

文章编号: 1001-4322(2011)05-1177-05

高功率半导体激光对光学元件损伤特性*

郭汝海, 时 魁, 王恒坤, 王 兵

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 长春 130033)

摘 要: 为研究 880 nm 高功率半导体连续激光器对光学元件的损伤特性, 选择了 K9 玻璃、ZnSe 晶体和无氧铜进行镀膜加工, 形成高反射率和高透过率的光学元件。通过调节到达光学元件表面的平均功率和改变光斑大小来改变光学元件表面的功率密度, 并连续照射 30 s, 最终通过显微镜来观察元件的激光损伤形貌。研究表明: 镀高反膜的 K9 玻璃在功率密度达到 600 W/cm^2 时, 膜系表面出现烧熔现象, 当达到 $1\,000 \text{ W/cm}^2$ 时出现炸裂现象, 而无氧铜基底镀金反射镜在上述功率密度下未发现损伤; 而镀增透膜的 ZnSe 晶体在激光功率密度高达 $1\,000 \text{ W/cm}^2$ 时, 通过显微镜观察没有发现明显的损伤, 热像仪显示基底温升为 5°C 。

关键词: 半导体激光器; 高功率; 激光损伤; 功率密度

中图分类号: TN241; O484.4 文献标志码: A doi: 10.3788/HPLPB20112305.1177

高功率激光器已经广泛的应用于工业加工等领域^[1,2], 特别是目前高功率激光器的研究热点已经从气体和化学激光器逐渐向全固态的激光器过渡, 其中半导体激光器作为固体激光器的泵浦源具有体积小、重量轻、寿命长、高转换效率等优点而受到了广泛关注^[3,4]。目前, 半导体激光器已经成功地应用在激光测距、激光点火、主动照明和自由空间通讯等领域^[5,6], 但这些都要求高功率的半导体激光器在长时间工作下不能有明显的性能下降。而在传输光路中即使很小的光学损伤都会影响激光系统的光束质量, 从而大大降低激光系统的性能指标。这就要求在高功率激光传输的光路上, 对其光学元件(反射镜、透镜、分束镜和探测器等)的损伤有清晰的认识。波长 880 nm 的半导体激光器相比于传统的 808 nm 的半导体激光器具有明显优势: 当它泵浦 Nd:YVO₄ 晶体时, 可明显降低斯托克斯位移, 提高量子效率, 使热透镜效应下降 60%^[7]。国内研究高功率激光损伤大都集中在 Nd:YAG 激光器^[8,9], 波长为 1 064 nm, 对高功率的 880 nm 半导体激光损伤的研究还少有报道。本文对 kW 量级的 880 nm 激光对镀膜的反射、透射光学元件的损伤进行实验研究, 其中选择了高功率激光系统中最常见的几种光学材料(K9 玻璃、ZnSe 晶体和无氧铜), 以期探讨这些光学元件在高功率 880 nm 激光下的损伤特性, 特别是在 $1\,000 \text{ W/cm}^2$ 以上的损伤特性。

1 实验装置及分析

1.1 实验装置

半导体激光器采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 880 nm 半导体激光器, 半导体激光器的参数如表 1 所示。采用 Spiricon 公司的光束质量分析仪测量光强分布, 其光强分布如图 1 所示。从图中可以看出其分布为准高斯分布。利用此半导体激光器发出的激光束经过透镜后, 在透镜后的光束直径逐渐缩小达到焦点, 这样就可以通过控制检测镜片与透镜后的距离来调整激光光斑的直径尺寸, 这样在某一光斑尺寸下, 调整激光器的输出功率就可以达到指定的功率密度。激光对测试镜片的损伤还和热累积相关, 设定照射时间为 30 s, 利用 50 倍显微镜观察照射后的镜片及薄膜是否出现损伤。

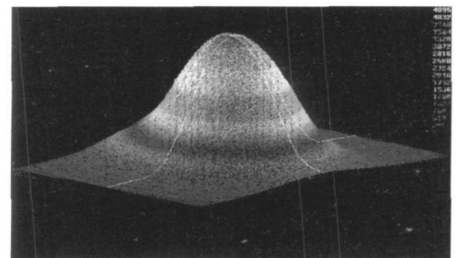


Fig. 1 Output light intensity distribution of high-power 880 nm semiconductor laser (2 m away)
图 1 高功率 880 nm 激光器 2 m 处光强分布

* 收稿日期: 2010-11-20; 修订日期: 2011-01-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目; 吉林省自然科学基金项目(201115123)

作者简介: 郭汝海(1976)男, 副研究员, 博士, 从事激光器设计与光束控制方面研究; hitgrh@163.com。

表 1 高功率 880 nm 激光器参数

Table 1 Parameters of high-power 880 nm laser

power/W	central wavelength/nm	spot size	divergence/mrad	efficiency/%
1 008.2	878.4	21.4 mm 36.4 mm	6.02	35

实验的光路原理图和实物图如图 2 所示。实验用半导体激光器可以通过调节电流值来控制激光功率输出, 电流值和平均功率输出的关系成线性变化, 这样在室温下用功率计测得的功率值和电流值是一一对应的。图 3 给出了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所检测中心对半导体激光器的检测结果曲线。从检测曲线中可以看出, 此激光器的峰值波长约为 880 nm, 出光阈值电流为 8.3 A, 输出平均功率可达 kW 量级。此外, 实验系统还包括 ZnSe 透镜($f = 100$ mm)、功率计、直尺、分规、显微镜、热像仪及测试镜片等。

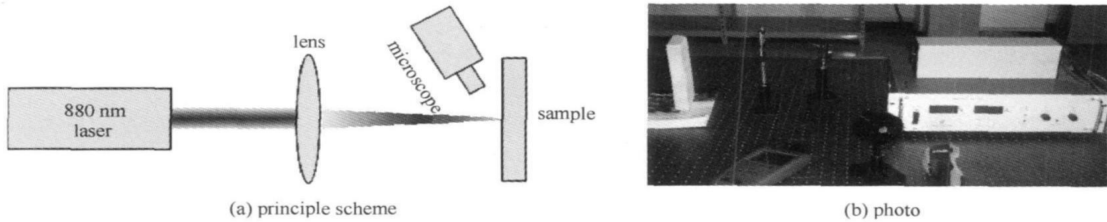


Fig. 2 Schematic and photo of experimental setup

图 2 实验光路图和实物图

图 2 实验光路图和实物图

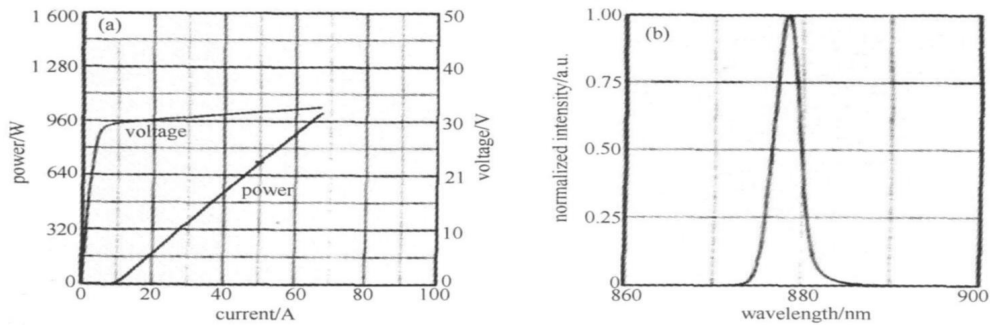


Fig. 3 Power/voltage current relation and wavelength of laser

图 3 激光器功率与电流关系及其波长检测图

1.2 实验适用性的理论说明

当激光照射到光学元件表面时, 只有被材料吸收, 才能产生后续的热效应。按照近代物理的观点, 单色性极佳的 880 nm 激光器在光学材料表面与材料的微观粒子的相互作用是一个全量子化的能量交换过程。特别是强激光照射的光子流量十分巨大, 能量交换的量子化已经基本不能察觉, 在激光加工等应用场合, 可以用经典的概念来描述光束与固体材料的相互作用。

激光入射到材料表面后, 能量一部分被反射或透射, 剩余能量则被物体吸收。能量守恒定律可以简单地写成

$$E_0 = E_r + E_a \quad (1)$$

式中: E_0 为入射的激光总能量; E_r 为材料反射的能量; E_a 为材料吸收的能量。式(1)两边同时除以 E_0 后得

$$1 = E_r/E_0 + E_a/E_0 = R + \quad (2)$$

式中: R 为反射系统的反射率; α 为表面吸收系数。同理, 对于透射系统也可以用式(1), (2)表示。在垂直入射下, 以反射为例, 材料表面的吸收系数就可以表示为

$$\alpha = 1 - R = 1 - |(n-1)/(n+1)|^2 \quad (3)$$

式中: n 为材料的折射率。而折射率又是波长的函数, 在通常情况下, 对于同一材料, 波长越短, 吸收系数越大。因此研究 880 nm 波长激光对同一种光学元件的损伤特性, 在一定程度上也可以表明更长波长的激光, 如工业使用较普遍的 CO_2 激光 (10.6 μm) 也可以参考或借鉴本实验结果。

2 实验步骤

依次用功率密度为 300, 600 和 1 000 W/cm² 的激光束对反射镜片和透射镜片进行损伤实验, 实验的样品依次为镀高反射膜的 K9 玻璃、镀金无氧铜反射镜和镀增透膜 ZnSe 晶体。其中 K9 玻璃镀膜后对应 880 nm 的反射率可达 99.5%; 无氧铜镀膜反射率曲线接近 98%, 如图 4(a) 所示; 图 4(b) 为一公司提供的 ZnSe 基底材料激光透过率曲线, 可以看到 ZnSe 基底材料对宽波段激光均有较好的透过率。

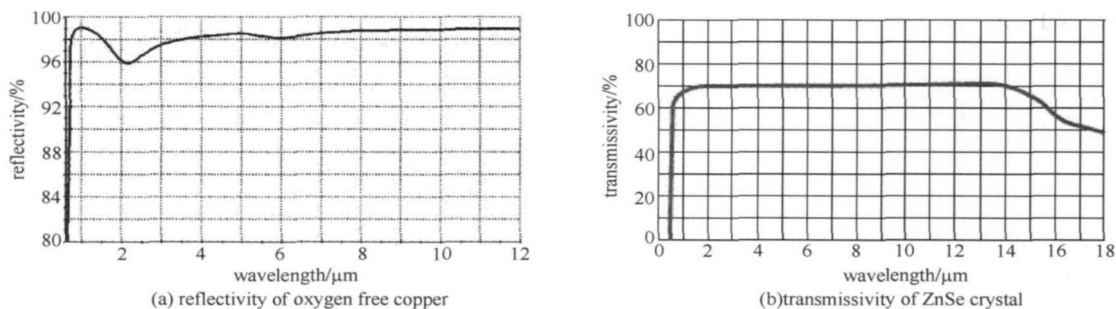


Fig. 4 Reflectivity of oxygen free copper and transmissivity of ZnSe crystal

图 4 无氧铜镀膜反射率曲线和 ZnSe 基底材料透过率曲线

具体的实验步骤为: (1) 根据镜片的大小和对应功率密度的要求, 计算合适的输出功率和对应的光斑大小; (2) 打开激光器, 调整透镜位置, 确保激光束光轴与透镜光轴重合, 使激光束全部打在透镜上, 然后锁死透镜; (3) 把功率计放在透镜后, 调节电流使激光输出功率达到所需功率值, 记下此时对应的电流值, 然后把电流值归零; (4) 重新开启激光器, 在达到阈值电流以上, 能看清光斑的情况下, 将标有刻度的挡板放在透镜后面, 前后移动挡板直到获得所需的光斑大小, 记下该点的位置, 用分规比较光斑 x, y 方向的对称性, 然后关掉激光器; (5) 把实验镜片放置在上一步所确定的位置上, 打开激光器调整测试镜片的高度, 使激光束正好打在镜片的中心处, 然后关掉激光器; (6) 冷却几 min 后, 打开激光器, 用耐火砖先遮拦激光器, 直到电流值调到第 3 步所确定的功率值, 然后迅速移开耐火砖开始计时, 使激光束完全照射到测试镜片中心位置; (7) 持续照射 30 s 后关掉激光器, 取出实验镜片利用显微镜观察镜片及薄膜是否出现损伤。

3 实验结果

通过以上实验步骤, 分别就 3 个不同的功率密度进行了激光损伤实验, 其中镀高反膜的 K9 玻璃在功率密度为 300 W/cm² 时, 通过显微镜观察, 未发现明显损伤; 600 W/cm² 时, 出现了大面积烧蚀; 当功率密度增加到 1 000 W/cm² 时, 出现了炸裂, 说明镀高反膜的 K9 玻璃不适合较高功率密度 880 nm 激光的长时间照射, 只能应用于较低功率密度的场合。分析原因主要是高功率激光功率密度下, 虽然高反膜反射了大部分的激光能量, 但经过一定时间激光辐照后, K9 玻璃累积的温升会使表面膜系发生烧蚀, 继续增大功率密度会使基底材料热应力增大而出现炸裂现象。实验的参数如表 2 所示, 样品损伤形貌如图 5 所示。

表 2 镀高反膜的 K9 玻璃 880 nm 激光损伤实验结果和参数

Table 2 Parameters and results for laser-induced damage experiments of high-power 880 nm laser irradiating K9 glass with high-reflectivity film

power/W	spot size/mm	power density/(W cm ⁻²)	results
37.68	4	300	no damage
117.75	5	600	ablation
125.60	5	1 000	burst

而对于无氧铜和镀增透膜的 ZnSe 晶体均进行了上述功率密度的实验, 在高达 1 000 W/cm² 功率密度以上均未发现明显损伤, 无氧铜和 ZnSe 样品实物如图 6 所示。通过 50 倍显微镜观察 880 nm 激光辐照后的 ZnSe 样品, 并在辐照后马上用热像仪观察温升, 测出温升比环境温度高 5 °C, 结果如图 7 所示。分析原因为无氧铜虽然反射率略小于 K9 玻璃, 但是比热容远远大于 K9 玻璃, 累积的热量可以很快扩散到周围环境中去。而镀增透膜的 ZnSe 晶体样品对 880 nm 波长的激光具有很高的透过率, 材料热吸收系数很小, 同样适合于 1 000 W/cm² 功率密度以上的激光应用。

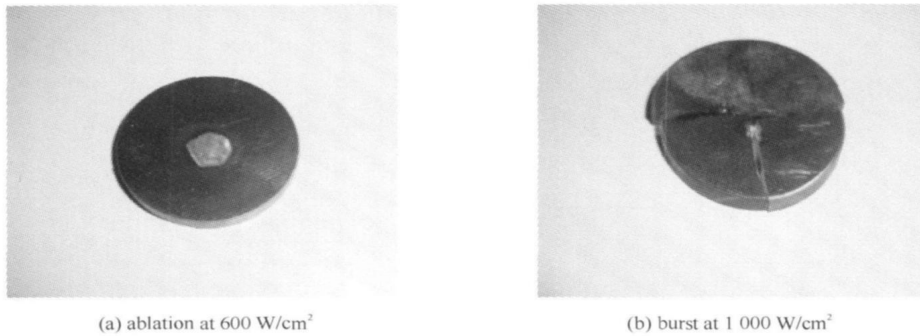


Fig. 5 Laser-induced damage on K9 glass samples

图 5 K9 玻璃样品损伤形貌

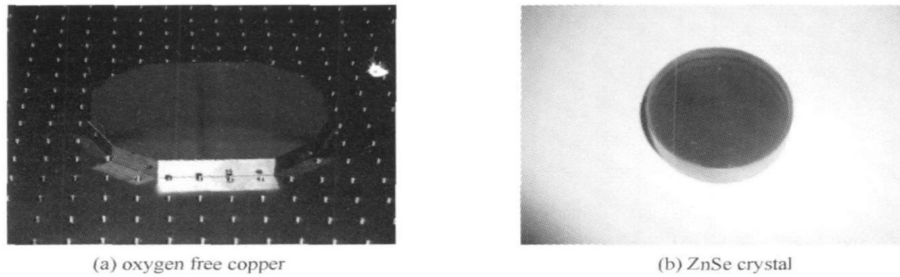
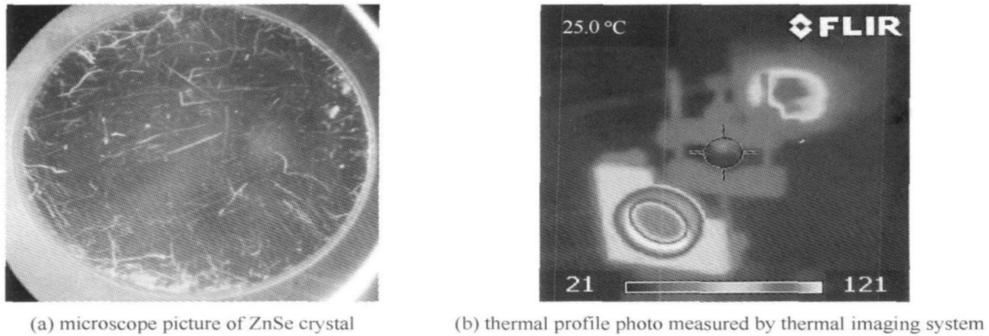


Fig. 6 Photos of oxygen free copper and ZnSe crystal samples

图 6 无氧铜和 ZnSe 晶体样片实物图

Fig. 7 Microscope picture of ZnSe crystal and thermal profile measured by thermal imaging system after irradiation of 1 000 W/cm²图 7 1 000 W/cm² 激光辐照后的 ZnSe 显微镜照片和热像仪测温图

4 结 论

本文选择具有良好应用前景和准高斯光强分布的 880 nm 的高功率半导体激光器作为光源,进行了常见的反射式和透射式光学元件激光损伤对比实验。实验结果表明:在 880 nm 波段高功率激光应用,反射元件要选择比热容大的光学材料,如较大尺寸的无氧铜反射镜;透射元件应选择透射率较高、吸收系数较小的晶体材料,如宽波段透过率较高的 ZnSe 晶体。本文的实验结果为高功率 880 nm 激光器的光学系统设计及光学材料选择,特别是高达 1 000 W/cm² 功率密度的传输上,在不破坏光束质量的前提下,提供了参考。

参考文献:

- [1] 郭汝海. 化学氧碘激光器(COIL)的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(5): 22-28. (Guo Ruhai. Development review of chemical oxygen-iodine lasers (COIL). *OME Information*, 2010, 27(5): 22-28)
- [2] 郭汝海, 郭劲, 郭立红, 等. 激光辅助加工三维功能化零件[J]. 中国激光, 2008, 35(s2): 267-270. (Guo Ruhai, Guo Jin, Guo Lihong, et al. Laser assisted manufacturing of three-dimensional functional accessory. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(s2): 267-270)
- [3] 李元栋, 华卫红, 王红岩, 等. 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 091405. (Li Yuandong, Hua Weihong, Wang Hongyan, et al. Research development of linewidth narrowing of high power diode lasers. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2010, 47: 091405)

- [4] Zhu P, Li D J, Hu P X, et al. High efficiency 165 W near-diffraction-limited Nd:YVO₄ slab oscillator pumped at 880nm[J]. *Opt Lett*, 2008, **16**(11): 2120-2126.
- [5] 赵兴海, 高扬, 程永生. 激光点火技术综述[J]. 激光技术, 2007, **31**(3): 306-310. (Zhao Xinghai, Gao Yang, Cheng Yongsheng. A summary of laser ignition technology. *Laser Technology*, 2007, **31**(3): 306-310)
- [6] 王祥鹏, 彭宇航, 李再金, 等. 880 nm 半导体激光主动照明光纤耦合模块[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(7): 1500-1504. (Wang Xiangpeng, Peng Yuhang, Li Zaijin, et al. 880 nm high-power fiber-coupled diode laser module for active illumination. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1500-1504)
- [7] Ding X, Wang R, Zhang G H, et al. High efficiency Nd:YVO₄ laser emission under direct pumping at 880 nm[J]. *Opt Commun*, 2009, **282**: 981-984.
- [8] 胡建平, 张问辉, 段利华, 等. 透射光学元件的 1 064 nm 激光损伤特性[J]. 光学与光电技术, 2006, **4**(6): 49-51. (Hu Jianping, Zhang Wenhui, Duan Lihua, et al. Laser-induced damage of transmission optics at 1 064 nm. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(6): 49-51.
- [9] Yu Changqing, Zhou Shouhuan, Yan Jixiang, et al. Laser induced damage in the glass window at 1.064 μm[C]//Proc of SPIE. 2005, **5629**: 444-449.

Damage in optical components induced by high power semiconductor laser

Guo Ruhai, Shi Kui, Wang Hengkun, Wang Bing

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: This paper investigates the damage in optical components induced by an 880 nm high-power semiconductor CW laser. The optical components irradiated are high-reflectivity or anti-reflectivity components based on K9 glass, oxygen free copper and ZnSe crystal. The power density of irradiation on component surface is adjusted by changing laser average power and spot size there, and each component is continuously irradiated for 30 s. The laser-induced damage morphology observed by microscope shows that, for K9 glass coated with high-reflectivity film, large-area ablation appears on the surface at the power density of 600 W/cm² and burst at 1 000 W/cm². However, no apparent damage is observed on the gilded oxygen free copper and the ZnSe crystal coated with anti-reflectivity film at the above two power densities. Moreover, the temperature rise of ZnSe crystal with anti-reflectivity film is only 5 °C measured by thermal imaging system at the power density of 1 000 W/cm².

Key words: semiconductor laser; high power; laser-induced damage; power density