

激光微加工工艺在规模生产中的应用

IPG 光子—微系统部门

地址: 220 Hackett Hill Road, Manchester NH, 03102USA

邮箱: jbickley@ipgphotonics.com

激光微加工工艺可处理多种材料、形状及尺寸,因而备受关注。随着制造加工行业的发展,人们对质量和产能的需求越来越大,对尺寸及定位的容差却越来越小。这就需要激光光源、生产工艺,集成系统及过程控制各环节协同发展,以满足逐步提高的行业要求。

本文旨在对 IPG 光子推出的新一代光纤激光器进行性能研究及应用探讨。较之前的产品相比,新型光纤激光器更灵活、更稳定,操作成本也更低。最重要的是,加工速度实现了质的飞跃,例如具有高亮度、高脉冲能量的近红外准连续光纤激光器(输出波长为 1070 nm,脉冲周期短至毫秒级)以及 1ns 绿光光纤激光器(输出波长为 532nm)。其应用包括在氧化铝或氮化铝等陶瓷土中上高速钻孔。例如,在厚度分别为 100 微米、381 微米及 635 微米的基板上钻直径小于 50 微米的孔,速度可达 3000 孔/秒、750 孔/秒及 300 孔/秒;在厚度为 381 微米及 635 微米的氧化铝基板上进行高速切割及划线;在厚度为 3 毫米的蓝宝石基板上进行高质量切割;PEEK、硅胶、环氧树脂、FR4 等聚合物的高质量切割及钻孔。此外,本文还将就光纤激光器工艺在规模生产中的应用进行探讨。

关键词: 陶瓷土、蓝宝石、氧化铝、微加工、钻孔、切割、准连续光纤激光器、绿光光纤激光器

1 简介

如今,激光工艺已广泛应用于制造业,比如金属的切割与焊接,其中一个重要领域就是激光微制造或是激光微加工。这里的“微”指的是基板厚度不足 1 毫米,尺寸测量精确至微米。与传统的大规模生产应用,比如机扑焊接或是钣金切割相比,进行微加工时所需用到的设备及工艺则更强调精确度以及严谨的进程控制。由于这些应用往往对热能很敏感,对精确度有极高的要求,所以,所选激光器的类型、规格、光学系统及硬件配置对于稳定的规模生产而言至关重要。

激光器的选择取决于诸多因素,其中包括材料属性、加工形状、进程容差、所需产能等等。新型光纤激光器需要在降低成本的同时,提供改良的、更加灵活的激光源。

棒式固态激光器有一个致命缺陷,即热透镜效应会导致平均功率受限。IPG 推出的准连续掺镱光纤激光器(QCW),具有高亮度/光束质量、高脉冲能量、高峰值功率及高平均功率,已成为替代照射棒或二极管泵浦固态激光器的理想选择。这种风冷、紧凑型激光器,电光转换效率超过 30%,全程免维护,输出波长 1070nm,毫秒级“长脉冲”。另有“连续模式”可选。

如果需要更短的脉冲(纳秒级或是更短),用户也有一系列覆盖多波长、多脉冲能量、多平均功率/峰值功率的光纤激光器可供选择。除了已有的 1064nm 近红外 Q 开关光纤激光器之外,还有新一代绿光(输出波长为 532nm)光纤激光器。IPG 推出的脉冲型绿光光纤激光器的主要特点为峰值功率高,平均输出功率可达 50W,脉冲周期恒定为 1ns,频率 10 到 300kHz。光纤的脉冲能量和/或重复频率可根据需要调整,不影响输出光束的参数, $M^2 < 1.2$,与传统的激光器相比更高效、更紧凑,成本也更低。

虽然 IPG 光子有从紫外线到中红外等一系列激光器,但是本文将重在讨论准连续光纤激光器及脉冲型绿光光纤激光器。接下来我们将通过实例研究这两种激光器的工艺特点,探讨其在规模生产中的应用。

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会

关于准连续光纤激光器，我们主要观察了其在氧化铝、氮化铝、蓝宝石等陶瓷土中的应用结果。氧化铝（多晶 Al₂O₃）和氮化铝（AlN）被公认为是超级导热材料，广泛用于各行各业，如 LED、RF、微波封装等。在这些行业中，钻孔速度与成型速度将直接影响生产成本。另一方面，单晶 Al₂O₃，也就是我们通常所说的蓝宝石，硬度特别高，仅次于钻石。与传统的光学玻璃相比，蓝宝石不仅更坚固，更耐划，而且光传输从紫外线到近红外，导热性能也极佳。蓝宝石作为一种能够通过 MOCVD 扩大光发射外延层的材料，已大量应用于 LED 行业。在过去几年里，蓝宝石的应用随着 LED 行业的发展出现了井喷式的增长，如背景照明，近年来更逐步推进至一般照明。另一个增长点是家用电子产品，蓝宝石可以用于制造手机摄像头、功能键甚至是整个显示屏。

绿光光纤激光器适用于那些不易通过近红外波段加工的材料，如聚合物（PEEK、硅胶、环氧树脂、FR4），因此堪称准连续光纤激光器的“最佳搭档”。绿光光纤激光器脉冲周期更短，因而可以对金属或陶瓷土进行精细加工。我们随我们将一一展示其在不同材料中的应用结果。

2 准连续光纤激光器

实验所用激光器为 YLM-150-1500-QCW 光纤激光器，单模光纤（芯径 14 微米），最大峰值功率 1.5 千瓦，平均输出功率 150 瓦（连续模式时最高可达 250 瓦）；以及 YLR-300-3000-QCW 光纤激光器，多模光纤（芯径 50 微米），最大峰值功率 3 千瓦，平均输出功率 300 瓦。两者输出波长均为 1070nm。脉冲周期在 10 微秒至 50 毫秒范围内可调，实际范围取决于操作模式及参数设置。

热加工时脉冲周期相对较长，基板的局部温度超过熔点，辅助气体（如空气、氮气、氧气或氩气）以物理形式清理基板上的熔融物。其操作原理为光束 / 光纤通过带有一定焦距的准直镜（一般焦距范围为 50~150 毫米），经聚焦后至切割头。聚焦镜的焦距根据所需应用进行调整，一般为 50~200 毫米。辅助气体经过切割头，经由一个与光束同轴的喷嘴排出。喷嘴的直径以及喷嘴到目标之间的距离取决于所需应用，但直径和距离通常均为 0.5~1 毫米。用户可以通过设定脉冲周期、重复频率、峰值功率、平均功率（占空比）、切割速度、气体类型及压力等操作参数，控制热响应区。

准连续光纤激光器有多种峰值功率、平均功率、脉冲周期、单模或多模可供选择，聚焦光束的尺寸也能根据需要进行调整。单模光纤的光束质量可以精细至 M²<1.05。由于光束几乎可以达到衍射极限聚焦，这就使得光斑直径能够低至不足 20 微米，形成超乎想象的功率密度（107W/cm²）！通常这样的功率密度对于大多数材料来说已经足够产生耦合效应及局部烧蚀，即使某些材料对近红外波段的线性吸收不强，如蓝宝石和氧化铝。虽然氧化铝的光透射率远远低于蓝宝石，但是由于其中的晶界、气孔及杂质会对入射光形成吸收、反射和散射，所以，大体积氧化铝对近红外的吸收仍不甚理想。

2.1 准连续光纤激光器的应用——钻孔

用光纤激光器钻孔时，一个脉冲一个孔，所以准连续光纤激光器在钻孔速度上极具优势。我们选取了厚度为 635 微米的氧化铝（96%），以 300 孔 / 秒的速度打孔，孔间距为 150 微米，基板在光束下方以 45 毫米 / 秒的速度线性移动，单模光纤，脉冲周期 200 微秒。当然，脉冲周期越短，钻孔速度就越快，直至达到最大化。这也就是说，操作过程中存在一个平衡钻孔质量、脉冲能量及脉冲周期的最佳峰值功率。一般来说，基板越厚，脉冲能量就越高，和 / 或脉冲周期也就越长。图 1 所示为钻孔的入口端及出口端。钻孔出口端以显微镜手动测量为 22±3μm，入口端为 49±3μm。基板在操作前已经过覆压，打孔后进行清洁 / 抛光。

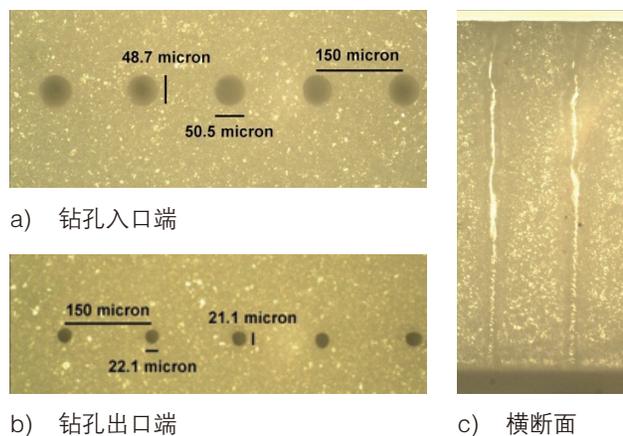


图 1：厚度为 635 微米的氧化铝（96%），打孔速度为 300 孔 / 秒

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会

在实际应用中，除了能够很好地烧蚀之外，我们还要能够调整孔的大小。通常情况下，高功率密度能产生稳定的烧蚀，然后在氧化铝上形成孔。然而，对于氧化铝这样不易烧蚀的材料而言，仅仅依赖高功率密度是不够的，尤其是所需焦斑小于常规尺寸时。另一方面，用大幅提高峰值功率的方法来改善烧蚀，其结果往往会同时影响成孔质量，所以人们常常用覆压涂层的方法来辅助氧化铝表面的烧蚀。IPG 微系统推出了一种新的解决方案，通过改进激光工艺的方式加强烧蚀，无需覆压。当然，在某些时候可能还是需要涂层来改善整体质量，减少渣屑。

图 2 表示在厚度为 381 微米的氧化铝 (99.6%) 上以 750 孔 / 秒的速度钻孔后孔的形态。经测量，钻孔入口端孔径约 37 微米，出口端约 16 微米。该实验使用的是单模光纤。

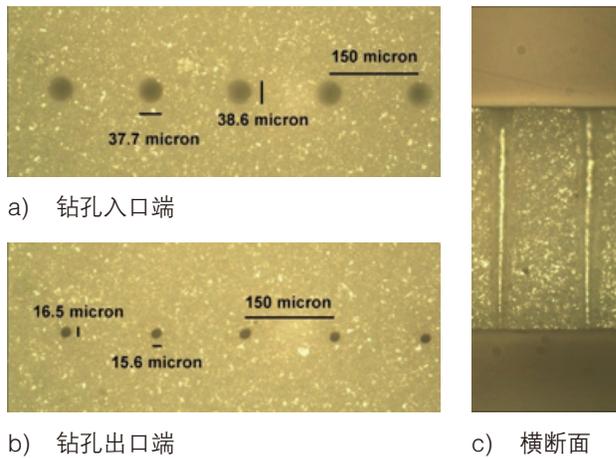


图 2: 厚度为 381 微米的氧化铝 (99.6%)，以 750 孔 / 秒的速度钻孔。

图 3 表示在厚度为 381 微米的氮化铝上，以 300 孔 / 秒的速度钻孔。测量显示入口端直径约为 42 微米，出口端约为 31 微米。与相同厚度的氧化铝相比，氮化铝需要的峰值功率更高，脉冲周期更长。

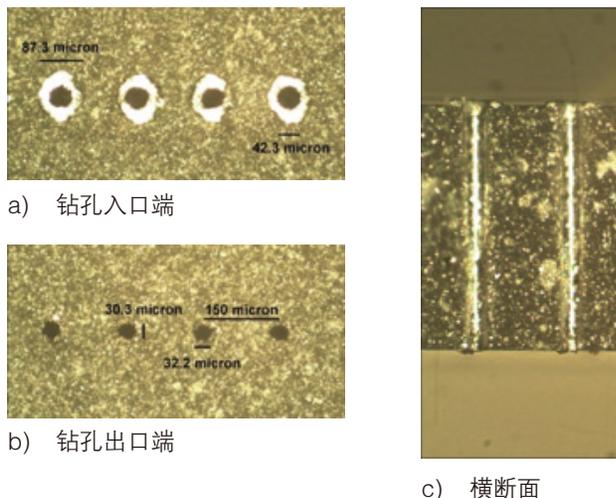


图 3: 厚度为 381 微米的氮化铝，以 300 孔 / 秒的速度钻孔

图 4 表示在厚度为 100 微米的氧化铝 (99.6%) 上，以 3000 孔 / 秒的速度操作后观察孔的形态。测量结果显示，钻孔入口端直径约为 33 微米，出口端直径约为 22 微米。

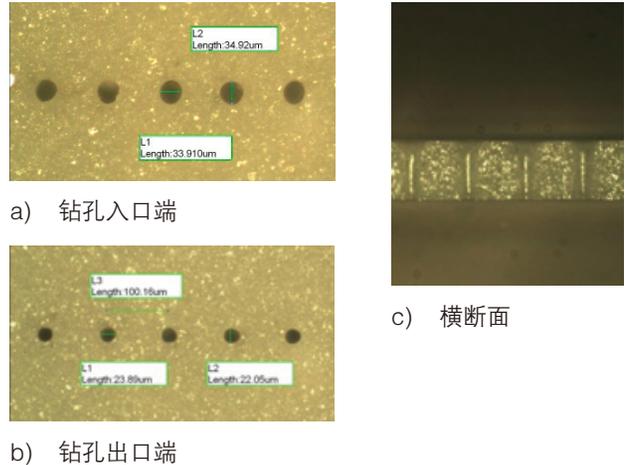


图 4: 厚度为 100 微米的氧化铝 (99.6%)，钻孔速度 3000 孔 / 秒

用户可通过改变传输光纤的芯径 (比如改变激光器及其光纤,或是通过光栅/耦合连接更大的传输光纤)、传输 (改变准直镜和/或物镜焦距)、或是参数 (通常为脉冲周期和/或脉冲能量,如峰值功率),调整孔的大小。

图 5a 表示用多模传输光纤在厚度为 320 微米的氧化铝上进行“大孔径”钻孔。钻孔速度为 100 孔 / 秒，出口端直径为 320 微米。图 5b 表示在厚度为 320 微米的氮化铝上沿扫描方向钻孔，孔间距 325 微米，钻孔速度同样为 100 孔 / 秒。2000 余个钻孔的测量结果显示，入口端约 105 微米，出口端约 65 ± 9 微米。

上述实验证明，在 150 毫米 X 150 毫米面积内，钻孔定位的精确性达到 ± 5 微米，如将正常孔径尺寸设为 100%，则孔径偏差可控制在 $\pm 15\%$ 范围内。在某些应用中，偏差率还有望进一步降低。

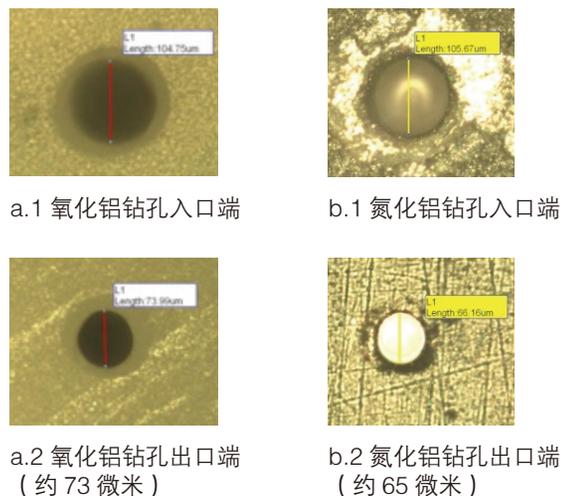


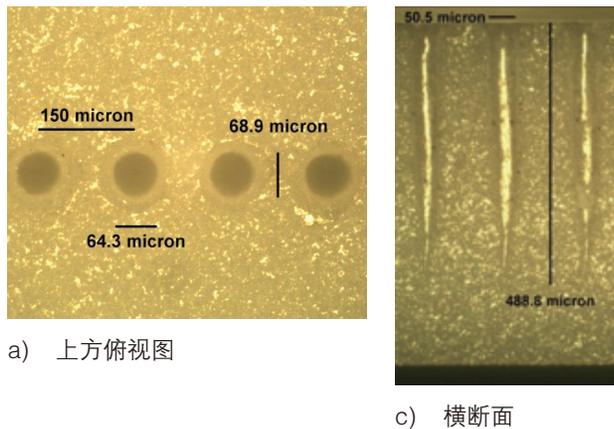
图 5: 在厚度为 320 微米的 a) 氧化铝，以及 b) 氮化铝上钻“大孔径孔”

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会

2.2 准连续光纤激光器的应用——划线

陶瓷土划线的原理与钻孔相似，也是通过一个脉冲在基板上形成一个盲孔，然后辅以适合的脉冲间隔，使其形成一条线。

图 6 表示厚度为 635 微米的氧化铝（96%），以 200 毫米 / 秒的速度进行单孔爆破，单孔深度 350 微米，孔间距约 150 微米。本次实验所使用的脉冲周期小于 100 微秒。

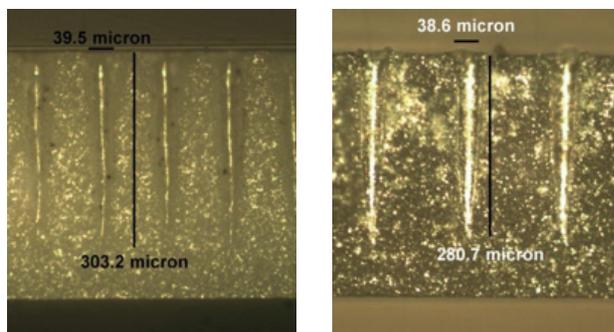


a) 上方俯视图

c) 横断面

图 6：在厚度为 635 微米的氧化铝上，以 200 毫米 / 秒的速度划线

图 7a 表示在厚度为 381 微米的氧化铝（99.6%），划线速度为 300 毫米 / 秒；图 7b 表示在厚度相同的氮化铝上，以相同速度划线。本次实验所使用的脉冲周期小于 50 微秒。



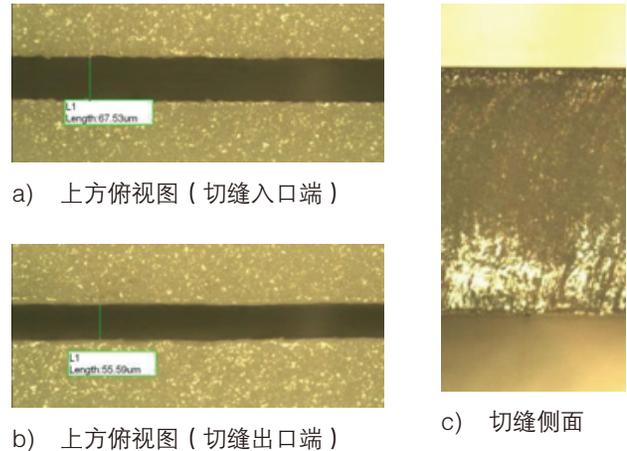
a) 氧化铝横断面

b) 氮化铝横断面

图 7：同时在氧化铝和氮化铝（厚度均为 381 微米）上以 300 毫米 / 秒速度划线

2.3 准连续光纤激光器的应用——切割

我们在厚度为 635 微米的 96% 氧化铝上，以 140 毫米 / 秒的速度进行切割演示。该切割实验使用的是单模准连续激光器（如图 8 所示）。切割前覆压，切割后清除，这一步骤主要是为了避免飞溅和重铸。实验结果显示，切割完成质量高，完全没有任何渣滓或碎屑。当氧化铝的厚度降低为 381 微米时，线性切割速度更可高达 250 毫米 / 秒（如图 9 所示）。

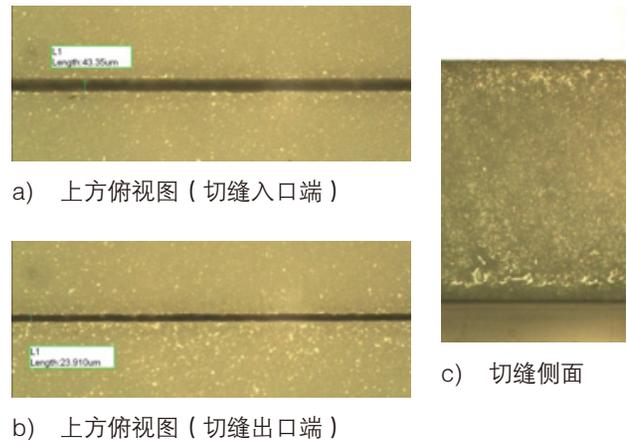


a) 上方俯视图（切缝入口端）

b) 上方俯视图（切缝出口端）

c) 切缝侧面

图 8：厚度为 635 微米的氧化铝（96%），切割速度为 140 毫米 / 秒



a) 上方俯视图（切缝入口端）

b) 上方俯视图（切缝出口端）

c) 切缝侧面

图 9：在厚度为 381 微米的氧化铝（99.6%）上，以 250 毫米 / 秒的速度切割

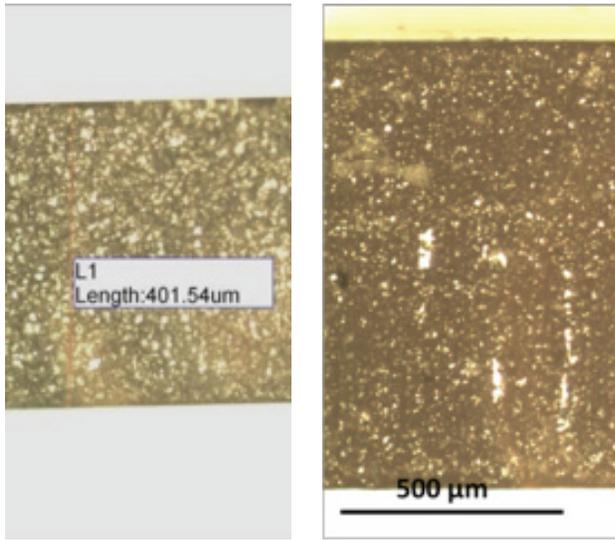
准连续光纤激光器机关起还可用于蓝宝石的切割。图 10 为家用电子产品行业会用到的一些典型切割形状。



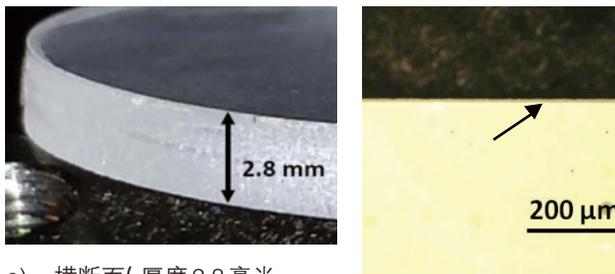
图 10：准连续光纤激光器在家用电子产品市场中的应用——对蓝宝石进行多种形状的切割

基板厚度在几毫米范围内时，准连续光纤激光器在切割速度及切割质量方面均表现出众，无裂缝或碎屑，表面粗糙度一般在 2 微米以下（如图 11 所示）。在实验中，厚度分别为 0.4 毫米、1 毫米、3 毫米的蓝宝石部件的切割速度可以达到 12 毫米 / 秒、9 毫米 / 秒、3 毫米 / 秒。当然，实际切割速度将取决于切割形状及切割质量。

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会



a) 横断面(厚度 0.4 毫米, 切割速度 12 毫米 / 秒) b) 横断面(厚度 1 毫米, 切割速度 9 毫米 / 秒)



c) 横断面(厚度 2.8 毫米, 切割速度 3 毫米 / 秒) d) 切缝的上方俯视图, 无裂缝或碎屑

图 11: 用准连续光纤激光器切割不同厚度的蓝宝石部件

3 1ns 绿光光纤激光器

我们对波长为 532nm 的 1ns 光纤激光器进行了评估。实验选取的激光器型号为 GLPN-100-1-10-R (表示 100 微焦 / 脉冲, 100 千赫, 功率 10 瓦) 及 GLPN-200-1-20-R (表示 200 微焦 / 脉冲, 100 千赫, 功率 20 瓦)

短脉冲 (低于 100 纳秒) 的典型应用是烧蚀, 也就是一个脉冲清除一个单位体积。用传统激光器加工时, 通常会辅以远场图样技术, 这样激光光束就可以在目标体上聚焦成尖锐的小点, 然后利用“直写技术”进行烧蚀加工。

有时候光束是固定的, 基板在光束下方移动, 形成匹配的模式。基板操作台的移动由多个轴控制 (X 轴、Y 轴、

Z 轴、 θ 、主轴等), 以便与激光器相匹配。通常情况下, 定位精确度应在 ± 3 微米 / 150 毫米传送距离范围内 (操作台的线性传送速度最大可达 1 米 / 秒)。

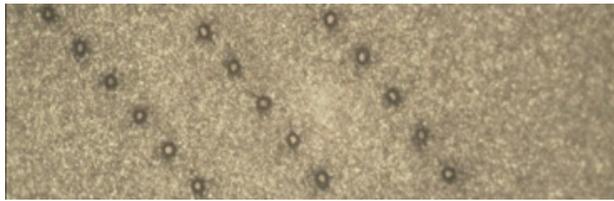
如果让光束在基板上方高速移动, 则通常会用到振镜。使用振镜的定位精确度一般不及线性移动的操作台, 但是随着振镜及控制器的不断发展, 其所能达到的精确度及重复性也在持续改善。目前直写速度一般为 1 至 5 米 / 秒, 包含少量建立时间。

微加工的质量取决于激光光束与目标材料之间的耦合。一般来说, 波长较短时, 光子能更高, 所以更有助于耦合。如果将光学穿透深度设为 L_o , 则 $L_o = 1/\alpha_{opt}$, 其中 α_{opt} 表示光吸收系数, 包括线性或非线形吸收, 会受到波长、温度、强度, 也就是功率密度 [$J/(\text{sec} \cdot \text{cm}^2)$ 或 W/cm^2] 的影响。高强度激光脉冲的非线性多光子吸收能显著提高耦合, 即使线性 (单光子) 吸收不足。高脉冲能量、短脉冲和 / 或小焦斑, 可在基板上形成极高的激光强度。除了基板的光学属性之外, 热属性 (如热扩散率) 也是至关重要的影响因子。这些因子将决定所吸收的光 / 能量将如何以热能形式传输至基板。如果将热能穿透深度设为 L_t , 则 $L_t \approx 2(\kappa \tau)^{0.5}$, 其中 κ 表示热扩散率 [m^2/sec], τ 表示适合的周期。如果 $\tau >$ 电子晶格弛豫时间 ($\sim 10-12 \text{ sec}$), 那么通常情况下 τ 就是脉冲周期。基于一阶近似, 假设基板中光和热的分布是彼此不相关的, 那么能量穿透深度 L_e 就可以定义为: $L_e \approx L_o + L_t$ 。这个方程式是一个简化版, 但是我们可以用这个概念来普遍解释激光的加工过程。特别值得一提的是, 这个方程式解释了为什么提高辐射吸收能改善切削性能, 但代价是在相同的脉冲周期下, 清除率降低。这个方程式还说明了为什么降低脉冲周期意味着在相同波长条件下, 每个脉冲的清除量减少。所以, 要同时满足质和量要求, 就必须在波长和周期之间找到最佳平衡点。

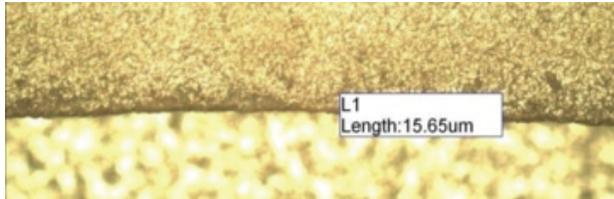
波长为 532nm 的 1ns 光纤激光器已经在那些不能使用近红外波段的应用中, 显示了独有的优势, 并证明 1ns 光纤激光器可以成为准连续光纤激光器的有益补充。我们通过实验, 将这种独特波长和脉冲周期, 与其他激光器进行了对比。

PEEK 是一种半结晶热塑性材料, 具有卓越的耐机械、耐化学、耐高温属性。我们在实验中获得了极佳的切割质量 (如图 12 所示)。实验选取的是厚度为 50 微米的基板, 切割速度为 20 毫米 / 秒, 此外, 我们还进行了速度 > 100 孔 / 秒的高速冲击钻孔实验。实验结果表明, 其质量不亚于波长 $< 266\text{nm}$, 周期 $> 10\text{ns}$ 的激光器。

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会



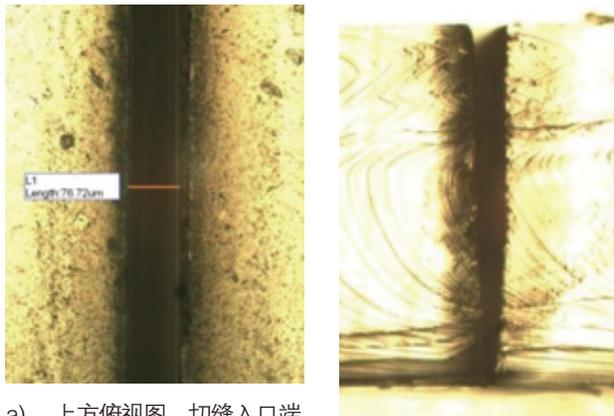
a) 上方俯视图 (25 微米孔径, 冲击钻速度 >100 孔 / 秒)



b) 上方俯视图, 切缝入口端, 速度 20 毫米 / 秒

图 12: 绿光 1ns 光纤激光器针对 PEEK 的钻孔与切割实验 (厚度为 50 微米)

硅胶熔点极低, 所以很难加工。在定义高深宽比的情况下, 1ns 绿光光纤激光器在切割 1 毫米厚的硅胶时, 速度达到 4 毫米 / 秒 (如图 13 所示), 且切割质量极佳。此外, 我们还进行了另一项实验, 波长保持相同 (532nm), 脉冲周期缩短至约 10 皮秒。结果显示切割质量相当, 但烧蚀率降低。这也就是说, 1ns 脉冲周期已经足够短, 既能控制热影响, 又能兼顾加工速度。

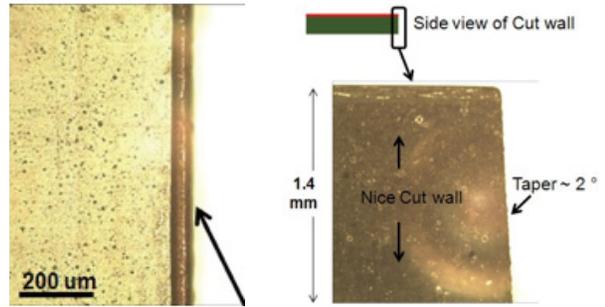


a) 上方俯视图, 切缝入口端

b) 横断面, 显示切割形成的高深宽比

图 13: 用 1ns 绿光光纤激光器切割厚度为 1 毫米的硅胶

选取厚度为 1.3 毫米的环氧树脂, 覆压 100 微米铜箔。结果显示, 切割质量好, 效率高, 速度快, 可达 5 毫米 / 秒 (如图 14 所示)。脉冲周期 (>10ns) 延长时, 质量更好。传统的标准二极管泵浦激光器 (DPSS) 脉冲周期与重复率紧密相关, 但绿光光纤激光器则不然。这主要是由于绿光光纤激光器在整个重复范围内均保持恒定的 1ns 脉冲周期, 这样也就更容易使激光器的平均功率符合生产需求。



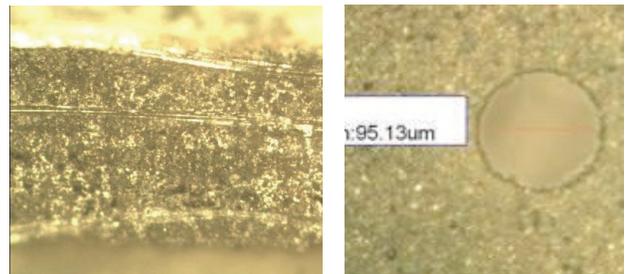
a) 上方俯视图, 显示切缝进口端的边缘

b) 横断面, 显示切缝侧壁质量

图 14: 用 1ns 绿光光纤激光器切割厚度为 1.3 毫米的硅胶 (覆压 100 微米铜箔)

绿光光纤激光器在切割 300 微米厚的 FR4 时亦表现不俗, 切口边缘干净齐整, 无碳化, 切缝不足 15 微米 (如图 15a 所示)。切割速度达数毫米 / 秒, 具体取决于铜箔的厚度。结果显示, 切割质量不亚于波长 355nm, 脉冲周期更长 (>30 ns) 的对照组。

随后的实验是在 200 微米厚的 FR4 上钻孔, 孔径约 100 微米。绿光光纤激光器所形成的通路要小得多, 还不到 20 微米, 因此, 如果要在 FR4 上钻“小孔径”孔, 1ns 绿光光纤激光器将是替代 CO₂ 激光器的理想选择。



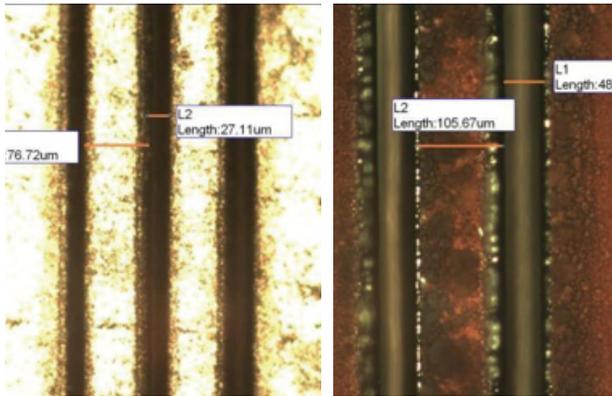
a) 300 微米厚 FR4 的切缝侧面

b) 200 微米厚 FR4 的钻孔出口端

图 15: 用 1ns 绿光光纤激光器对 FR4 进行切割及钻孔实验

虽然准连续光纤激光器也能加工金属, 但是某些特殊的切割形状, 或是特殊的属性可能更适合应用高速振镜, 而非热切割。在切割黄铜、铜、镁、碳酸亚铁等金属材料时, 1ns 绿光光纤激光器的切割质量优于脉冲周期更短的皮秒级激光器 (如图 16 所示)。

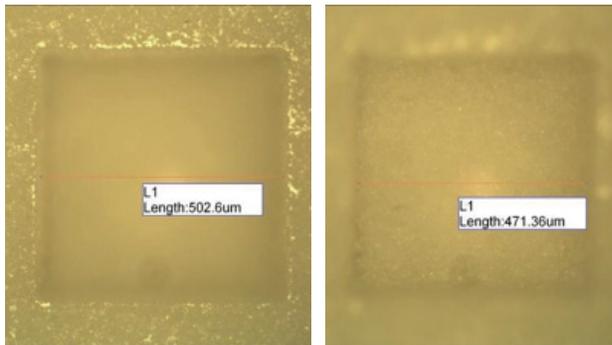
LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会



a) 上方俯视图,切缝入口端, b) 上方俯视图,切缝入口端, 50 微米厚镁板
200 微米厚碳酸亚铁

图 16: 用 1ns 绿光光纤激光器进行金属切割实验

绿光光纤激光器脉冲周期短,可逐层清除,因此是进行高质量微铣削的理想选择(如图 17 所示,实验材料为氧化铝)。



a) 光学显微镜下看到的未经铣削的上表面 b) 光学显微镜下看到的已经铣削的下表面

图 17: 用 1ns 绿光光纤激光器在 500X500 微米面积内进行深度为 150 微米的微铣削

上述实验结果表明,1ns 绿光光纤激光器适用材料范围广,在多种材料中的性能均不亚于那些波长短、但周期长的激光器。在某些材料中,1ns 脉冲周期的质量与 10 皮秒相当,但清除率更高。1ns 绿光光纤激光器以其“短脉冲周期”及“高重复率”,是高速烧蚀的理想选择,也是“长脉冲”准连续光纤激光器的有益补充。与其他纳秒级“短脉冲”激

光器相比,532nm 波长在改善耦合和最高脉冲能量/功率之间实现了最佳平衡。其中,532nm 可以通过 1064nm 二倍频获得,最高脉冲能量/功率则可通过使用高次谐波进一步降低(如 355nm 和 266nm)。

4 激光器系统

综上所述,在材料属性及应用领域的基础上,完善的进程控制将有助于激光器及激光工艺与生产需求相匹配。因此,激光器规格众多。在选择机器时,除了要满足质量要求之外,还应选择适合的尺寸、规格,充分考虑可能存在的规模生产需求,包括产能扩大及成本考量。为了满足上述关于生产综合性及设备功能性的多重需求,IPG 电子微系统部门向市场推出了一系列配备多种激光器类型及光束传输系统的工作站,供用户选择安装并直接使用。这其中不仅包括本文提到的准连续光纤激光器与绿光光纤激光器,还有其他规格的激光器(如:DPSS,准分子激光器等)。基板可在经过绿光光纤激光器(基于振镜技术)之后,用连接在高压切割头上的准连续连续光纤激光器继续处理。

工作站支持手动装载、半自动配置、也可选择集成自动化平台盒式装载器,以便在进行规模生产中实现自动化。用户最多可以配备 4 个盒式装载器/卸载端口。这些配置能提供不同的格式,具有多种操作控制功能,可确保生产过程高效稳定。

考虑到机械稳定性及热稳定性,工作站配有花岗岩支撑结构,用于安装光学部件及精密部件操作台。另外还有能使部件及光束自动对齐的校准镜,精确度达到微米级。

工作站还配有电脑控制照明和自动聚焦子系统。集成的电源及脉冲能量监控装置,能够自动检测并调整激光器的功率和/或能量水平。长时间运转时,系统还能检测并修正偏移的定位点及光束尺寸。自带软件系统,可设置参数,控制进程,并存储日志数据。

5 结论

我们在上文中讨论了 IPG 光子推出的新一代准连续光纤激光器及绿光光纤激光器在几种不同应用中的性能表现。

LPM2014 论文集 – 第 15 届光纤精密微加工国际年会

准连续光纤激光器能够以热切割形式，对数毫米厚的基板进行高质量切割、划线及钻孔。光束投射在基板上的光斑小（直径 <20 微米），功率密度高，可加工那些无法使用近红外波段的材料。如果需要“大”光斑，借助一些技术也完全能够做到。在钻孔实验中，厚度分别为 635 微米、381 微米、100 微米的氧化铝，钻孔速度达 300 孔 / 秒、750 孔 / 秒、3000 孔 / 秒；在划线实验中，厚度分别为 635 微米、381 微米的氧化铝，划线速度达 200 毫米 / 秒、300 毫米 / 秒。在切割实验中，厚度分别为 635 微米、381 微米的氧化铝，切割速度达 140 毫米 / 秒、250 毫米 / 秒，且无任何渣滓和碎屑。氮化铝的实验结果类似，只是一般生产率略低。在厚度分别为 0.4 毫米、1 毫米、3 毫米的蓝宝石切割实验中，切割速度达 12 毫米 / 秒、9 毫米 / 秒、3 毫米 / 秒。当然，实际切割速度还取决于切割形状及质量要求。

与准连续光纤激光器不同的是，绿光光纤激光器可进行烧蚀、微加工，能够在那些如聚合物、陶瓷土及金属等对热能敏感的基板上进行切割和钻孔。脉冲周期短，有助于减少热穿透；平均功率高、重复率高，有助于提高生产率。

上述两种光纤激光器可彼此互为补充，扩大激光加工的范围。为此，IPG 微系统部门为规模生产特别推出了一种新型激光工作站，可同时集成这两种激光器。

IPG Photonics Corporation

全球中心
50 Old Webster Road
Oxford, MA USA
T +1 508 373 1100
F +1 508 373 1103
sales.us@ipgphotonics.com

中国 北京
北京市经济技术开发区
景园北街2#BDA国际企业大道28#楼
T +8610-67873377
F +8610-67879294
sales@ipgbeijing.com
售后服务热线：400-898-0011