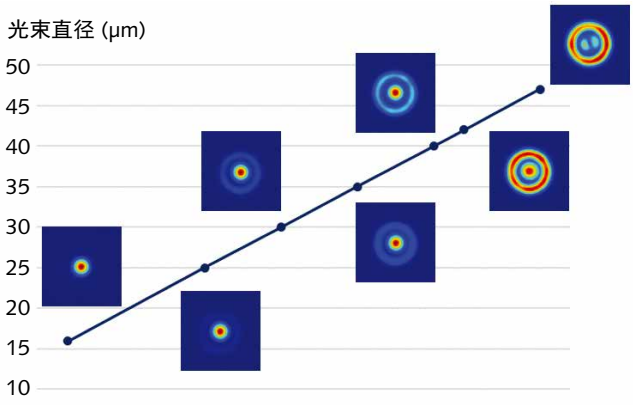


图2：AFX光纤激光器的光束形状范围从单模高斯光斑到40μm外径环。

极高的循环速度和质量要求，很可能导致激光焊接工程师的操作窗口非常狭窄。

电池加工工具箱的单模光束整形

单模光纤激光器已被证明是应对这些具有挑战性的焊接条件的有效解决方案。单模光束的小光斑尺寸和高功率密度，能够以非常高的速度进行深熔焊，几乎没有热输入，同时低形变。在小孔焊接过程中，单模光纤激光器提供的强度很容易压制铜和铝的反射率。从箔片连接和小型结构焊接到更厚的电极连接，单模光纤激光器已经确立了其作为多功能且有价值的电池加工工具的声誉。

近年来，随着光束整形光纤激光器的推出，电池集成商已经展示了环形光束在焊接较厚铝材方面的价值，例如棱柱形电池盖到罐（见图 1）、多电池模块母线、模块外壳、结构包框架和铝制 EV 车身焊接等。

美国恩耐公司最近将这种可调谐光束整形功能转移到单模光纤激光器中，将环形光纤激光器的优点与单模光束质量的强度相结合。该公司的 AFX 系列光纤激光器提供动态改变激光功率分布从单模光纤到 40μm 环形光纤的能力（见图 2）。这种可调谐性提供了激光源的多功能性，以完成电池材料的广泛焊接任务。

对于焊接铜，通过在小孔焊接模式下运行，最高强度的单模光束形状提供最深的熔深和最快的焊接速度。当使用小的单模光束实现高的铜焊接速度时，可以避免焊缝不连续，从而形成具有高纵横比的光滑窄焊缝（见图 3）。这种小光斑尺寸可实现小孔焊接，以实现最快的生产率。通常，电池焊接系统使用振镜扫描头进行远程焊接，以最大限度地控制光束形状。扫描头提供的灵活性可以实现快速直线速度，以及较慢速度下的光束振荡图样。光束的这

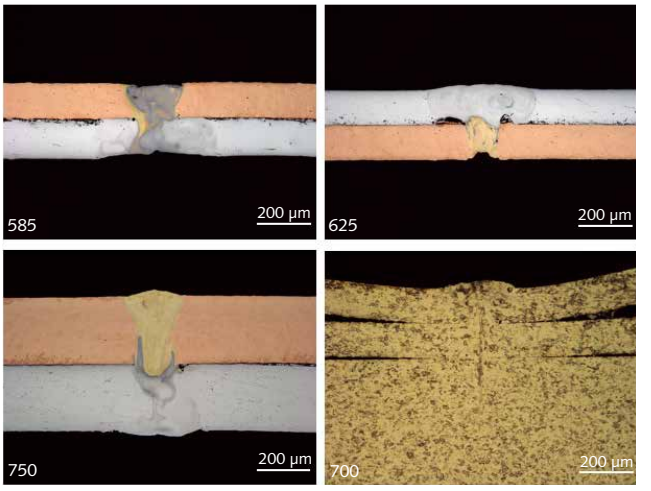


图3：图中展示了铜和铝焊片焊缝：585W，140mm/s，125μm铜在铝上；625W，255mm/s，125μm铝在铜上；750W，175mm/s，250μm铜在铝上；700W，140mm/s，两个125μm 铜集电片到铜电极。

种振荡、摆动或搅动，可以在不降低小孔局部速度的情况下增加焊接宽度，从而避免任何低速焊接不连续性。

对于铝焊接，较大的环形光斑形状有利于在加工过程中保持稳定的熔池和小孔。在直径比单模光束大 3 倍的情况下，该 1kW 的 40μm 环形光斑的强度仍然足够高，可以在铝中形成蒸汽腔，用于汇流条和箔片焊接等应用。这种功率密度和宽光束形状的结合产生了宽而光滑的焊接表面，几乎没有飞溅。通过将更多的能量转移到环上，小孔形状从狭窄的毛细管转变为宽底圆柱体，允许蒸汽和夹杂的气体在凝固之前逸出。此外，这种更宽的光束形状会产生更宽的焊缝，而不会出现在高斯光斑以低速焊接铝材时常见的熔深尖峰。

在焊接黑色金属、镍或异种合金组合时，中间光束形状提供了灵活性，可以改变强单模纤芯和为每种应用量身定制的宽环形光束之间的功率平衡。在高速情况下，大部分功率通常被引导到中心核心以实现最深的穿透。如果速度降低以产生更宽的焊缝，或由于机器加速和路径几何形状，更多的功率可以转移到环上。对于中间光束形状（见图 2），穿透功率由单模纤芯提供，环中的功率使小孔周围的金属蒸发，从而加宽了蒸汽腔的顶部开口。环功率的这一部分改变了小孔形状，使其相比狭窄的毛细管更呈锥形。这种更宽的小孔开口使工艺更稳定，飞溅物喷射和焊接表面波动更少。如果速度进一步降低，更多的功率会转移到环上，以防止小孔瞬间塌陷并进一步扩大小孔开口。AFX 单模光束整形光纤激光器提供的空间轮廓多功能性，使单个激光源能够实现广泛的加工应用。

下转第22页

玻璃焊接

使用超短脉冲激光器实现玻璃微焊接

高功率、高脉冲重复频率的皮秒激光，非常适合玻璃的微焊接。

文/Terence Hollister，Jim Bovatsek；MKS Instruments

自从激光器发明以来，制造商们一直在不断创新，创造各种独特的功能，以提高加工吞吐量和质量，增加产能，最终为各行各业的企业增长和利润提供支持。使用超短脉冲激光，一方面是为了在铣削硬质材料时降低贵重材料的消耗，或在太阳能电池板上刻上狭窄密集的划线以提高效率；另一方面则是利用超短脉冲激光与物质相互作用的独特优势，开发新应用。例如，对透明材料加工，特别是玻璃加工，利用超短脉冲（USP）激光的优势就特别明显。

USP 激光器已经在玻璃加工领域占据了重要地位，这在很大程度上是因为它们与材料的非线性相互作用。与更长的脉冲宽度或连续波（CW）激光相比，超短脉冲激光（将一定的激光能量限制在飞秒或者皮秒量级）与透明材料相互作用，会诱导自聚焦、多光子吸收等非线性现象，这一切都在透射性很强的无源材料中进行。当材料吸收激光能量时，一般会产生结构变化，而当脉冲作用时间很短时，产生的热效应很小，这会降低材料的熔化和裂纹的产生。在实际应用中，利用聚焦透镜来精确控制透明材料中发生非线性吸收和结构改变的位置。

在某些情况下，热效应对激光加工是有益的。而超短脉冲激光就可以实现热效应加工。将高重复频率（PRF）超短脉冲激光紧聚焦在玻璃中，引起热积累效应，在玻璃表面以下形成准球形可控局域熔化区。早期，超短脉冲激光的非线性吸收和高重频热效应，被用来在块状玻璃中制作光波导，这是由于玻璃的熔化 / 再凝固会导致材料密度发生变化，从而改变折射率。

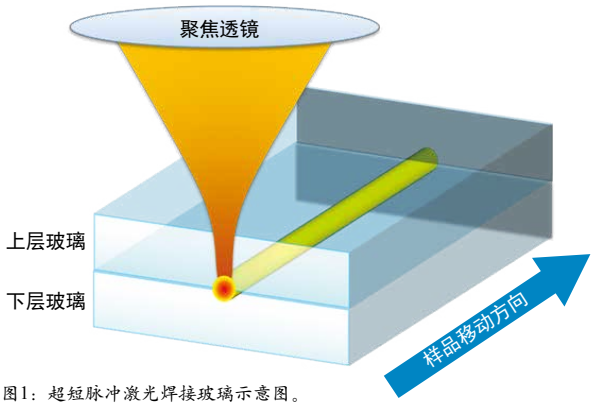


图1：超短脉冲激光焊接玻璃示意图。

研究还发现，如果将激光聚焦在两块玻璃的交界面，可以实现玻璃焊接。虽然早期的研究只使用飞秒激光焊接玻璃，但研究人员后来发现，高能量、高重频的皮秒激光，也同样可以用来焊接玻璃。图 1 展示了在激光穿透焊接玻璃工艺中，激光束聚焦点相对于两块玻璃的位置关系。

将玻璃与玻璃或者玻璃与金属等其他类型的材料粘合在一起，在消费电子、微流体（芯片实验室）、微光学组件及医疗设备包装等众多工业领域中，都有着广泛的应用。使用粘合剂粘合，通常存在固化时间长、老化和释气（outgassing）等问题。阳极键合等无粘合剂粘合技术，也存在一定的缺陷。对于阳极键合，可选材料比较有限，并且总体上容易受到长时间高温和电场的影响。

相比之下，激光可以实现高度局域化焊接，不需要在两种材料之间填充材料，并且可以在热敏性器件（电气、聚合物等）附近进行加工。考虑到这些优势，美国万机仪器（MKS Instruments）旗下的光谱物理公司

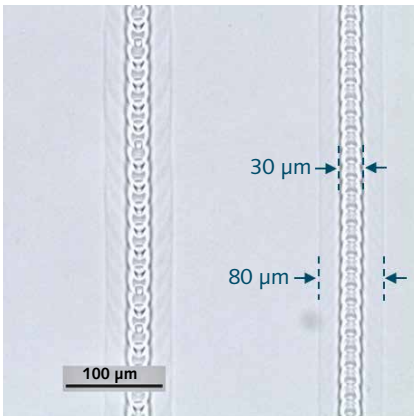


图2：玻璃焊接焊缝区俯视图。

（Spectra-Physics）的激光应用工程师，正着手测试一款工业级高功率红外皮秒激光器（IceFyre 1064-50），用于玻璃 - 玻璃和玻璃 - 铝板的穿透型微焊接。

众所周知，紧密聚焦光束与高重复频率的结合非常适合这样的工艺，因此研究人员在试验中自始至终使用具有短焦距非球面物镜（NA=0.5）的固定光学系统，以及重频在 MHz 范围的皮秒激光器。当然也可以用更高的数值孔径焊接，但数值孔径越高，工作距离就越短，焊接材料的厚度以及焊缝的深度就会受到限制。

玻璃-玻璃穿透型微焊接

在玻璃 - 玻璃焊接的情况下，将两块厚度为 1mm 的钠钙玻璃（通常用作显微镜载玻片）相互贴合，确保界面没有空气间隙或污染物。将两块钠钙玻璃放在 Newport 公司的 XY 二维精密运动平台上，将激光聚焦到两块玻璃的界面处，聚焦后的光斑直径（能量强度下降为中心强度的 $1/e^2$）约为 2μm。可调的参数包括：平均功率、激光重复频率和扫描速度等。以焊缝的连续性和玻璃破裂的最小化程度，来评价和优化焊接工艺。当平均功率为 5W、重复频率为 10MHz、样品平移速度为 25mm/s 时，可以获得最佳焊接效果。图 2 为玻璃焊接焊缝区的俯视图。

焊缝并不明显，肉眼几乎不可见。在显微镜下，我们可以看到一个比较清晰的中心改性区域，宽约为 30μm，以及中心区域分别向两侧延伸约 25μm 的模糊区域。在中心改性区域，可以看到周期性排列的熔池结构，相邻熔池间距约为 20μm，远远大于脉冲间隔（< 1um），这可以理解为激光在作用过程中产生的等离子体或熔化的瞬间，降低了光束的聚焦，从而减少材料的非线性吸收，阻止等离子体或熔化进一步产生，最终光束又回到理想聚焦状态。这个过程在激光的运动路径上反复出现，因此形成了上述周期性的熔池结构。中心区域的外侧延伸区没有出现这种周期性的调制结构，这表明在整个激光焊接过程中，保持了相对稳定的热平衡。

将焊接的样品沿着焊缝切开、抛光，可以看到玻璃内部焊接区域的更多细节（见图 3）。

从焊缝的截面图可以看出，熔接线呈长条水滴状，与现有文献一致。每条熔接线中心及外部强弱不同的激光改性区域，都是光滑的，没有裂缝。此外，相邻两条熔接线之间有明确的边界。由图 3 还可以看出，玻璃沿着熔接线熔化，熔化区域贯穿两块玻璃的交界面，没有明显中断。

玻璃-玻璃的微型点焊

在某些制造工艺中，点焊会比连续线焊更有优势。为了开发这样的工艺，研究人员没有在交界面处进行试验，而是在单个大块玻璃板中进行了试验，即为代表光学接触的玻璃之间的焊接行为。对于静止的焊接特征，研究人员对激光参数进行了重新优化，相比连续线焊接，激光功率和重频值更低就可以获得最佳焊接效果。最佳焊接功率为 1~2.5W，最佳重复频率为 1MHz。在这些参数作用下，形成了高度对称的熔融区域，其直径大小取决于平均功率和脉冲数。图 4 为平均功率 1W 的条件下，熔融区直径与脉冲数的关系图，以及在 125000 个脉冲作用下（这相当于重频为 1MHz 时，脉冲作用时间为 125ms），平均功率分别为 1W、1.5W、2W 以及 2.5W 时对应的熔融区直径。

由图 4 的实验数据可知，平均功率为 1W 以及作用脉冲数为 125,000 的条件下，熔融区的直径品质良好；而

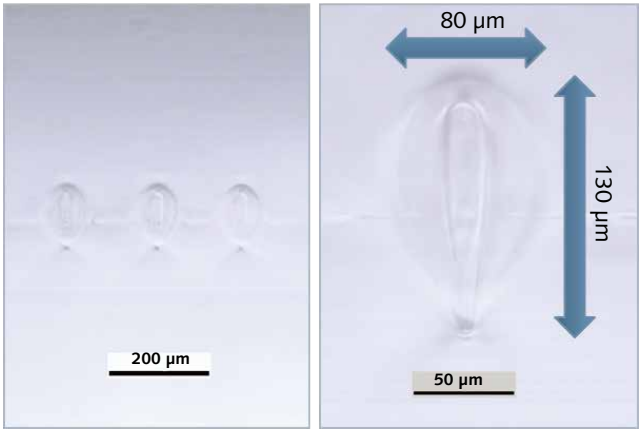


图3：相同玻璃间的焊接，左图显示了相邻熔接线的间距约为200μm；右图是单个熔接线的放大图。

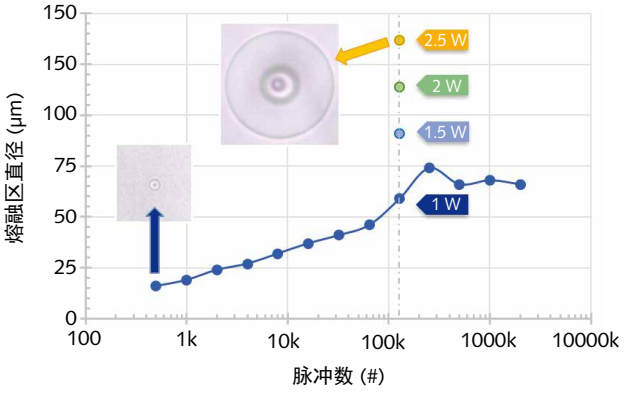


图4：熔融区的直径随脉冲数和平均功率的增加而增大；从熔融区的显微图可以看出，无论直径大小，熔融区都保持较好的均一性。

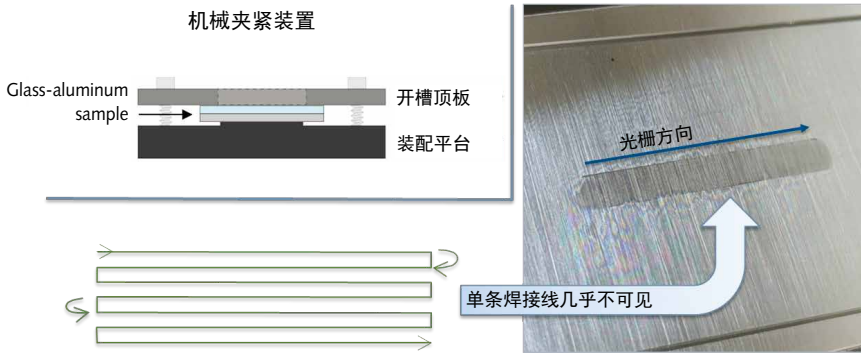


图5：夹紧装置和光栅式扫描焊接示意图，以及焊接样品图。

在此数据范围外，熔融区直径的变化不太稳定。可以通过增加平均功率来增大熔融区直径，功率每增加 0.5W，直径就增加约 25μm。这种可控的加工方法，反映了作用机理的准确性以及激光性能的稳定性。图 4 的两个显微光学图，为本实验中产生的熔融区直径的极小值和极大值，分别为 16μm 和 140μm。观察可知，无论直径大小，激光作用的熔融区较平滑，整体加工质量良好。

玻璃-金属的穿透型微焊接

玻璃与金属的激光微焊接工艺，对移动设备制造等行业非常有价值。设备的小型化及美观化已经成为一种趋势，这对消费者和制造商具有极大的吸引力。这就要求设备去除粘合剂、机械紧固件等结构，激光焊接可以解决上述问题。在这种市场需求的促使下，本实验研究了玻璃与铝片的激光焊接工艺。为了让玻璃和铝片实现光学贴合，需要使用一个机械夹具将玻璃和铝片紧紧夹住，在激光作用时实现密切接触。除此之外，玻璃 - 金属激光焊接系统与玻璃 - 玻璃的焊接系统相同。

结果表明，玻璃 - 铝片焊接与纯玻璃焊接工艺参数有显著差异。激光聚焦在铝表面，发生强烈地线性吸收，最佳焊接功率较低，约为 0.6W。激光扫描速度与玻璃 - 玻璃焊接速度同为 25mm/s 时，需要的激光重复频率也大幅降低，约为 800kHz。为了确保焊接效果，采用光栅扫描模式焊接，线间距为 50μm，整个焊接区域长 20mm，宽 3.5mm。图 5 展示了夹紧装置和光栅扫描焊接示意图，以及焊接样品图。

由图 5 可见，虽然焊接区有明显的暗化，但是铝的特征抛光纹理还是能明显看到。重要的是，单独的焊缝轨迹几乎不可见，整个焊接区是一个均匀的粘合区域，没有裂纹。

通过玻璃 - 铝片的焊接截面（见图 6）可以看到更多细节：山脊状的铝进入了玻璃；两种材料之间没有间隙；在交界面非焊接区没有出现熔融材料相互渗透的迹象。

以上微焊接实验，没有测试焊缝强度。但是，通过强力分离焊接板，可以看到大块的玻璃从铝板上脱落，剩下部分熔融进铝板，这表明了玻璃与铝片之间有很强的粘结，焊接强度优异。

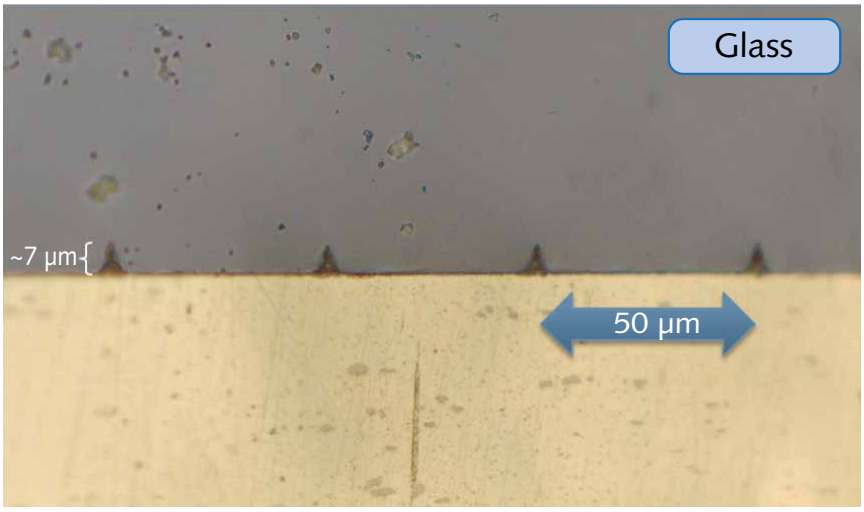


图6：玻璃-铝片焊接截面显微图：熔融铝嵌入玻璃板中，焊接区没有开裂及材料分离现象。

总结与展望

在改进和实现工业加工方面，激光器不断带来惊喜。USP 激光器尤其如此，这得益于它们的超高强度和非线性效应。随着玻璃等透明材料的加工在工业制造中不断增长，超短脉冲激光在工业应用中将发挥越来越重要的地位。本文使用万机仪器旗下 Spectra-Physics 公司的高重频皮秒激光器（IceFyre），研究了玻璃 - 玻璃和玻璃 - 铝片的激光微焊接工艺。结果表明，高功率、高重频皮秒激光能够实现较好的玻璃焊接效果。由于激光玻璃焊接过程简单、灵活、易控制，未来将会催生更多应用。❑

增材制造

光子技术是增材制造的基础

从微精密医疗器件到大型承重件的制造，增材制造技术正应用于各行各业。

文/Robert V. Chimenti，RVC Photonics LLC

增材制造技术，又称为 3D 打印，已经在改变着制造业的生产方式。增材制造技术不仅能制造微精密医疗器件，也能制造大型承重件。传统的减材加工是通过从基材上去除材料的方式来生产出最终产品；与之截然不同的是，增材制造则是通过逐层沉积的方法来制造 3D 产品。

因此，与减材制造相比，增材制造可以减少材料浪费，不需要特定的生产工具，并且生产的产品其内部构造可以更加复杂。随着增材制造技术的迅猛发展，目前一些公司正在开发用 3D 打印技术实现引擎和火箭的生产。据 Relativity Space 公司的官网报道，该公司目前正在“开发首个自主火箭工厂和卫星发射服务”。

除了在工程和生产方面的优势，增材制造也是一种可持续发展的制造方式。与减材制造相比，增材制造技术作为一种可持续发展的制造方式，一方面是由于其能减少浪费，另一方面是利用可持续发展的光敏树脂作为 3D 打印材料（见图 1）。减少浪费、可持续材料的应用以及打印复杂几何结构的能力，使得 3D 打印成为了先进制造业的新标准。

当然，我们也不能低估了光子学在增材制造中的重要性。先进的增材制造系统不仅包括激光、LED 和其他光源用于材料的熔化和固化，而且也包括光谱传感器。这些传感器可以直接集成到激光打印头中，主动监测 3D 打印过程，或用于打印产品检查。

为了说明光子学是如何与现代 3D 打印技术交织在一起的，我们将从宏观角度来比较各种打印技术，以便更深入地了解光子学如何应用于先进的增材制造中。

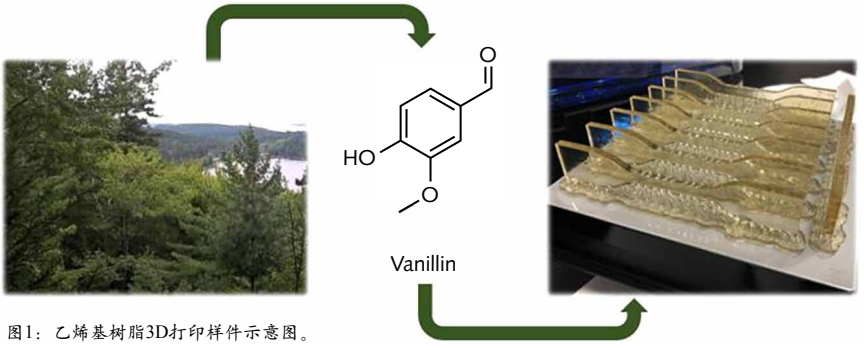


图1：乙烯基树脂3D打印样件示意图。

3D 打印的种类特别多，不能一一列举，本文主要关注两种 3D 打印技术：直接金属沉积和光聚合。此外，我们还将简要介绍一种新型的打印方法——双光子聚合，这种打印技术的分辨率可以达到亚微米量级。

直接金属沉积

直接金属沉积 3D 打印技术，又称为激光增材制造，多年来，我们对其进行了深入研究。虽然“直接金属沉积”和“激光增材制造”这两个术语可以互换使用，但随着基于激光的增材制造类型越来越多，通用的分类术语已经不太适用。

“直接金属沉积”其实也是一个涵盖范围很广的术语，它包括各种不同的技术，其中使用最广泛的是激光粉末床熔融和定向能量沉积技术。这两种 3D 打印技术都使用高功率二氧化碳或光纤激光器逐层熔化金属粉末。

这两种打印技术的主要区别在于：定向能量沉积技术是将激光聚焦于固定位置，并以合适的角度设置粉末射流与激光焦点相交（见图 2）。材料基板放置在 X-Y-Z 平移台上，在制造过程中在激光下方扫描。

相比之下，在激光粉末床熔融技术中，整个平台均匀地覆盖着一层薄薄的粉末。激光通过振镜和 F-Theta 透镜在粉床上逐层扫描，粉末随着激光的移动而熔化。平台也随之逐层下移，以上过程循环往复，直到构件最终打印完成。

迄今为止，定向能量沉积技术是

直接金属沉积增材制造的主要方法，因为这种技术具有高产率、低浪费和打印更大体积构件的能力。然而，值得注意的是，激光粉末床熔融技术仍然用于高精度打印，因为与粉末喷射相比，粉末床中的粉层高度可以更好地控制。

此外，定向能量沉积打印头固定的几何形状，以及打印过程中产生的极端温度，非常适合通过光学发射光谱（OSE）进行在线监测。

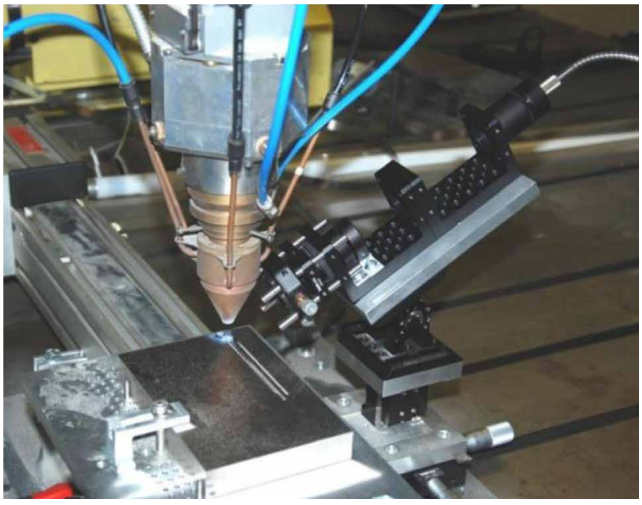


图2：集成到定向能量沉积打印头中的光纤及光学元件图。

图 2 为定向能量沉积打印头实物图。从图中可以看出，该打印头使用与激光光轴成 60° 角的光纤收集发射光。该打印头由比利时布鲁塞尔大学研发，使用 Avantes 的光谱仪（Avaspec-3648-USB2）监测熔池的色温。

激光定向能量沉积打印头这种相对简单的设计，为用户提供了一种非接触式控制系统，以防止基板中的过度热传递，减少材料应力和缺陷。此外，宾夕法尼亚州立大学和密歇根大学的研究人员，也开发了具有类似光学几何形状的打印头来监测原子发射谱，以实现实时材料表征和缺陷检测。

光聚合

光聚合依靠光化学反应，将粘性液体单体转化为固体聚合物。由于光聚合是一种光化学反应，对光功率要求低，因此可以使用半导体激光器、LED 或其他高亮度 UV 光源集成到台式化的打印系统中。光聚合反应中最重要的参数是波长，波长需要足够短，以提供足够的光子能量来引发聚合反应。

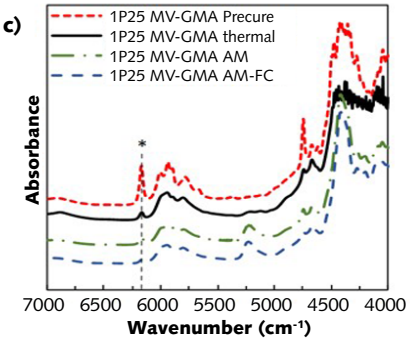
简单理解，可以将光聚合类比为倒置的激光粉末床熔融技术。所不同的是，激光粉末床熔融技术是将打印好的部分不断下移，并持续在上层铺粉。而在光聚合打印中，随着光聚合反应的进行，已发生光聚合反应的部分随着平台从树脂槽中拉出，最终“挤出”完整的打印构件。因此，z 轴的打印分辨率几乎完全取决于打印平台的步进电机分辨率。通常 z 轴的打印分辨率是可调的，让用户可以优化参数，以实现打印速度和打印分辨率的平衡。

目前有两种主要类型的光聚合 3D 打印系统，分别为立体光刻（SLA）系统和数字光处理（DLP）打印系统。这两种打印系统都使用底部照明的树脂槽，但照明设计截然不同。SLA 打印系统将液体光树脂夹在打印平台和树脂槽底部之间，激光聚焦在光敏树脂层上进行光栅式扫描，这也类似于倒置的粉末床打印系统。

而 DLP 打印系统，不需要激光光栅式扫描，而是使用投射在树脂槽底部的发散光源和 MEMS 反射镜阵列，形成数字化的光源图像，直接照射在光敏树脂上引起树脂固化。与 SLA 打印系统相比，DLP 系统打印速度更快，但是打印







Sample	Extent of cure (%)
1P25 MV-GMA thermal	81 ± 1
1P25 MV-GMA AM	69 ± 1
1P25 MV-GMA AM-FC	88 ± 2

图3：（a）Formlabs公司Form 2 SLA 3D打印机实体图；（b）使用乙烯基树脂3D打印的猫头鹰；（c）乙烯基树脂在不同固化条件下的近红外光谱图。

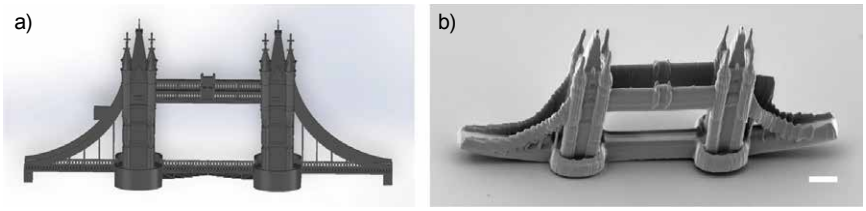


图4：（a）微型伦敦桥的CAD模型；（b）双光子聚合打印的伦敦桥SEM图像（标尺：10μm）。

的体积受限于投影图像的大小。

SLA 系统的打印分辨率与 405nm 激光的聚焦光斑尺寸相关，而 DLP 系统的打印分辨率由投影光的最小像素决定，但两种技术的 X-Y 平面打印分辨率，都能达到 25~100μm。最显著的区别是这两种方法打印的表面光洁度不同。由于 DLP 投影系统是在树脂上投影 2D 像素化的图像，因此会形成 3D 像素化表面，在图形设计中通常称为立体像素，因此在小型或非常精密的打印件上会看到块状或阶梯状表面。

罗文大学的 Joseph Stanzione 和他的研究团队使用 Formlabs 公司开发的 Form 2 SLA 3D 打印机，验证了生物基光敏树脂用于 3D 打印的可行性（见图 3）。这款打印机的光源是功率为 250mW 、波长为 405nm 的激光器。研究团队使用近红外光谱（Nicolet iS50 FT-IR，Thermo Fisher Scientific）来监测不同条件下的固化速率。红外光谱中，光敏树脂光固化之前特征峰为 5900cm^{-1}，光固化后会出现特征峰 6165cm^{-1}，对比两个峰值强度就可以对光敏树脂的固化程度进行定量表征。

将预固化树脂（1P2S MV-GMA 预固化）和热固化树脂（1P2S MV-GMA 热敏）的光谱与 3D 打印的部件（1P2S MV-GMA AM）和固化后的 3D 打印部件（1P2S MV-GMA AM-FC）的光谱进行比较后，发现打印件在 405nm 激光辐照和 80 ℃ 条件下，固化两小时后，达到最佳固化效果（88%±1%）。以上测试是用傅立叶变换干涉仪非在线测试完成的，也可以使用反射式近红外光谱仪集成到打印头实现在线监测，如图 2 所示的 OES 监测系统。

双光子聚合

双光子聚合是一种新型的增材制造工艺。基于 400nm 光源实现光敏树脂光固化的事实，因此，利用钛宝石或锁模光纤激光器产生的近红外超快激光，聚焦在光敏树脂内部，超快激光的非线性效应使树脂产生双光子吸收，实现光固化。

尽管双光子聚合技术还不够成熟，但斯图加特大学的一个研究团队近期研发了一台总占地面积小于 $100\times100\times300\mu m^3$ 的超小型 3D 打印系统，将最小化提升到了一个全新的水平，引起了光子学界的高度关注。

2019 年，香港中文大学的一个研究团队成功地将双光子聚合与基于 MEMS 的数字微反射镜系统集成在一起，研发了一种包含多重衍射极限的激光聚焦 3D 打印系统。该系统能够以 22.7kHz 的惊人速度，打印出分辨率约 500nm 的物体。

据开发者说，这是迄今为止在不影响分辨率的情况下，最快的打印速度。这台打印系统在精确控制焦点位置（~100nm）和激光能量（即灰度控制）方面具有独特的优势，从而能够设计和打印复杂的 3D 光子结构、拓扑优化的机械设备以及许多其他难以通过传统光栅扫描系统制造的结构（如悬垂结构），对纳米制造领域具有重大影响。

图 4 展示了双光子聚合 3D 打印的强大功能。将伦敦桥的 CAD 模型与 3D 打印件的扫描电子显微镜（SEM）图像进行了比较。 3D 打印部件的总尺寸仅为 $120\times14\times60\mu m^3$。

展望未来

当行业专家被问及对增材制造未来的看法时，Xerox 首席技术官 Naresh Shanker 总结说：“未来十年，3D 打印将与传统制造完全融合——增材制造将渗透到更多的生产线，更快、更强大的 3D 打印技术可以打印更加均匀、高质量的构件，进一步推动 3D 打印大规模生产。3D 打印技术将与传统的铸造和注塑等技术相媲美。”

3D 打印作为一种可持续发展的生产方式，成本低、可扩展设计能力强，因此 Shanker 的预测终有一天将会实现。同时，在未来许多年内，光子学也将毫无疑问地继续成为改进增材制造技术的一个关键因素。❑

参考文献

1. A. W. Bassett et al., ACS Sustain. Chem. Eng., 8, 14, 5626–5635 (2020).
2. G. Overton, “Laser additive manufacturing gains strength,” Laser Focus World (Jun. 2009); https://bit.ly/LFW-AdditiveRef2.
3. G. Overton, “How does additive manufacturing ‘stack up’ against subtractive methods?” Laser Focus World (Feb. 2014); https://bit.ly/LFWAdditiveRef3.
4. D. De Baere et al., J. Laser Appl., 28, 2, 022303 (2016).
5. A. R. Nassar, T. J. Spurgeon, and E. W. Reutzel, Proc. SFF 2014, 278–287 (Aug. 2014).

激光切割

功率越高，效率就越高吗？揭秘高功率光纤激光切割的真相

提高激光切割机的功率并不一定能提高生产效率，是否应该购买高功率激光源，应该根据具体情况单独分析。

文/Przemyslaw Kimla

人们都想用激光切割机来赚钱，这一点是显而易见的。很多人认为，增加激光器的功率会增加它们带来的收入——有时候的确是这样，但有时候却并非如此。如果我们考虑增加功率将如何影响收入的话，那么我们应该详细讨论这个问题。当功率范围相当低时，任何功率的增加都直接体现在整体效率上。随着功率的增加，切割速度也会随之成比例增加；但是当零件很小的时候，并不一定能将激光功率可能实现的切割速度得到充分的利用。

在小零件上增加功率不再有效，所以在切割薄板和小细节时，增加功率没有任何意义。所有这些考虑都适用于在氮气中进行切割；在被切割的材料达到一定厚度后，必须过渡到用氧气切割。然而，当用氧气切割时，切割速度要低得多，而且这个速度也不随功率的增加而增加。这意味着，增加功率只对中等厚度的板材有意义。例如，当功率为 6kW 时，在氮气中切割的最大厚度为 6mm，厚度超过这个值后，应该启用氧气切割，这时候的切割速度会更低，因此也降低了整体效率。 当功率增加到 8kW 时，在氮气中切割的最大厚度为 8mm；10kW 能切割的最大厚度为 10mm；12kW 能切割的最大厚度为 12mm。

高激光功率只有在切割中等厚度的材料时才有意义。对于薄板而言，不能使用高功率切割，因为受到机器动力方面的限制；而对于厚板，切割速度会受到氧气切割技术的限制。因此，如果一项切割任务中大部分是厚度为 8mm 的金属板，则应使用功率至少为 8kW 的激光器；如果厚度是 12mm，则应使用功率为 12kW 的激光器，依此类推。

上述依赖关系表明，进一步提高功率，比如增加到 15kW 或 20kW，应该几乎完全排除在氧气中切割厚板的情况。实验室的研究已经证实了这一点，但是工业界是否已经准备好使用如此高的功率了呢？



图1：只有动态数控系统和磁性线性驱动器才能利用如此高的功率。

使用高功率切割的挑战

近年来，光纤激光源的快速发展导致市场上已经出现了 20kW 甚至 30kW 的高功率产品。然而，事实证明，将这些高功率激光器应用到切割设备中，并不那么简单。提供极高的功率在广告宣传中看起来很棒，但是其高昂的购买成本，真的能得到回报吗？

最大的问题是切割头的能量吸收和损失，这会导致光学元件过热。激光功率越高，热效应就越有害。

为了使切割过程正常运行，必须对该过程的许多参数进行控制。其中之一是焦点的高度，它必须针对每种类型和厚度的切割材料，进行准确地预先设定。

由于切割头中光学元件所使用的玻璃的光学特性，焦点的位置会随着其温度的增加而改变，这会使切割过程受

到影响——这种效应被称为焦点偏移。焦点偏移很难控制，因为镜片在切割开始时是冷的，但随着时间的推移，它们会升温，焦点会随之发生偏移，进而导致切割质量下降甚至停止切割。焦点偏移带来的影响与激光功率成正比。在功率不超过 6kW 的情况下，这种影响可以忽略不计；但是在更高的功率下，焦点偏移就会变成一个非常明显的问题。

使用带有低吸收抗反射涂层的特殊非球面透镜，能在一定程度上缓解一部分焦点偏移问题；但是吸收和过热的问题会随着时间的推移而增加，因为在高功率下工作时，光学元件会迅速退化，功率越高，退化速度越快。此外，在安装或更换保护玻璃时，可能会有看不见的杂质进入到切割头中，这也会对光学元件造成损坏。激光功率越高，由于操作错误或不当操作引起严重故障的风险就越大。

在低功率下，一个光学元件的损坏并不会损坏邻近的元件。但是，在高功率下，光学元件的破坏速度会非常快，以至于可能引发连锁反应，在操作者还没来得及反应的情况下，就已经破坏了激光头中的所有部分，包括光纤。

上述现象意味着，许多公司决定购买具有非常高功率的激光器，希望能借此大幅提高效率，但是他们却无法充分利用这么高的功率。

事实证明，光学元件过热和频繁的故障，会产生巨大的成本和长时间停机。这类激光器的用户往往出于迫不得已，只能把激光器的功率降低到激光器能稳定工作的水平。通常，最后实际使用的功率，甚至只有他们所支付的功率的一半。

还应该记住，虽然功率翻倍时线性切割速度可以达到两倍，但这并不能转化为总生产效率的翻倍。

除了由于板材的厚度限制了高功率下的产能外，如前所述，提高功率并不能线性地增加一个班次中生产的零件数量。毕竟，提高激光功率并不能缩短零件之间的快速移动、缩短更换托盘或准备活动的时间，也不能缩短操作人员的午休时间。

如果选择的是 15kW 而不是 6kW 的激光器，激光器的价格可能会高一倍。然而，考虑到整个材料厚度范围，按切割出的元件数量计算，整套机器的平均生产效率只会增加 30% 左右。

因此，事实证明，用同样的金额购买两台 6kW 激光器，生产效率可提高 100%。还应该记住，如果用两台激光器，在停机的情况下，另外一台激光器可以继续切割，确保生产的连续性。



图2：Kimla的Lens-Care切割头监控系统，能监测切割头内的所有光学元件，并能不断地调整焦点位置。

总而言之，提供非常高的激光功率确实会引起人们的兴奋和“惊叹”效应。然而，这并不能直接转化为预期的结果，就像一辆 1000 马力的汽车不会比一辆 100 马力的汽车更快地穿过一座城市。

解决方案

在 Kimla 公司，我们已经分析了哪些因素会限制光纤激光器的效率。结果发现，对于较薄的板材，效率的最大限制不是激光源的功率，而是机器运动的动态。事实也证明，许多激光制造商使用的控制系统主要是为铣床和车床设计的，由于在复杂的形状上需要减速，因此速度太慢，浪费了光纤激光器的潜力。

Kimla 公司开发了一种带有动态矢量分析功能的无误差定位激光控制系统，它具有独特的功能，甚至可以在薄板上使用非常高的功率。这是一个基于磁性线性驱动的突破性解决方案，允许用户实现极高的工作动态，即使是在形状复杂的小零件上也是如此（见图 1）。有了这种解决方案，一台 Kimla 激光器可以取代几台其他的激光切割机。

通过使用创新的 Lens Care 切割头监控系统，解决了与高功率激光光学元件有关的限制，该系统能不断地控制所有光学元件的温度，并根据这些测量结果，修正焦点位置，解决焦点偏移的问题（见图 2）。它还可以持续监测光学元件的状况，并在出现异常情况时自动关闭激光器，防止出现严重故障。

尽管如此，购买功率非常大的激光器的合理性，始终应该进行单独分析。因为在许多情况下可能会发现：高功率会大大增加购买和使用成本，而不一定能提高生产效率。❑

雷达用激光器

1550nm 激光二极管在汽车激光雷达中表现出色

激光雷达系统的进步，使自动驾驶汽车离我们越来越近。激光雷达系统有潜力在任何光线和道路条件下，识别车辆、行人和其他物体。

文/Daniel Chu，Sidi Aboujja，David Bean

激光成像、探测和测距（lidar；也被称为 LiDAR）是将自动驾驶汽车的概念变为现实的关键系统之一。它有望在白天和夜晚都能探测并识别汽车和行人等物体，无论是在城市街道还是在高速公路上。要在车辆上成功地部署激光雷达系统，最严格的要求是：当车辆以 75 英里 / 小时（约 120 公里 / 小时）的典型速度行驶在高速公路上时，激光雷达系统能够成功地探测 200 米或更远的范围。只有当激光雷达在各种天气条件下都能实现如此长的探测距离时，车辆才能根据任何潜在的障碍物作出反应和相应的操控，而不至于危及周围的其他车辆和人员（见图 1）。

然而不幸的是，市场上大多数激光雷达系统都需要许多激光发射器和复杂的系统设计，来探测 200 米以外的目标，因为使用短波长（如 905nm）激光器，单个激光发射器很难达到 100 米以上的探测距离。事实上，采用 905nm 激光器的初衷并不是因为其性能，而是源于其商业可用性和较低的成本。这种不良性能背后还有一个主要原因：国际眼睛安全标准 IEC 60825-1[1] 限制了激光器被允许的输出能量，该能量不能对人眼有潜在的不利影响。当增加 905nm 激光器的能量来扩大激光雷达的探测范围时，不安全的光子可以穿过人眼的晶状体和角膜到达视网膜，对人眼造成永久性伤害。

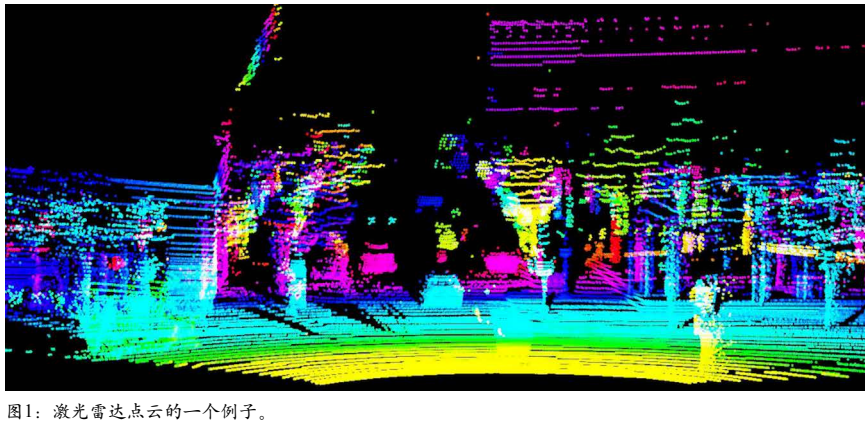


图1：激光雷达点云的一个例子。

激光雷达界已经充分注意到，更长的波长（如 1550nm）是激光雷达光源的最佳选择，因为它们处于人眼安全（>1300nm）的光谱区域。1300nm 以上的波长被认为本质上是对人眼安全的，因为这些波长的光能在很大程度上被晶状体和角膜吸收，并以热量的形式无害地消散，不会对人眼造成损害。[1] 一些激光雷达系统使用 1550nm 的光纤激光器来实现长距离探测，但由于其高昂的成本和复杂性，导致它们在商业上并不可行。

这里，我们展示了一个新开发的高功率半导体激光二极管，其三结（triple-junction）输出为对人眼安全的 1550nm 波长（见图 2）。相比于 905nm 激光器，这种 1550nm 激光器每秒可以产生 50 倍以上的光子，并能实现 3 倍远的探测距离。1550nm 二极管激光器的这一突破，使激光雷达行业超越了 905nm 单一发射器 100 米的探测距离，开辟了更多长距离的探测应用。

下文的分析比较了 1550nm 激光器和 905nm 激光器在人眼安全等级、允许的光子数量、探测范围内的光子预算、目标反射率以及大气介质等

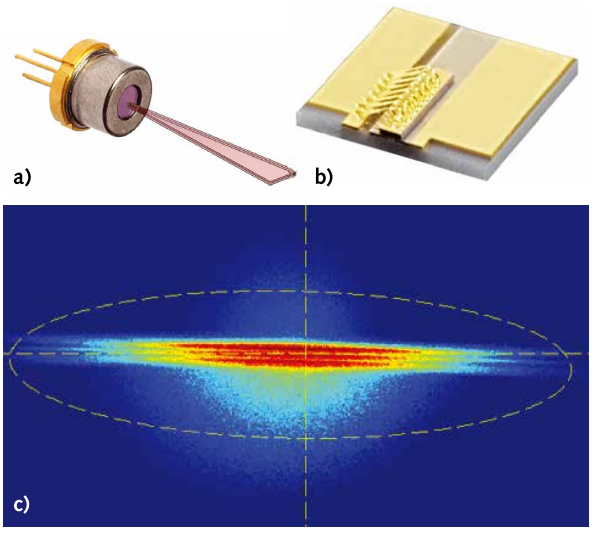


图2：1550nm三结激光二极管（a和b）和其近场图像（c）。

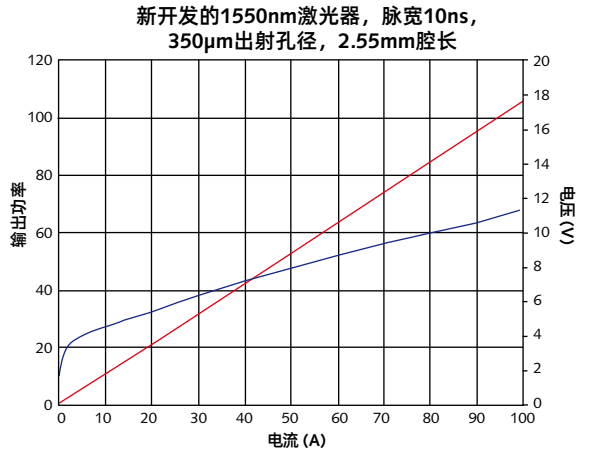


图3：新开发的1550nm激光器的10ns脉冲的性能数据图。

方面的情况。在确定接收器的性能和假定的系统参数的情况下，单发射器激光雷达系统根据信噪比（SNR）和检测 P_D 的概率进行了基准测试。测试结果显示：该 1550nm 激光器在 200 米以上的探测性能，轻松超过了 905nm 激光器。

905nm和1550nm的人眼安全水平

在使用单一发射器和飞行时间（ToF）方法的激光雷达系统中，准直的激光脉冲从出射窗口发射出来，在视场（FOV）内的目标空间中扫描，并被车辆前方的物体反射。然后，信号光子被收集，并通过接收器电路转换成电信号，形成点云数据。出射孔径处允许的激光脉冲能量是第一个关键参数，它可以决定可用的信号光子数量和随后的系统性能。

根据 IEC 60825-1 一级激光器的人眼安全标准，激光器出射孔径允许的光子能量的确定，要综合考虑激光脉冲宽度、重复频率、光圈直径、束腰和准直角度等参数。根据我们的估计，一个典型的 905nm 激光二极管，通过 200μm 的出射孔径能够达到 90W 的峰值光功率，在 100kHz 的重复频率下，允许的最大脉冲能量被限制在 3ns 脉冲的 92nJ。这个最大能量是在所有光子进入直径 8mm 的人眼瞳孔的假设下确定的。由于 1550nm 激光在本质上对人眼是安全的，因此在理论上，允许的脉冲能量可以是 400kHz 的重复频率下 10ns 脉冲的 29μJ，这比 905nm 激光器允许的能量高 300 倍。

在实践中，新开发的具有 350μm 发射孔径的 1550nm 激光二极管，能够在 10ns 脉冲宽度上提供 110W 的峰值功率（见图 3），能够产生 1.1μJ 的允许能量，这比 905nm 激光器允许的能量高 12 倍。由于重复频率高出 4 倍，光子能量较低，在 1 秒的时间跨度内，1550nm 脉冲将能产生比 905nm 多 80 倍的光子。

按距离、目标反射率和大气损耗计算的光子预算

为了评估激光雷达系统的性能，我们需要检查在接收器收集光子之前，影响光子数量的各种参数。下面的公式用于计算沿光路离开激光雷达的整体信号光子：

$$Ps(R) = Po\,\rho\,\frac{A}{\pi R^2}\,\eta\,exp\,(-2\gamma R)$$

这里，R 是距离，ρ 是目标反射率，γ 是大气消光系数，A 是接收器孔径，η 为接收器光学系统效率。[2]

从公式中可以看出，信号会因为接收器孔径与飞行距离的平方的比值的减小而急剧衰减。信号光子也会被目标表面吸收、散射或反射，返回的光子被光电接收器孔径收集。激光束在空气中的传输率由 exp（-2γR）来计算。系数 γ 根据发射波长和气象视觉范围而变化，可以用以下公式表示：

$$\gamma(\lambda) \approx \frac{3.91}{R_v}\left(\frac{550}{\lambda}\right)^q$$

其中，Rv 是能见度范围；λ 是波长；当能见度小于 6 公里时，q 按 $q = 0.585\,R_v^{1/3}$ 计算，超过 6 公里时按 1.3 计算。

利用这个公式可以发现，当能见度超过 20 公里时，200 米距离上的传输信号可以收集到 98%；而当能见度小于 2 公里时，只能收集到 50%。

在研究光子预算时，由于长距离、低目标反射率和大气介质损耗导致的光子损耗迅速增加，这时候可能会发现激光雷达的可用光子已经被消耗光了。实验对比了在 200 米距离、10% 的目标反射率、20 公里能见度和接收器前 85% 的传输率的光学系

统下，1550nm 和 905nm 波长的光子计数。结果显示，与 905nm 相比，1550nm 波长的可用光子多出了 83 倍；因此，使用 905nm 的激光雷达在 200 米范围内探测是黑暗无效的，但使用 1550nm 激光二极管，可以实现一个明亮的激光雷达，能有效地测量整个 200 米的范围。

信噪比和探测P_D的概率

为了评估激光雷达的性能，我们估计了整个系统的信号和噪声；探测概率是由信噪比（SNR）决定的。信号电流 is 是根据光子功率 Ps 计算出来的，计算公式如下：

$$i_s = P_s \cdot R_o \cdot M$$

其中，Ro 是统一增益响应率 [A/W]，M 是 SemiNex 研究中使用的雪崩光电二极管（APD）的雪崩增益。通常，905nm 激光雷达使用硅 APD；而 1550nm 激光雷达使用砷化镓铟（InGaAs）APD。噪声计算包括 APD 的暗电流、散粒噪声和热噪声，它们可以用以下公式表示：[4]

$$i_n = \sqrt{(\{2q\,[I_D + (P_S + P_B)M^2F] + I_t\}BW}$$

其中，ID 是暗电流，P_S 是进入 APD 的信号光子通量，P_B 是太阳辐照度背景噪声，F 是过量噪声系数，I_t 是由 4kBT/Req 计算的热（约翰逊）噪声，BW 是系统带宽。

由于返回的信号光子是由接收器孔径收集的，所以在计算散粒噪声时也需要考虑太阳背景噪声。假设在最坏的情况下，入射到 APD 上的总太阳背景功率可以用下面的公式来估计：[4]

$$P_B = \frac{\pi E_\lambda \rho \beta_R D_R \Delta_\lambda \eta \, exp(-\gamma R)}{16}$$

其中，E_λ 是太阳光谱辐照度 [$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$]，$\beta_R$ 是接收器视场，D_R 是接收器孔径，Δ_λ 是接收器带通滤波器范围。

905nm 的 Δ_λ 为 20nm，1550nm 的 Δ_λ 为 40nm，据估计，1550nm 的太阳噪声比 905nm 小约 78%。我们还注意到，当 E_λ 仅为 0.0045 时，1350nm 具有最低的太阳辐照度噪声；相比之下，905nm 的太阳辐照度噪声为 0.9，1550nm 为 0.2，这些太阳背景噪声是可忽略不计的（见图 4）。[5] 在 1350nm 处极低的太阳背景噪声，可用于被探索潜在的激光雷达设计。

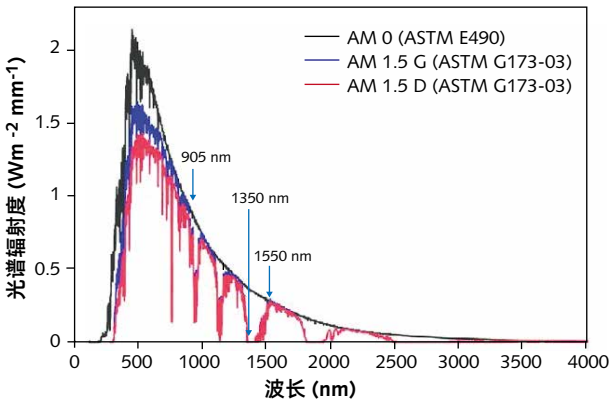


图4：太阳辐照度光谱。

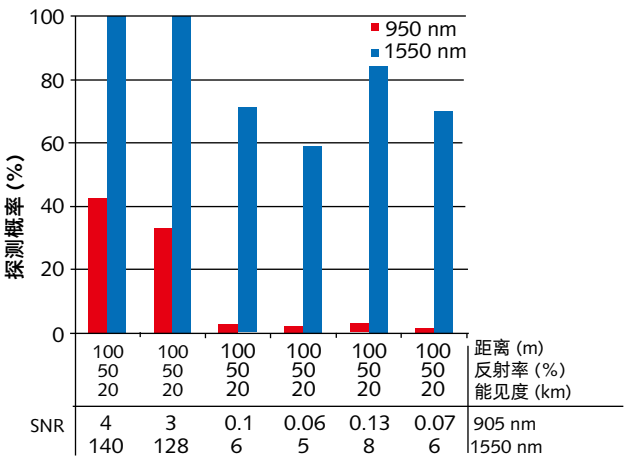


图5：单发射器激光雷达中，1550nm激光器与905nm激光器的信噪比和探测概率。

为了进行比较，我们采用了已知规格的硅 APD（用于 905nm 系统）和 InGaAs APD（用于 1550nm 系统）；接收器孔径为 50mm；硅 APD 的典型雪崩增益为 100，InGaAs APD 的为 30；硅 APD 和 InGaAs APD 的过量噪声系数分别为 5 和 10。假设系统的各个参数：接收器的光学效率为 80%，系统带宽为 20MHz，等效电阻为 10MΩ，我们得到的 SNR 为：

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_n^2}$$

与雷达类似，激光雷达探测 P_D 的概率，是用目标的互补误差函数来近似的：[6]

$$P_D \approx 0.5 \times erfc\,(\sqrt{(-lnP_{fa}} - \sqrt{(SNR+0.5)}$$

其中，P_{fa} 是错误警报的概率。不同激光雷达设计之间的彻底调查需要更严格的数值模拟，因为目标可以通过改变方向与四种 Swerling 模型进行波动。[7] 在我们的基准中，假设误报的概率是典型的 1%。

图 5 显示了在不同的距离、目标反射率和能见度条件下，使用 1550nm 激光器与 905nm 激光器的激光雷达的基准结果。一般来说，1550nm 激光雷达比 905nm 激光雷达的性能要好。在 100 米的距离上，905nm 需要高目标反射率，以达到一

个较好的信噪比和探测概率。相比之下，1550nm 激光雷达的探测概率为 100%。信噪比差的单发射器 905nm 激光雷达无法探测到 100 米以外的任何物体，而 1550nm 激光雷达在信噪比方面胜过 60 倍，在 200 米处的探测概率胜过 905nm 激光雷达 24 倍。在 250 米范围内，单个 1550nm 激光雷达可以在晴空和低能见度条件下很好地发挥作用。考虑到汽车激光雷达所需要的安全水平，1550nm 的性能有望实现完全自主的激光雷达实施。

在这个基准中，我们假设激光发射器的光束直径与放大的瞳孔大小一致。在实践中，905nm 激光雷达的设计通常会增加许多发射器，并显著扩大光束直径，以满足安全标准，实现更好的信噪比，并实现更远的探测距离。这种用于 905nm 的方法使整个激光雷达设计复杂化，增加了大量成本，并降低了目标的图像分辨率。相比之下，采用 1550nm 激光二极管的激光雷达系统，可以为自主车辆提供更远的探测距离，而且复杂程度更低。

基准结果表明，人眼的安全要求极大地限制了 905nm 激光雷达的实用性，并增加了其复杂性。通过一个单一的发射器，这样的激光雷达无法探测到 100 米以外的物体，这完全破坏了在所有条件下，为自主车辆建立可靠的激光雷达系统的最终目标。

相比之下，新的 1550nm 激光二极管对人眼是安全的，能够在远距离为自主车辆提供最佳的激光雷达性能。1550nm 二极管为自动驾驶汽车和汽车工业提供了一条实用道路，在不牺牲探测分辨率的情况下，提供了更简单的激光雷达系统。考虑到显著降低的太阳噪声，具有更高效率和更高功率的 1350nm 激光二极管，可能是激光雷达的一个更好的选择。❑

参考文献

1. See https://bit.ly/SemiNex-Ref1.
2. See https://bit.ly/SemiNex-Ref2.
3. D.-L. Kim et al., Opt. Eng., 60, 3 (2021); doi:10.1117/1.oe.60.3.037102.
4. H. N. Burns et al., Opt. Eng., 30, 3, 323 (1991); doi:10.1117/12.55801.
5. See https://bit.ly/SemiNex-Ref5.
6. B. R. Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB (2000).
7. P. Swerling, IEEE Trans. Inf. Theory, 3, 3, 175– 178 (1957); doi:10.1109/tit.1957.1057419.

2021–2026 年，激光熔覆市场复合年增长率达 9.6%

据 Research and Markets 表示，2021 年激光熔覆市场估值达到了 4.83 亿美元。预计在 2021-2026 年，其复合年增长率为 9.6%，到 2026 年达到 8.23 亿美元。

近年来，市场上出现了更先进的激光熔覆技术种类，特别是极端高速激光应用 (EHLA)。德国弗劳恩霍夫研究所已经将 EHLA 作为一种先进的激光熔覆形式，来替代镀铬和喷涂技术。EHLA 涂层可以应用于小型和大型组件，速度比激光熔覆快 10-100 倍。从长远来看，激光熔覆将比切割、焊接等传统激光技术更经济、更成功。激光熔覆市场具备如下特点：

• 设备收益：激光熔覆市场最大收益



在预测期内，系统收入部分可能会继续占据更大的市场份额。该领域的领先地位可以归功于这些系统执行广泛功能的能力，这将它们的应用扩展到多个终端行业，如石油和天然气、采矿、汽车和航空。

• 石油和天然气：激光熔覆市场中最大的增长终端行业

在石油和天然气行业，激光熔覆是一种广泛应用于勘探、钻井、耐腐蚀等方面的技术。它通常用于炼油厂、井下稳定器、阀门球 / 阀座、砂阀和液压杆。

• 亚太地区：全球激光熔覆市场增长最快的地区

与其他地区相比，亚太地区在采用激光熔覆解决方案方面一直处于领先地位。亚太地区激光熔覆市场的主要贡献者是中国、日本、印度、韩国和其他地区。该地区不断增加的研发投资，以及不断增长的石油和天然气、汽车、航空航天和国防制造、采矿和电子行业，预计将推动该地区激光熔覆市场的增长。上述终端行业对高性价比、可靠和快速响应的激光熔覆解决方案的持续需求，也有望推动该地区激光熔覆市场的增长。❑

ProCutter 2.0 30kW 高功率智能切割头

普雷茨特的 ProCutter 2.0 30kW 高功率智能激光切割头，是首款能够处理如此高功率并与市场上所有 30 kW 激光源兼容的切割头，它具有高生产率，为切割以前难以想象的材料提供了可能性。



增强的过程性能通过以下方式减少了加工时间：完全重新设计的切割气流可实现更高的切割速度；改善了光学性能，以有效利用可用的激光功率；高度动态的驱动器，用于焦点调整，以减少准备切割过程的时间（穿刺时间和开始切割之前的等待时间）。

增强的过程稳定性通过以下方式减少了机器的闲置时间：复杂的热管理，以减少过程热量的影响；扩大的聚焦范围可确保厚材料的出色切割质量，并减少了操作员适应切割参数所需的时间；广泛的传感器技术可监控和自动化切割过程。

普雷茨特，www.precitec.cn

光束模式可调的多模连续光纤激光器

中久大光自主研发出“APP”系列光束可调多模连续光纤激光器，可有效抑制激光焊接中的飞溅产生，提升整体焊接质量及良率。



“APP”系列激光器可调节“钉子”光斑设计：具有中心及环形两道光束，环形光束打开匙孔，中心光束加大熔深，形成大而稳定的匙孔，通过调整中心区域和环形区域功率改变输出光斑能量分布形态，可有效降低火花飞溅。使焊缝表面更加平整、光滑，熔深更深、更宽。此外，还具有高抗回返光特性，可以满足多种有色金属（紫铜、黄铜、铝材等）加工。

最大可提供 12000W 的总输出功率，并可灵活调整输出光束模式。中心光束与环形光束功率任意可调，输出光纤可定制参数。能够满足各种高要求的焊接工作，其特有的可编辑环形光斑在焊接效果上远优于其他激光器，可根据用户要求实现二次工艺开发。

中久大光，www.daguanglaser.com

可调谐滤波器 OTF–980

圣德科（Santec）推出的 OTF-980 是一款通用的可编程光学可调谐滤波器，实现了中心波长和带宽同时独立可调，波长调谐范围 C+L 波段 85nm。该款滤波器基于新的自由空间光学相结合的超精细调谐机制，确保精确的过滤及控制平顶通带形状。



OTF-980 完全可编程，具有中心波长和带宽的自动搜索功能。此外，在输出端集成了功率计监测单元，实时监测光功率并具备自动搜索峰值的功能。GPIB 和 USB 接口符合工业标准的 SCPI 命令集，可实现全面的远程控制与测量自动化。

主要应用包括 40Gb/s、100Gb/s 传输测试；WDM 波长调谐；ASE 噪声滤除；脉冲整形；下一代束波长 OXC 等。

Santec，www.santec.com

高峰值功率高占空比传导冷却叠阵GS20

炬光科技推出全新高功率传导冷却叠阵系列产品 GS20。该产品主要应用于固体激光器泵浦，以 808nm 产品为例，在 8% 高占空比条件下，单巴峰值功率为 400W；在 1% 低占空比条件下，单巴峰值功率可达到 500W；较传统传导冷却叠阵产品有大幅提升。



采用模块化设计，以 5 巴模块为基础设计单元，通过增加模块易于实现功率扩展。结构紧凑，5 巴基础模块（含上下电极）体积为 16.45cm^3，重量轻至 68g。采用无铟化及预制金锡薄膜的共晶键合技术，寿命可达 10^9 脉冲数，可靠性高。能实现从芯片封装到激光器的精准波长控制，波长控制范围可达 ±2nm。光束可准直，快轴准直后，发散角 <0.5°。使用便利，工业用水即可满足产品冷却水的水质要求，无需去离子水。

炬光科技，www.focuslight.com

509nm单频光纤激光器

上海瀚宇推出的 509nm 单频光纤激光器，由 1018nm 波段高功率窄线宽单频光纤激光器以及高效率频率转换单

元两部分组成，两个单元之间通过光纤连接，标准产品采用单模保偏光纤输出，输出光束质量优秀，操作简便。



该产品内置的高功率单频 1018nm 波段单频光纤激光器，基于 CoSF-D 分布反馈型单频光纤激光器或者 CoSF-R 型超低噪声“优化行波腔”型单频光纤激光器，实现了真正的单频、单纵模、线偏振输出。此外，频率转换单元模块基于周期极化铌酸锂（PPLN）晶体技术，509nm 输出激光保持了 1018nm 基频的低噪声性能，输出功率可达 500mW，也有更高功率输出可供选择。

上海瀚宇，www.shconnet.com.cn

40kW定制光纤激光器

杰普特提供的 40kW 定制激光器正式交付客户，这是国内首台商用小芯径、高亮度的 40kW 光纤激光器，在板材加工应用中，具有更高效率和更高的切割精度，能适用于更广泛的板材厚度。



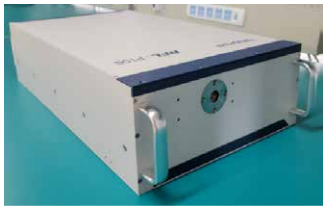
采用更优的泵浦技术，使泵浦光在增益光纤中吸收更强，所用增益光纤长度更短，在设计层面有效弱化了激光器的非线性效应，使单模块的光电转换效率达到 40% 左右。使用纤芯 150μm 的光纤输出，铠缆长度 20m，亮度高。

为了实现高反材料的稳定加工应用，杰普特基于高功率剥模技术，在激光器内部设计中有效滤除了返回光及杂散光，为黄铜、紫铜等高反材料的高精度加工提供了优质解决方案。同时激光器可以实时监控回光的强度，确保 40kW 激光器使用过程中的可靠性。

杰普特，www.jptoe.com

纳秒绿光光纤激光器

锐科激光推出纳秒绿光光纤激光器，其光束指向性好，光束质量优异，在加工过程中切割更精准，断面更整齐。其脉冲输出极其稳定，效率更高，适合 24/7 的工业生产环境， 拥有极佳的工业级可靠性，同时具备低成本、高可靠性等特点。



主要应用包括 FPC/PCB 切割、陶瓷打孔划片、玻璃 / 晶圆切割、特定金属材料的微孔制作、表面薄膜的清除、非晶硅薄膜与太阳能电池板镀膜的划线等，并适用于大多数金属和非金属材料表面加工或镀膜层的加工。

锐科激光，www.raycuslaser.com

用于切割碳纤维增强塑料的3D激光加工系统

三菱电机公司推出两款新的 CV 系列 3D CO_2 激光加工系统样机，该系统配备了 CO_2 激光振荡器，将振荡器和放大器集成到同一个外壳中。同时，该产品克服了利用现有技术加工碳纤维增强塑料（CFRP）存在的运行成本高、生产率低和废物处理等问题，可实现高生产率和高加工质量，有助于推动碳纤维增强塑料产品的大规模生产，减少废物，减轻环境负担。该系统专门用于切割碳纤维增强塑料。



三菱电机，www.mitsubishielectric.com.cn

Digital Flash系列激光雷达

Ouster 宣布推出高性能固态数字激光雷达 Digital Flash（DF）系列。DF 系列是包含短程、中程和远程固态数字激光雷达传感器的套件，可在整个视场内提供均匀的精确成像，不会产生运动模糊。

该系列产品采用突破性的固态闪存架构，测距达 200 米，可为全日光下反射率为 10%的目标生成超高分辨率 3D 点云。同时，该多传感器套件是一个灵活的平台，可轻松适应不同外形和传感器配置，以提供不同的范围、视野和车辆设计自由。此外，它还满足汽车制造商对 ADAS 和自动驾驶的要求，可以无缝集成到车辆架构和设计中。该系列灵活可扩展，专用于汽车行业。



Ouster，www.ouster.com

Spectra–Physics InSight X3+可调谐超快激光器

MKS 推出 Spectra-Physics InSight X3+ 可调谐超快激光器系列的最新产品，该产品增加了集成衰减功能。这一新功能提供了实时、软件控制的输出功率调整，以增强内置的自动波长和色散补偿调谐，从而进一步优化多光子成像性能。



此外，该产品拥有 InSight X3+ 多光子成像应用的先进工具，广泛用于神经科学的活体深层组织成像和许多其他应用。

MKS，www.spectra-physics.cn

CuttingMaster 2122分板系统

LPKF 最新推出的 CuttingMaster 2122 分板系统，配备了新开发的激光器，系统精度和速度稳定可靠。相比上一代系统使用“FastCut”在 0.8mm 的 FR4 板上切割样品时间为 7.3s，新推出的 LPKF CuttingMaster 2122 只需 5.9s 即可完成，加工效率提升了将近 20%。



在切割覆盖膜方面，新的激光系统也实现了性价比的显著提升。与先前技术相比，LPKF CuttingMaster 2122 加工性能优异，实现了附加值且投资成本保持不变。该系统可切割柔性、刚柔结合以及刚性 PCB，例如 FR4、聚酰亚胺或陶瓷等材料。

LPKF，www.lpkfusa.com

AW准波长系列叠阵激光器

杏林睿光推出的 AW 准波长激光器系列的三款叠阵激光器，分别为 GS1、GS2 垂直叠阵和 GS3 水平迷你叠阵，该系列产品基于高效可靠的巴条金锡烧结技术、低热阻封装结构，在准连续工作模式下，可实现高占空比和高峰值功率输出。



GS1、GS2 最多可封装 5 条巴条，可实现 1kW 峰值功率输出，其中 GS2 结构可定制 2-10 组叠阵级联；GS3 结构紧凑，最多可封装 12 条迷你巴条，可实现 1.2kW 峰值功率输出。GS2 和 GS3 可定制 808nm 附近的多波长组合叠阵模组，从而实现宽温均匀泵浦。全线产品接受 940nm 波长定制。产品主要应用于泵浦源、材料加工、激光照明、医疗美容、科研应用等。

杏林激光，www.real-light.com

高增益、低噪声掺铒光纤放大器LNA–220

日本 Alnairlabs 公司推出的高增益、低噪声掺铒光纤放大器 LNA-220，可提供卓越的光放大性能、非常高的增益系数和最小的附加噪声，工作波段可选 C 波段、L 波段，C+L 波段。近量子极限的噪声系数通常为 3.8dB，小信号光增益超过 50dB，输入信号低至 -50dBm，特种光纤和复合放大器设计的影响，使其成为不可缺少的弱光信号光放大器。



该产品主要应用于微弱光信号放大、光学计量、测试与测量、激光雷达（LIDAR）探测信号放大以及量子加密等应用领域。

波弗光电，www.bonphot.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、高脉冲能量输出激光光源；采用种子源直接加一级放大可实现高峰值功率，纳秒级的脉宽激光输出，是激光雷达、遥感勘测、激光测距的理想光源。



CoLID Mini 型短脉冲激光雷达光源结构紧凑（70mm × 70mm × 25mm），工作温度范围宽，超低功耗，超低延时抖动（<80ps），脉冲质量优秀，可通过外接 TTL 触发信号实现脉冲输出，非常适合系统集成。

上海瀚宇，www.shconnet.com.cn

Advertiser	广告客户	网址	页码
Aerotech, Inc.	艾罗德克	www.laserfocusworld.com.cn/aerotech.asp	9
爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司		www.edmundoptics.cn/111-8618	11
Ante Laser	安特激光	www.antelaser.com	7
Amonics Ltd.		www.amonics.com	17
BWT	凯普林	www.bwt-bj.com	21
Mean Well	明纬	www.meanwell.com.cn	15
Optical Society Of America		optica.org/brand	1
普雷茨特精密技术 (上海) 有限公司		www.precitec.cn	5
2022 ITES深圳国际工业制造技术及设备展览会暨第23届深圳机械展		www.iteschina.com	IFC

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



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.cn

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。

LaserFocusCon
激光聚会2021

激光技术助力半导体制造 合力打造中国芯

随着激光技术的不断发展，半导体制造中的激光应用越来越广泛且多样化。多种激光技术已经整合进入许多重要的半导体工艺中，包括激光切割、通孔、焊接、剥离、标记、测量等。它们广泛用于加工半导体器件，高密度互联印刷电路板，以及集成电路封装应用。

雅时国际商讯（ACT International）旗下《激光世界》杂志将于 12 月 27–29 日慕尼黑华南展（LEAP）期间，联合 LEAP 组委会举办“激光技术助力半导体制造，合力打造中国芯”技术研讨会，欢迎对此话题感兴趣的业内同仁们积极参与。

大会主题（拟定）

- 紫外激光在晶圆划片中的应用
- 超快激光用于晶圆的精密切割
- 准分子激光在半导体光刻及退火中的应用
- 激光精密打标用于半导体芯片及器件的标识
- 激光技术在钻通孔中的应用
- 激光技术用于半导体晶圆清洗

会议信息

时间：2021年12月
地点：深圳国际会展中心
规模：150+工程师/管理层

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 雅时国际商讯 ACT International

大会媒体

激光世界 LaserFocusWorld China

支持单位

慕尼黑上海光博会 LASER PHOTONICS CHINA

LaserFocusCon