

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0133-05

高平均功率固体激光及其大气传输*

强希文

(中国人民解放军 63655 部队, 新疆 马兰 841700)

摘 要: 固体激光器是一种具有重要应用背景的高功率激光器, 对包括激光波长、光束发射口径、发射功率、光束质量等在内的激光器参数的选择进行了分析, 研究了大气介质的光学性质、激光大气传输效应以及激光辐射与靶目标的耦合机制与耦合效率等因素的影响。相关结果表明 100 kW 的固体激光器的综合效能可与 2~3 倍平均输出功率的 DF 化学激光器相当, 这说明高平均功率固体激光器是一种具有潜在优势和良好发展前景的高功率激光器。

关键词: 激光技术; 固体激光; 高功率激光; 激光大气传输

中图分类号: O437; TN241 **文献标识码:** A

电驱动的高平均功率固体激光器(SSL)与化学激光器相比, 由于不使用化学物质, 所以没有废气排出, 而且不需要特别的保障条件, 只需要利用车载发动机即可保证其正常工作; 另外, 由于它不产生高温及烟雾, 同时系统运行时无噪音, 仅受车载电源及驱动系统的限制, 所以高功率固体激光器具有化学激光器无法比拟的优势。现有的实验已经证实利用热容方式运行的固体激光器, 其平均功率可超过 10 kW, 而且有望在将来达到 100 kW^[1,2]。目前, 已经开始了 100 kW 热容固体激光器的概念设计, 它可以对所感兴趣的靶目标形成显著的破坏, 所以, 100 kW 已经作为固体激光器系统及其对靶目标形成破坏的功率标准。另外, 热容固体激光器具有较高的功率质量比, 这在系统的小型化方面具有无可比拟的优势, 而且便于机动化。

选择固体激光器的一个重要问题是其到达目标处的平均功率为多大。由于这不但涉及到激光器系统的性能, 包括光束发射功率、光束质量、光束发射口径、激光波长等, 而且与其传输的大气介质的光学性质、激光大气传输效应以及激光辐射与靶目标的耦合机制与耦合效率等因素密切相关。所以, 需要对以上因素进行综合考虑。本文对影响高平均功率固体激光大气传输的相关参数进行了探讨, 并根据国外有关文献, 讨论这些参数对 1.06 μm 的固体激光与 3.8 μm 的 DF 化学激光大气传输的影响效果。

1 激光器系统设计

1.1 激光器的波长选择

高平均功率固体脉冲激光器是基于在固体晶体中掺入钕(Nd)离子和镱(Yb)离子, 从而激发产生 1 μm 波长的激光, 其波长位于电磁波谱的近红外区, 与位于中红外的 DF 激光的波长相差较远, 大致是 DF 激光波长的 1/4, 所以其特征也与 DF 激光明显不同。

对于激光系统而言, 激光波长与由于衍射而引起的光束发散、大气湍流引起的光束畸变、大气分子和气溶胶粒子的吸收与散射导致的光束能量的衰减以及由此而引起的大气热晕效应等因素密切相关, 所以激光波长是激光器系统的一个重要参数。

由于 1 μm 波长的激光其波长相对较短, 所以在减小衍射方面具有明显的优势, 另外, 在某些情况下, 它在减小分子吸收上也同样有明显的优势。由于大气对激光束能量的吸收可导致传输光束形成热晕效应, 从而使得激光束形状产生畸变、光束质量下降, 影响激光与靶目标耦合效果。虽然大气湍流对 1 μm 波长的固体激光的影响与 DF 激光相比较, 但是由于目前自适应光学技术的应用, 可使得大气湍流对以上两种激光的影响甚小, 其差别也不显著。

1.2 光学衍射与发射口径

由于光波的波动性, 发射的激光束均具有由于衍射引起的较小的光束发散角, 该发散角正比于波长, 另外, 光束在焦斑处的最大光强和束散角的平方成反比。基于这个原因, 假设光束直径和功率相同, 则 1 μm 的固体

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-03-16

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 强希文(1967—), 男, 陕西西安人, 硕士, 副研究员, 主要从事激光大气光学等方面的研究; E-mail: xiwen_qiang@163.com。

激光到达靶目标处的最大光强大致是 $3.8 \mu\text{m}$ 的 DF 激光的 13 倍。

除了衍射因素之外,还有许多因素可引起比较衍射极限更大的光束发散,这些因素包含大气湍流、热晕和在激光器系统和光束控制系统中未经补偿的光束畸变。由大气湍流和光束控制系统的光学器件引起的畸变可以利用自适应光学的变形镜来校正,而热晕效应引起的非线性束发散很难校正,所以应尽量使其最小。由于光束的衍射极限与发射口径相关,波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 的 DF 激光器的发射口径为 $1 \mu\text{m}$ 的固体激光器的 3.6 倍时,两者的衍射极限大致相同。而光束发射系统的口径增大同时引起系统体积、质量的增加,系统跟瞄难度增加,从而使得利用增加发射口径减小光束发散角显得不太现实。表 1 是平均发射功率为 200 kW、光束发射直径 30 cm 的激光系统传输 5 km 距离后,理论计算给出的不同波长激光到达靶目标处的最大光强以及光斑参数的比较。

表 1 不同波长激光到达靶目标处的最大光强以及光斑参数

Table 1 Peak irradiance and spot parameters on targets for various lasers

| parameters of spot on target | $3.8 \mu\text{m}$ (DF lasers) | $1.315 \mu\text{m}$ (COIL) | $1.06 \mu\text{m}$ (SSL) |
|--|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| spot diameter/cm | 7.6 | 2.6 | 2.1 |
| spot area/ cm^2 | 45.4 | 5.3 | 3.5 |
| irradiance/ $(\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 4.4 | 37.7 | 56.6 |

2 大气传输效应

2.1 大气吸收和热晕

当激光束向靶目标传输时,其部分能量将被大气吸收。这种吸收有两个重要的影响,其一是导致光束的功率减弱,传播到目标上的光强减小;另一个更重要的是大气吸收将使得光束传输通道的大气加热,光束形状发生畸变,产生热晕效应,这将进一步增加光束的发散和减小靶目标处的光强。热晕效应与光强分布呈非线性关系,另外,大气中垂直于光束传输方向的风速也与热晕密切相关,而大气风速呈现随机性,使得不可能利用自适应光学技术对热晕进行预校正。

引起热晕效应的因素有两种:大气分子吸收和气溶胶吸收。大气分子吸收是由于大气分子吸收激光能量,导致能级跃迁。对于分子吸收, $1 \mu\text{m}$ 波长的固体激光有很多优势。当波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 的 DF 激光在海平面上的吸收为 $(5\% \sim 6\%)/\text{km}$ 时, $1 \mu\text{m}$ 的大气分子吸收可以忽略。即使在不考虑热晕影响的情况下, $5\%/\text{km}$ 的吸收衰减将导致在大气中传播 10 km 后能量损失 40%。在所有的情况下,大气分子对 $1 \mu\text{m}$ 波长固体激光的吸收系数均小于 $0.01\%/\text{km}$ 。另一种引起热晕效应的因素是大气气溶胶的吸收,即大气中分布的液体或固体微粒对激光束能量的吸收。这种气溶胶包括灰尘和烟雾。由于气溶胶并不是大气的气态成分,所以它们的成分和浓度随着天气条件、地理位置、海拔高度和当地局地地形等因素变化。为了说明气溶胶吸收的量级,利用 LOWTRAN7 软件,在海拔高度为 $0 \sim 2 \text{ km}$ 时利用边界层模型^[3]、海拔高度在 2 km 以上时利用对流层模型,表 2 给出乡村条件下不同能见度时大气气溶胶的吸收系数的高度分布。

表 2 乡村条件下不同能见度时的大气气溶胶吸收系数

Table 2 Absorptive coefficient of aerosol vs visibilities for rural areas

| altitude/km | absorptive coefficient for $3.8 \mu\text{m}$ (DF lasers)/ $(\% \cdot \text{km}^{-1})$ | | absorptive coefficient for $1.315 \mu\text{m}$ (COIL)/ $(\% \cdot \text{km}^{-1})$ | | absorptive coefficient for $1.06 \mu\text{m}$ (SSL)/ $(\% \cdot \text{km}^{-1})$ | |
|-------------|---|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|
| | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ |
| 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 1.6 | 0.7 | 1.8 |
| 1.0 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 1.9 | 0.5 | 2.0 |
| 2.0 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 3.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 4.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 5.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

如果只考虑大气分子的吸收,则结论可能是固体激光束的传输不受热晕效应支配。尽管对于 $1 \mu\text{m}$ 波长的激光,其大气分子吸收可以忽略,但是表中的吸收系数表明 $1 \mu\text{m}$ 波长激光的大气气溶胶粒子的吸收是不能忽略的。在 10 km 能见度条件下, $1 \mu\text{m}$ 波长气溶胶吸收达到 $2\%/\text{km}$,可与 $3.8 \mu\text{m}$ DF 激光的 $0.4\%/\text{km}$ 的气

溶胶吸收和(5%~6%)/km 的分子吸收相比较。

以上讨论没有考虑烟雾中存在的碳质气溶胶对激光束的吸收,表 3 给出了城市碳质气溶胶在不同能见度时吸收系数的对比情况。可以看出碳质气溶胶对 1 μm 波长的激光的吸收要比 3.8 μm 的吸收强烈。

表 3 城市碳质气溶胶不同能见度时吸收系数的对比

Table 3 Absorptive coefficient of carbonaceous aerosol vs visibilities for urban areas

| visibility/km | absorptive coefficient for 3.8 μm (DFL)/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ | absorptive coefficient for 1.06 μm (SSL)/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ |
|---------------|---|--|
| 23 | 0.9 | 2.3 |
| 10 | 2.7 | 6.7 |

对于碳质气溶胶,23 km 能见度下的 1 μm 波长激光的吸收系数增长了大约与 10 km 能见度乡村条件下相同大小的值(2%/km)。尽管 10 km 能见度下 1 μm 波长激光的碳质气溶胶吸收系数相当大,但是当同时考虑大气分子和气溶胶的吸收时,这个值仍然小于 3.8 μm 波长激光在所有情况下的大气吸收。

2.2 大气散射

大气散射主要是指当光波与其传输路径上不规则分布的小微粒作用时产生的光学衍射,这是引起激光束能量衰减的另一个重要因素。值得注意的是,与大气的光学吸收不同,光学散射并不会在大气中储存热量,从而不会产生热晕效应。

瑞利散射描述了大小与波长可比拟的微粒的散射,主要是大气分子的散射,其散射导致的衰减与波长的 4 次方成反比。由于瑞利散射在 1 μm 波长的固体激光和 3.8 μm 波长的 DF 激光系统中影响很小,所以在这里不考虑这种散射。利用 LOWRAN7 软件和与表 2 中相同的大气气溶胶模型,则光学散射是高度的函数,表 4 给出了乡村条件不同能见度时大气气溶胶散射消光系数。与大气气溶胶吸收的情况类似,表 5 给出了城市碳质气溶胶不同能见度时大气气溶胶散射消光系数。

表 4 乡村条件不同能见度时大气气溶胶散射消光系数

Table 4 Scattering coefficient of aerosol vs visibilities for rural areas

| altitude/km | scattering coefficient for 3.8 μm laser/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ | | scattering coefficient for 1.315 μm laser/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ | | scattering coefficient for 1.06 μm laser/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ | |
|-------------|---|---------------------|---|---------------------|--|---------------------|
| | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ | $V_m=23 \text{ km}$ | $V_m=10 \text{ km}$ |
| | 0.0 | 1.6 | 3.8 | 4.6 | 10.9 | 6.0 |
| 1.0 | 0.9 | 3.5 | 2.7 | 10.5 | 3.6 | 13.9 |
| 2.0 | 0.5 | 0.6 | 1.7 | 1.7 | 2.3 | 2.3 |
| 3.0 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.8 | 1.1 | 1.1 |
| 4.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 5.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |

表 5 城市碳质气溶胶不同能见度时大气气溶胶散射系数

Table 5 Scattering coefficient of carbonaceous aerosol vs visibilities for urban areas

| visibility/km | scattering coefficient for 3.8 μm (DFL)/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ | scattering coefficient for 1.06 μm (SSL)/(%) $\cdot \text{km}^{-1}$ |
|---------------|---|--|
| 23 | 2.2 | 7.3 |
| 10 | 5.3 | 18.0 |

2.3 大气湍流

当激光束在湍流大气中传播时,大气湍流可使得光束发生畸变。其中对光束传输造成影响的大气折射率起伏主要是由于大气温度起伏所致,它可导致光束的跟瞄误差和增加到达预定靶目标处光束的发散。在惯性子区间大气湍流满足局地均匀各向同性条件,可以利用 Kolmogorov 定律^[4]描述。当考虑大气湍流所致的光束发散时,引入大气相干长度^[5](一般记为 r_0)是非常有用的。此时在靶目标处的时间平均焦斑直径可以认为与孔径为 r_0 的衍射极限光束一致。当大气湍流增加而相应的 r_0 减小时,辐照在靶目标处的光斑直径相应增加。利用大气湍流的 Kolmogorov 理论,则可以得到 r_0 的大小与 $\lambda^{1.2}$ 成正比,激光束的时间平均束发散与 λ/r_0 成正比,靶目标处的光斑直径与 $\lambda^{-0.2}$ 成正比,其中 λ 为激光波长。

由于大气湍流导致的光束畸变是一个线性过程,而且可以利用目前较为成熟的自适应光学技术进行校正。但是对于未经校正的光束,当光束发射口径相同时,1 μm 波长的激光光斑大小是 3.8 μm 波长的 1.3 倍。

3 能量传输与耦合

3.1 连续波激光的传播

考虑前述大气传输效应,引入了中纬度夏季大气模型,在能见度为 23 km 的乡村气候条件下,假设风速为 2.5 m/s,假定 3.8 μm 和 1 μm 两种波长的激光束的平均功率均为 200 kW,光束发射口径为 30 cm,两种光束均假设为具有两倍衍射极限的光束发散,光束旋转角速率分别设置为 5 mrad/s 和 50 mrad/s。作为比较,图 1 给出了靶目标处光强为 5 kW/cm² 时作为距离和高度函数的光强等值线。

可以看出,对于两种角速率,1 μm 波长激光束有一个明显的增强(大于 2 倍)范围。由于发射光强反比于传输距离的平方,所给结果说明 1 μm 波长激光束较 3.8 μm 波长激光束的大气传输具有明显的优势。

这意味着在这些条件下,1 μm 波长激光束到达靶目标时的平均光强大约是 3.8 μm 激光的 10 倍。由于 1 μm 光束的优势在空气能见度较差时受到抑制,但即使能见度下降到 10 km,其传输后到达靶目标处的光强还有可能是 3.8 μm 激光 2~3 倍。另外,在此所给的结果均没有考虑利用自适应光学技术对大气湍流影响进行校正,所以,在考虑校正后,1 μm 波长激光的传播优势将更加明显。

3.2 脉冲激光的传播

固体热容激光器输出的是一系列的脉冲,而不是连续的光束。典型的实时占空因数为 10%,这意味着在每一个激光脉冲当中,输出的功率是平均功率的 10 倍。例如,100 kW 的热容激光将有一个峰值功率,每个激光脉冲峰值功率为 1 MW。这种脉冲形式可能对光束向目标的传播和与目标表面的相互作用有潜在的影响。

一般而言,脉冲激光可能产生比连续波激光更强的热晕效应,但具体还需考虑大气的吸收因素。另外,在考虑表面损伤机制时,高功率高重复脉冲激光具有明显的优势。由于固体热容激光可有效地在靶目标上积聚能量,从而使得靶目标表面温度迅速升高。对于金属靶,吸收几乎完全发生在表层,能量一旦积聚,热量在传入金属内部之前即可使得其表面产生损伤。相比之下,由于热传导作用,吸收同样的能量时,连续波激光不能使金属达到同样的高温。所以,对于给定的激光输出功率,连续波激光对靶目标引起的损伤较小。

为了阐明这种优势,考察一个 2 mm 厚的钢板上 2 cm \times 2 cm 的光斑。钢板受到 200 Hz 平均功率为 100 kW 的 8 个脉冲的固体热容激光辐照,同时,钢板受到相同时间(40 ms)相同功率的连续波激光辐照。对于固体热容激光,温度以脉冲的形式增加,峰值达到 1 500 $^{\circ}\text{C}$,该值高于连续波激光。在钢板后表面,固体热容激光产生的温升较连续波高约 100 $^{\circ}\text{C}$ 。

值得指出得是,金属的吸收率不仅随温度增加,而且随激光的频率增加,由于固体热容激光具有较高的频率,这一点是固体热容激光器的优势。

4 结 论

1 μm 波长的高平均功率固体激光具有很大的发展潜力,这不仅是因为目前激光器系统本身所具有的小型化、机动性以及由电源提供动力等优势,而且也是因为其具有高重复、高平均功率,特别是较好的大气传输性能。

基于以上分析,可以得出以下初步结论:光束发射口径相同时,1 μm 波长固体激光在目标上产生的最大校正光强是 3.8 μm 激光的 13 倍;3.8 μm 波长激光典型的分子吸收系数为(5%~6%)/km,1 μm 波长激光的远小于 0.1%/km;热晕是非线性现象,较难利用自适应光学技术进行校正;1 μm 波长固体激光的气溶胶吸收比 3.8 μm 的高;但在能见度 10 km 的乡村气溶胶条件下,1 μm 波长固体激光的大气分子和气溶胶吸收总和小于 3.8 μm 的一半;碳质气溶胶的吸收对 1 μm 固体激光的传播有着重要的影响,在 10 km 能见度且存在烟雾的环境下,1 μm 和 3.8 μm 的大气吸收大致相等,在更低的能见度条件下,1 μm 的吸收大于 3.8 μm 。在具有烟雾的低能见度条件下,两种波长激光的传播均受到较为严重的影响;大气散射与波长成反比,可表示为 λ^{-1} ,由

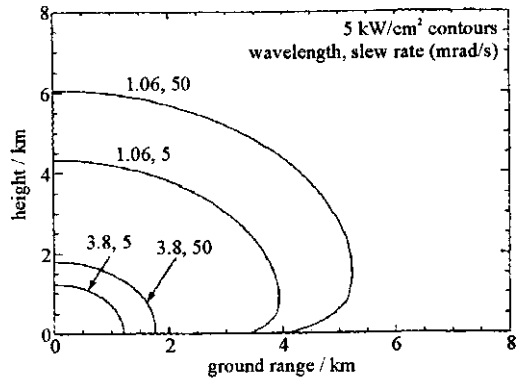


Fig. 1 Propagation simulation for 200 kW average power, 30 cm diameter uncorrected beam

图 1 平均功率 200 kW, 直径 30 cm 光束传播的模拟(未校正)

于大气散射不引起大气的加热, 从而不导致热晕效应, 所以它对光传输的影响较吸收小; 大气湍流引起的光束发散可表示为 $\lambda^{-0.2}$, 由于大气湍流可以利用自适应光学技术进行校正, 这对 $1 \mu\text{m}$ 波长固体激光更为有利。

综合考虑大气传输的影响, 在能见度为 23 km 乡村气溶胶条件下, 若在靶目标处达到的光强相同, 则 $1 \mu\text{m}$ 波长激光的传输距离是 $3.8 \mu\text{m}$ 激光的 3 倍以上; 固体激光为脉冲方式束且光束较小, 热晕效应相对较严重, 需要对脉冲宽度以及重复频率进行优化; 固体热容激光器的脉冲输出可增加激光与金属靶目标的耦合效率, 从而增加对靶目标的损伤效果。

参考文献:

- [1] Berger J, Welch D, Scifres D, et al. High power continuous-wave neodymium: aluminum garnet laser end-pumped by a laser diode array[J]. *Appl Phy Lett*, 1987, **51**:1221—1224.
- [2] 任国光, 黄裕年. 高功率固体激光器的最新进展及其军事应用[A]. 2003 年全国光电技术学术交流会[C]. 武汉, 2003. 467—471. (Ren G G, Huang Y N. The new development and military application of high-power solid-state lasers. 2003's Chinese Symposium on Optoelectronic Technology. Wuhan, 2003. 467—471)
- [3] Smith F G. Atmospheric propagation of radiation. Volume 2 of The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook[M]. Bellingham, Washington USA, SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [4] Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. *Doklady Akad Nauk USSR*, 1941, **30**:301—306.
- [5] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. *J of Opt Soc Am*, 1965, **55**:1427—1435.

High average power solid-state laser and its propagation in the atmosphere

QIANG Xi-wen

(63655 Unit of People's Liberation Army, Malan 841700, China)

Abstract: As a high power laser which has some important application background, the selection of solid-state laser's parameters such as wavelength, beam aperture, power, and beam quality has been analyzed, and the influencing factors such as the atmospheric optical characteristics, the effects of laser beams propagation in the atmosphere, and the mechanism and efficiency of laser beam coupling with targets has been investigated. The related results show that the general efficiency of 100 kW solid-state lasers corresponds to DF lasers which have two to three times average out power, thus the high average out power solid-state laser is demonstrated as a laser of some potential advantages and favorable prosperity.

Key words: Laser technology; Solid state laser; High power laser; Laser propagation in the atmosphere

