

脉冲半导体激光束并合参数研究

吴健华¹, 樊桂花², 孙华燕², 郭惠超²

(1. 中国人民解放军 92853 部队, 辽宁 兴城 125106; 2. 装备学院, 北京 101416)

摘要: 采用光束并合的方法可以提高脉冲半导体激光器峰值功率以及远场光斑的均匀性, 从而提高激光主动成像系统的作用距离, 并实现系统的小型化。首先应用指数高斯光束传输模型推导了并合光束的远场能量分布, 并采用 Matlab 仿真软件对影响光束并合效果的各激光器间轴线夹角、各激光器延迟时间以及并合激光器的间距等参数进行研究, 最后进行光束并合实验, 获得了 1.5 km 外目标的选通成像图像, 对比了不同并合激光数目对成像性能的影响, 验证了光束并合方法可以有效地改进成像质量。

关键词: 脉冲半导体激光器; 光束并合; 距离选通成像

中图分类号: TN212 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)10-2646-05

Multi-beam combining parameters of pulsed laser diode

Wu Jianhua¹, Fan Guihua², Sun Huayan², Guo Huichao²

(1. Unit 92853 of PLA, Xingcheng 125106, China; 2. Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Multi-beam combining is an effective method for improving the power and far-field beam uniformity of pulsed laser diode. It can also increase the imaging range, and the laser active imaging system can be miniaturized. First, the combining beams distribution was derived using Exponent-Gaussian model. Then the influence of some parameters such as the angle of the laser diodes away from horizontal line, the spacing between laser diodes and the lasing delay times were simulated with Matlab. Finally, the range-gated imaging beyond 1.5 km was obtained. It can be concluded that multi-beam combining can improve the performance of the range-gated imaging by comparing the imaging of different numbers of the laser diode.

Key words: pulsed laser diode; multi-beam combining; range-gated imaging

收稿日期: 2013-02-10; 修订日期: 2012-03-12

基金项目: 十一五装备预先研究项目

作者简介: 吴健华(1985-), 男, 硕士, 主要从事光学测量方面的研究。Email:jianhuafly@163.com

0 引言

脉冲半导体激光器具有小型化、高重频、光谱宽等一系列半导体泵浦固体激光器不具备的优点，是优良的主动照明光源^[1]，但较低的峰值功率限制了其在远距离场合的应用。采用光束并合^[2]的方法可以有效提高输出功率，并且不改变器件的内部结构，不受物理热效应等因素影响，因此，受到了人们的广泛关注。

激光用于照明时主要采用非相干合成方法来提高输出功率，非相干合成方法分谱合成方法^[3-5]、偏振合成方法^[6-7]及多光束并合方法^[2,8-9]。多光束并合方法中各单元相互独立，并合数目在理论上无限制，不引入调节装置，受热效应影响小，且各单元相位随机分布，可以平衡光束到达目标后的波前随机起伏，达到提高光斑均匀性的目的。参考文献[2]曾对光束并合技术进行初步讨论，文中将针对光束并合技术中各影响因素进一步进行量化分析，并且实现远距离成像实验，为后续多光束并合研究提供有力的支撑。

1 理论分析及仿真

当激光器排布如图 1 所示，采用指数高斯模型作为脉冲半导体激光器的光束传输模型^[10]，对并合光束的传输进行理论推导。

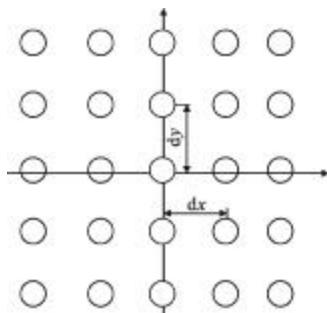


图 1 矩形排列光束并合模型

Fig.1 Beam combination model of rectangular arrangement

设 X 方向激光器间距为 d_x ，数量为 M，Y 方向激光器间距为 d_y ，数量为 N，为推导方便，设 M、N 为奇数。设某个激光器的序号为(m, n)，则 $-\frac{M-1}{2} \leq m \leq \frac{M-1}{2}$ ， $-\frac{N-1}{2} \leq n \leq \frac{N-1}{2}$ ，则 (md_x, nd_y) 处激光器的光场分布为：

$$E_{mn}(x_0, y_0, 0, t_{mn}) = u_0 \exp(-p|x_0 - md_x|) \cdot \exp[-q^2(y_0 - nd_y)^2] \cdot \cos \theta_{mn} A(t_{mn}) \quad (1)$$

式中： $p = 1/\omega_{0x}$, ω_{0x} 为 X 方向的束腰宽度； $q = 1/\omega_{0y}$, ω_{0y} 为 Y 方向的束腰宽度； u_0 为常数； θ_{mn} 为激光器安装时轴线与水平面的夹角； t_{mn} 是时间信号； $A(t)$ 是关于时间的周期性重复函数：

$$A(t_{mn}) = \begin{cases} 1, & t_{start} + T < t_{mn} < t_{end} + T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中： t_{start} 、 t_{end} 分别为脉冲的初始时刻与结束时刻；T 为周期。

采用非傍轴标量光束传输理论得到远场光强分布为：

$$I_{mn}(x, y, z, t_{mn}) = \frac{4\pi}{q} \frac{u_0^2}{\lambda^2 p^2} \left(\frac{z}{r^2} \right)^2 \left(\frac{I^2}{I^2 + (x - md_x)^2} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{2(y - nd_y)^2}{\Omega^2}\right) \cos \theta_{mn} A(t_{mn}) \quad (3)$$

式中： $I^2 = (pk/r^2)$ ； $\Omega^2 = 4q^2 r^2 / k^2$ ； λ 为出射激光的波长；k 为波矢； $k = 2\pi/\lambda$ ；r 为传输距离， $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ 。

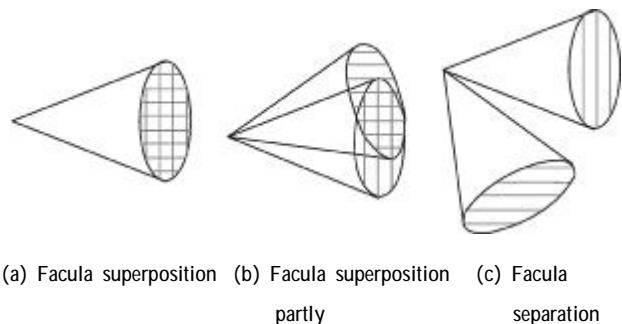
此时，并合光束的总光强为：

$$I_{mn}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{4q}{\pi} \frac{u_0^2}{\lambda^2 p^2} \left(\frac{z}{r^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{I^2}{I^2 + (x - md_x)^2} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{2(y - nd_y)^2}{\Omega^2}\right) \cos \theta_{mn} A(\tau) \quad (4)$$

通过公式(4)可知，影响光束并合效果的因素有激光器间的轴线夹角、各个光脉冲的延迟时间及激光器间距。引入不均匀度以及并合效率作为评价光束并合效果的指标，定义不均匀度为所选区域的均方差与均值的比值；定义并合效率为光斑重叠区域的能量与总能量的比值。

1.1 激光器轴线夹角影响

并合激光器轴线的夹角直接影响着远场光斑重叠区域，如图 2 所示。



(a) Facula superposition (b) Facula superposition partly (c) Facula separation

图 2 不同激光器轴线夹角示意图
Fig.2 Schematic diagram of different laser axis angle

应用指数高斯光束模型，设并合激光器的数目为 2，则当夹角为 θ 时，光束刚好没有重叠，则两个激光器

轴线间夹角在 $0\sim\theta$ 间随机分布对实验效果有效,由于半导体激光器在垂直方向的角度与水平方向角度不同,并合效率随两个方向角度变化曲线如图 3 所示。

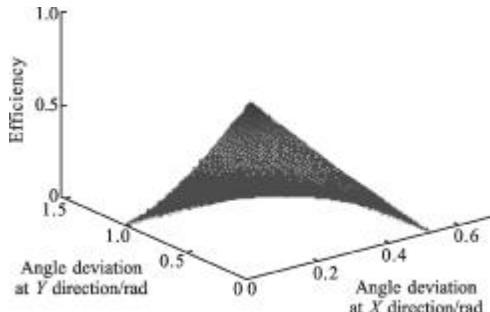


图 3 激光器间夹角对并合效率的影响

Fig.3 Impact of angle among combing lasers on efficiency

通过仿真图像可知:随着激光器轴线间夹角增大,并合效率逐渐减小。因此,在实际的光束并合过程中,需要精确调整各个并合单元与水平面的夹角,确保各激光器轴线夹角最小。

1.2 同步时间影响

半导体激光器是电流驱动型器件,通过驱动电流与出光时间的规律可知:当电流值大于阈值电流时,激光器的光功率与驱动电流成正比,通过推导 RLC 回路得到第 i 个激光器输出光功率的表达式^[11]:

$$P_i = kAe^{-\alpha t} \sin[\omega(t + \varepsilon_i) + \theta] \quad (5)$$

式中:k 表示比例系数; ε_i 为第 i 个激光器的延迟时间; θ 为初始延迟。则 M 束光束总的光功率为:

$$P_{\text{总}} = \sum_{i=1}^M kAe^{-\alpha t} \sin[\omega(t + \varepsilon_i) + \theta] \quad (6)$$

定义能量效率为重叠时间脉冲能量与总能量的比值,激光器的脉冲宽度定义为半高宽,根据公式(6),数值仿真激光器出光延迟时间对能量效率以及半高宽的影响,仿真采用 20 个激光器,各激光器出光时间延迟在区间内随机分布,仿真结果如表 1 所示。

表 1 激光延迟时间对并合效果的影响

Tab.1 Impact of laser delay time on combining effect

| Delay time/ns | Efficiency | Change of FMHM/ns |
|---------------|------------|-------------------|
| 0 | 100% | 0 |
| 0~1 | 99% | 0.02 |
| 0~3 | 96.78% | 0.34 |
| 0~5 | 94.86% | 1.12 |
| 0~10 | 88.32% | 1.42 |

通过表 1 分析可知:随着并合激光器间延迟时

间增加,能量效率降低,脉冲宽度增宽,影响了并合效果,但是,延迟时间在 1 ns 之内时,对总体影响可以忽略。

1.3 排列间距影响

在矩形排列时,设相邻激光器在 X 方向和 Y 方向间距相同,并合激光器数目为 9,则不均匀度和并合效率随间距变化情况如图 4、图 5 所示。

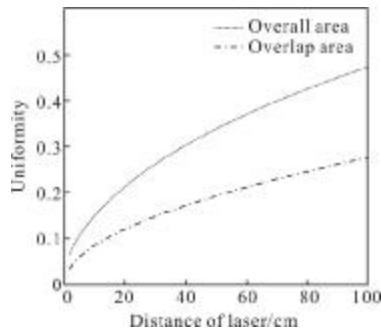


图 4 不均匀度随间距变化

Fig.4 Uniformity change vs distance of lasers

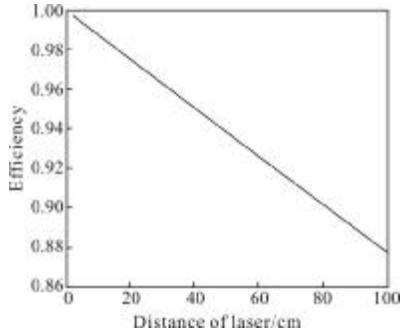


图 5 并合效率随间距变化

Fig.5 Efficiency combining vs distance of laser

通过图 4、图 5 分析可得:光斑的均匀性随着激光器间距的增加而减弱,并且并合效率随着激光器间距的增加而减小,因此,应该尽可能地减少并合激光器的间距。在实际的操作中,并合激光器的间距受限于准直系统、器件安装的简易程度等因素。

2 实验验证及结论

2.1 激光器同步时间测试

采用 FPGA 进行触发信号程序编写,采用 300 MHz 带宽示波器对半导体激光器的出光时间同步性进行测试。首先分别测试各个激光器相对于触发信号的延迟时间,然后计算了这两个延迟时间的差值,延迟时间的差值即为半导体激光器出光延迟时间。

为减少激光器出光时刻随机性以及测试中随机

因素的影响,对每组数据进行 25 次测试,累加平均后得到两个激光器的延迟时间为 0.2 ns。因此,采用此半导体激光器,无需对出光时间进行补偿。激光器 I 和 II 的波形图如图 6 所示。

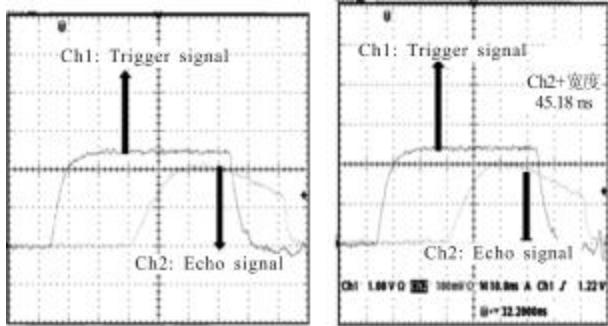


图 6 激光器 I 波形图和激光器 II 波形图

Fig.6 Laser I and II waveform

2.2 距离选通成像实验及结论

通过主动成像图像质量对不同并合数目光束的照明效果进行评测,构建距离选通系统如图 7 所示。

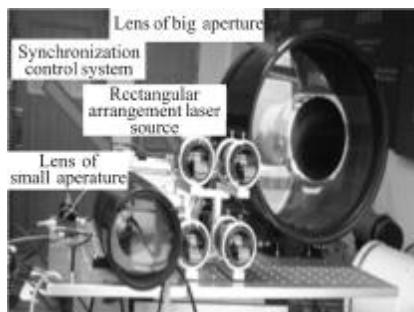


图 7 距离选通成像实验系统

Fig.7 Range-gated imaging experiment system

实验中 ICCD 与激光器的初始时间的延迟为 8.4 ms,计算得到成像距离为 1.5 km,成像结果如图 8 所示。

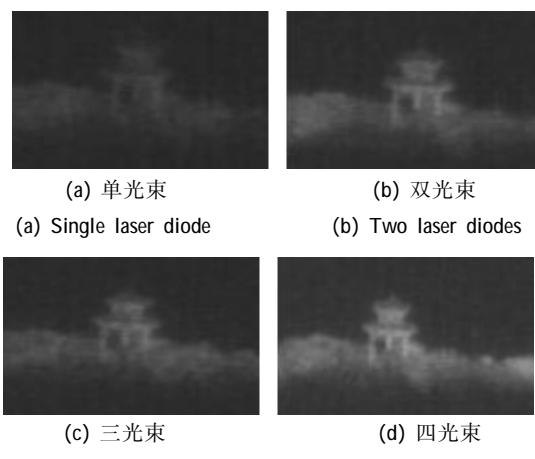


图 8 实验图像

Fig.8 Experimental image

为更好地评价图像质量,采用亮度、对比度及信噪比作为图像质量客观评价方法,对不同并合光束情况下的图像质量进行对比,如表 2 所示。

表 2 实验图像评价参数对比
Tab.2 Comparison of evaluation parameters of experiment images

| No. | Energy | Contrast | SNR |
|-----|--------|----------|-------|
| 1 | 34.37 | 0.547 | 22.38 |
| 2 | 37.01 | 0.623 | 34.13 |
| 3 | 41.44 | 0.77 | 40.28 |
| 4 | 48.81 | 0.87 | 52.60 |

通过图像质量客观评价参数可以得出:随着激光束增加,激光主动成像图像的亮度、对比度以及信噪比有着明显改善,主动成像的质量得到了提高。

采用多光束并合方法很好地解决了单个脉冲半导体激光器功率低的缺点,有效解决了光源对主动成像系统体积的限制,改善了远场光斑的均匀性,提高了距离选通成像效果。

参考文献:

- [1] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)
马晓宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-194.
- [2] Wu Jianhua, Fan Guihua, Liang Danhua, et al. Study on beam synthesis of pulsed diode laser [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 700-705. (in Chinese)
吴健华, 樊桂花, 梁丹华, 等. 脉冲半导体激光器光束并合技术研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 700-705.
- [3] Charles Higgs, Barclay Herbert T, Danil V, et al. Atmospheric compensation and tracking using active illumination [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1998, 11(1): 5-26.
- [4] Feng Guangzhi, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, et al. 808 nm high power diode laser stack with polarization coupling [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2008, 29(4): 695-700. (in Chinese)
冯广智, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 808 nm 大功率半导体激光迭阵偏振耦合技术[J]. 发光学报, 2008, 29(4): 695-700.

- [5] Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, et al. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2282–2285. (in Chinese)
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2282–2285.
- [6] Zhao Pengfei, Liu Bo, Li Qiang, et al. Improvement on spectrum of high power diode laser array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19: 1051–1053. (in Chinese)
赵鹏飞, 刘波, 李强, 等. 高功率二极管激光阵列输出光谱特性的改善[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19: 1051–1053.
- [7] Cook C C, Fan T Y, Fejermm, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [J]. OSA Trends in Optics and Photonics, 1999, 26: 163–166.
- [8] Yi Hengyu, Su Yi, Huang Shan, et al. Modeling and experimental validating on array combination of rectangle laser beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 472–475. (in Chinese)
易亨瑜, 苏毅, 黄珊, 等. 矩形光束合成的建模与实验验证[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 472–475.
- [9] Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi, et al. Study on coherent combination theory of multi-beam laser[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(2): 111–113. (in Chinese)
孙玲, 赵鸿, 杨文是, 等. 多光束激光相干合成技术研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 111–113.
- [10] Xiong Lingling, Lv Baida. Theoretical models describing far-field intensity distributions of laser diode [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 201–206. (in Chinese)
熊玲玲, 吕百达. 描述激光二极管远场光强分布的理论模型[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 201–206.
- [11] Yan Bing. Analysis of pulsed laser diode driver circuit [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 1–3. (in Chinese)
严兵. 脉冲半导体激光器电源电路分析[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 1–3.

(上接第 2645 页)

- (25): 5219.
- [6] Andreas Mandelis, Jerias Batista, Jurgen Gibkes, et al. Noncontacting laser photocarrier radiometric depth profilometry of harmonically modulated band bending in the space-charge layer at doped SiO₂Si interfaces[J]. J Appl Phys, 2005, 97(8): 083507.
- [7] Jerias Batista, Andreas Mandelis, Derrick Shaughnessy, et al. Deep subsurface electronic defect image contrast and resolution amplification in Si wafers using infrared photocarrier radiometry[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(10): 1713.
- [8] Andreas Mandelis, Yu Zhang, Alexander Melnikov. Statistical theory and applications of lock-in carrierographic image pixel Brightness dependence on multi-crystalline Si solar cell efficiency and photovoltage [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(5): 054505–3.
- [9] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, et al. Damage effect of monocrystalline silicon solar cells under ultrashort pulse laser irradiations [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 112–115. (in Chinese)
- [10] Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2484–2488. (in Chinese)