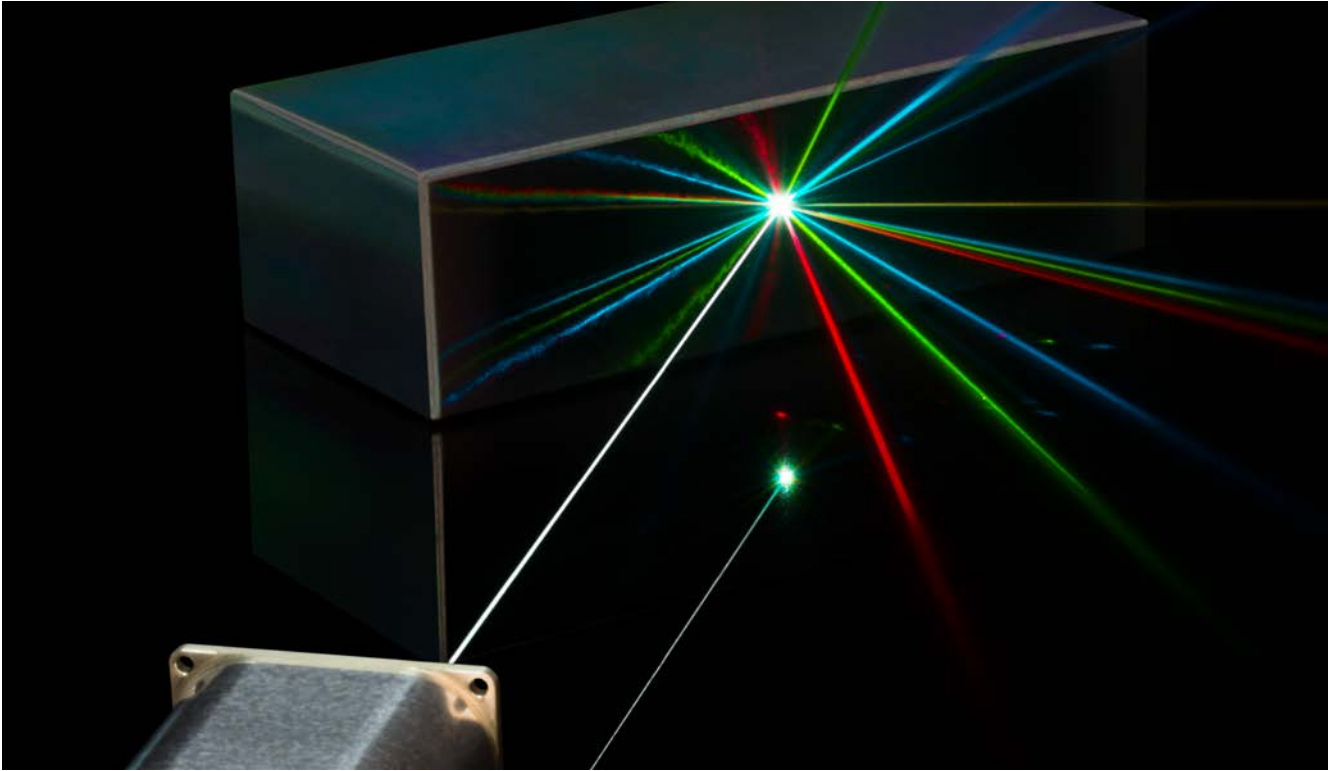


全息造影全波长解决方案：直接半导体激光器及倍频半导体激光器

半导体激光器现可为全息造影及光刻应用提供全波长解决方案，并在紫外及可见光波段提供新的波长



全息技术的实际应用范围广阔，涉及领域从信用卡，钞票以及护照上的全息防伪图到医疗成像和增强现实应用。

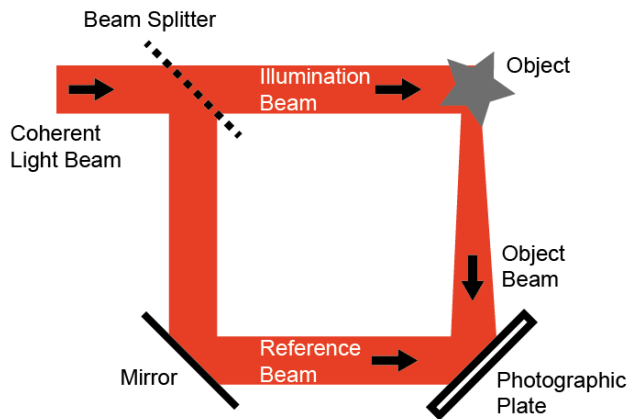
二十世纪四十年代末，Dennis Gábor 致力于提高电子显微镜分辨率的研究。彼时，他并未意识到自己的工作将对未来产生如此重大的影响。作为此研究的结果，他发现了能够显示物体完整 3D 图象的全息技术。随着激光的发明和普及，全息造影得以从实验室走向工业，转化为现今多元化应用的几十亿美元的产业。

目前全息技术实际应用广泛，从常见的信用卡，钞票以及护照上的全息防伪标志到医疗应用中的全息造影。同时利用全息技术制造的光学器件（如透射或反射光栅）亦在激光或光谱仪等多种应用中起着关键作用（见右图）。

全息技术相关器件的微集成技术已经发展相当成熟，例如分布式反馈激光二极管（DFB）以及分布式布拉格光栅激光二极管（DBR）或光纤布拉格光栅等。在不久的将来，随着增强现实技术（AR）逐渐进入消费市场，相关产业模块将会迎来显著增长。

光学全息原理自诞生以来至今并无重大变化（见图 1）。一束激光通过分束器分为两路——照射物体的照明光和直接发送到记录介质（通常是照相板）的参考光；参考光通过与物件反射回来的照明光干涉而产生干涉条纹，该条纹被记录于光敏基板中。在图像信息被收集记录之后，通过用相近波长光源照射基板便可产生相应的 3D 物象。

虽然首先在全息技术应用中广泛使用的激光是气体激光器，新一代的瓦级半导体激光正在逐渐取而代之成为市场主导。半导体激光器的主要优点在于几乎可以覆盖所有可用波长范围。标准的激光二极管可覆盖红外到可见光很宽的波段。而倍频技术的应用使得波长范围能够进一步延伸至紫外波长。¹

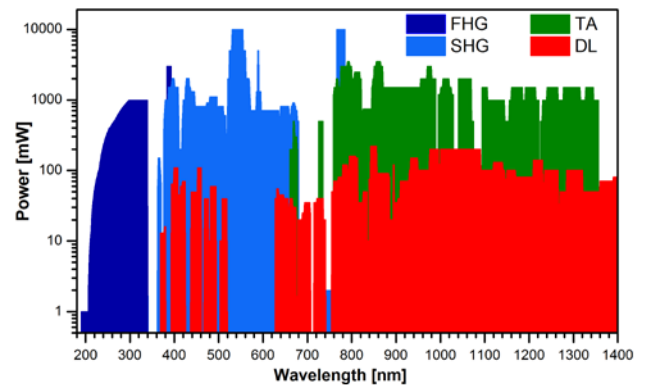


为了创建全息图，激光束被分为两部分：照明光用于照亮物体，物体反射的光入射到光敏基板上，并在这里与激光束的第二部分参考光相干涉，干涉条纹被记录在光敏基板上。

图 2 为 Toptica 公司可调谐半导体激光器的输出光谱覆盖范围，这直观地展示了半导体激光器可覆盖的超宽光谱范围。如图所示，光谱由深紫外（190nm）延伸至中红外（3500nm）波段，输出功率最高可达数瓦。其中包含了可见光（RGB）波长如 457, 532 及 647nm（见表格）。对于需要极高功率的应用，可用光纤放大器替代锥形放大器（TA）半导体增益芯片。例如我们的 SodiumStar 激光系统，它可以在 589nm 处发射 22W 功率，从而为天文望远镜提供人工导星。²

干涉条纹的分辨率对于在光刻中制造愈来愈小的电子设备十分重要，而更高的分辨率需要通过更短的波长来实现。历史上由于气体激光可在紫外波段提供部分标准波长，从而广泛应用于全息术及（非相干）光刻。而如今由于半导体激光波长范围的拓展，以及其操作便捷，光束质量好以及低操作成本等

优点，它们正逐渐在一些以前为气体激光所主导的应用领域占有自己的一席之地。



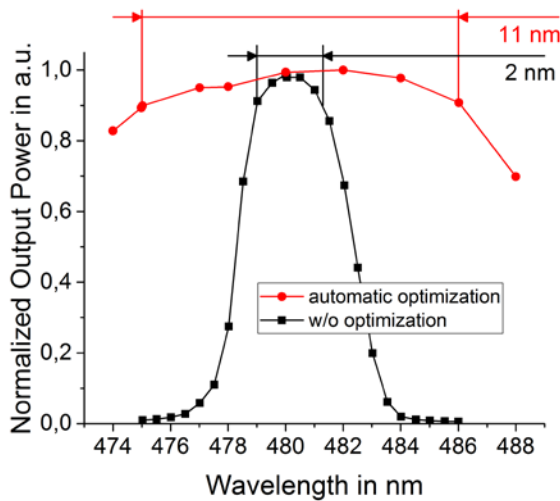
半导体激光可覆盖从 190nm 到 3500nm 的超宽波长范围。低功率光源（DL）可另行放大（TA）及倍频（SHG 二倍频, FHG 四倍频）。（图像由 Toptica Photonics 友情提供）

例如，这几年 407nm 的氮离子激光器已被 405nm 的半导体激光所取代。该波长可直接利用激光二极管实现；如果需要瓦级的功率，那么可以通过对高能量的，稳定且窄带的红外 IR 激光进行倍频而实现。而紫外波段可通过加入另外一个倍频腔而实现。半导体激光可在常用的紫外波长 266nm 处提供 300mW 相干激光输出，且近衍射极限（光束质量 M^2 典型值 < 1.2 ）

推动全息技术发展的关键应用

特殊光学半导体器件的制造需要在材料中通过全息技术产生光栅结构。实现该技术的典型波长 244nm 一般通过气体或半导体激光器倍频产生。对于常见波长 213nm，通常需通过五倍频脉冲 Nd:YAG 激光来实现，现在利用半导体激光器则可以保证在实现所有功能的前提下实现高功率连续输出。对于更短的波长，另一个重要进展是用氟代硼铍酸钾晶体（KBBF）作为倍频质。这使得半导体激光器可以取代准分子激光为全息技术提供 193nm 光源。

增强现实设备（AR）如微软的HoloLens代表了全息技术在新兴消费市场的应用。AR具有彻底改变工作场所节奏以及取代智能手机的潜力。另一个类似的大众市场应用是在汽车领域，其中重要的驾驶员信息，例如车辆的当前速度，可以使用抬头显示直接“在路上”投射。在列举的两种应用方向中，全息成像设备能够同时保证物象和周边环境的最优亮度。从而使得用户可以真正沉浸于增强现实体验中。

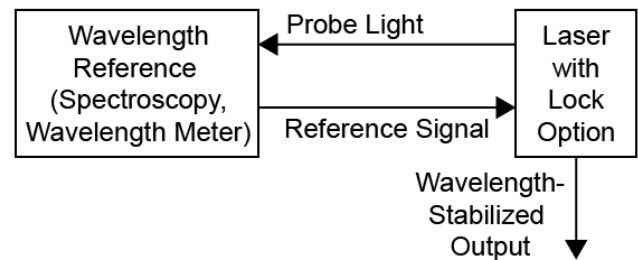
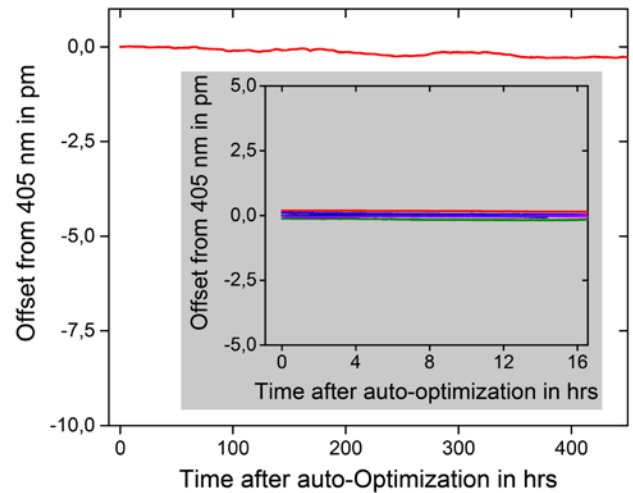


一台二倍频（SHG）半导体激光系统的自动调频，红色曲线为配备自动优化系统的输出功率，黑色曲线所示则未使用自动优化。可用调频区域，亦即功率高于90%峰值功率的区域，在自动优化系统协助下被拓宽了五倍。

因为照明用的LED或激光二极管，其发射波长常处于设计波长附近几纳米范围，因此投影图像会显得非常昏暗，甚至不可见。这是由成像光源同全息图像写入设备光源的波长误差导致的。这里，半导体激光器的另一个优点便得以显现，由于半导体激光波长的可调性，可以调节全息图写入激光使之与投影设备波长相匹配。

图3展示了以480nm为中心宽达14nm自动调频操作下的输出功率。未采用自动优化设置的激光（黑色曲线）仅有2nm的可用调节范围，而后能量便衰减至峰值能量的90%以下；而采用自动优化调频技术的半导体激光器

（红色曲线）可在大于11nm的范围内进行调谐并保持90%以上的总能量，这使得激光可用调谐范围扩大了整整5倍。



405nm处自由运转激光系统的残余波长漂移，可以看到在400多小时后漂移值远小于1pm；通过多次优化调节（图示每一条曲线代表一次优化测得的相应数据），激光可找到一个可靠的最佳运行波长从而开始稳定运转。整个测量过程中没有观察到跳模现象（测量过程见小图）。对于激光系统的主动稳频机制是通过引入外部频率参考来实现的，例如利用吸收光谱气室（可用于390.1 nm或397.5 nm）或波长计（对所有波长适用）。在实际情况下，波长的稳定性受到参考波长的限制(b)。

半导体激光系统从其物理特性上来说是高能效的，一般功耗小于100W。与功耗极大的气体激光相比，这能够为用户节约上百万千瓦时的能耗。另外，半导体激光器无需水冷，这不仅简化了激光器设施以及激光操作，同时进一步降低了原本就相对低廉的成本。针对全息影像录制过程中对空气扰动或声学噪声的极端敏感（扰动可能会导致成像不可用），半导体激光可避免使用风冷而采用被动冷却设置。通过提供经济有效的现场可更

换元件（FRUs），可保证极佳的可维护性，这些元件主要由结构紧凑的光学半导体器件组成。

相干性维持

相干长度是全息光源的关键参数。全息图像的写入过程要求相干长度与物体和成像媒介的大小相当。原则上讲，相干长度必须至少等于照明光与参考光间的光程差从而保证其在光敏基板上能够形成干涉。

由于其单频特性，一般情况下可调谐半导体激光器可提供大于 100m 的相干长度。另外，通过激光控制器的锁频模块可将两台激光进行相位锁定。这样参考光亦可在成像媒介附近直接由第二台激光提供。

在某些应用中，绝对波长和波长稳定性十分关键。在没有额外干预的情况下，自由运转的半导体激光器输出波长会出现残余漂移。而通过内置气压补偿可有效抑制这些漂移的

发生（见图 4a）。同时由于不使用水冷，高频的波长抖动亦可忽略。

若需要绝对波长参考，则可将参考光谱模块连接至系统。例如，由铷原子气体的 D 线提供的 390.1 nm 和 397.5 nm 的绝对参考系统已经实现（见图 4b）。通过运用包含全数字锁频功能的波长计并更换参考气室，该原理可推广至其余所有波长

如上所述，半导体激光不仅在常用波长上能够满足全息造影及光刻应用的要求，其波长覆盖范围还包括紫外以及可见光范围。另外，在其优异的技术表现之外，半导体激光系统相比传统激光还具有许多“非技术”附加优势，尤其是方便的设置，简易的操作以及经济实惠的成本。这些特点使得半导体激光器在全息应用领域的优势十分明显。

REFERENCES

1. U. Eismann et al., “短，更短，最短：深紫外波段的半导体激光器” *Laser Focus World*, 52, 6, 39 - 44 (2016); see <https://goo.gl/Ys9SRm>.
2. B. Ernstberger et al., “坚固可靠的远程泵浦钠原子激光光源——高端激光雷达及导星应用” *Proc. SPIE*, 9641, 96410F (2015).
3. M. Scholz et al., *Appl. Phys. Lett.*, 103, 051114 (2013).
4. U. Eismann et al., “高能紫光倍频半导体激光的主动及被动稳频机制” *CLEO 2016*, JTu5A.65 (2016).

Authors:

Ulrich Eismann 是 Toptica Photonics 非线性半导体激光系统产品经理；公司网站：www.toptica.com。