

文章编号: 1001-3806(2004)01-0094-04

输出镜对双棒串接固体激光器输出光束的影响

余本海^{1,2}

(1. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 信阳师范学院 物理系, 信阳 464000)

摘要: 采用矩阵光学理论和实验相结合的方法, 分析了输出镜对双棒串接固体激光器输出光束的影响。结果表明, 输出镜的位置影响了双棒串接固体激光器稳定范围和模体积, 进而影响其输出功率, 等间距放置的谐振腔模体积相对较大, 在输入功率相同时, 其输出功率也相对较大。输出镜的位置也影响了输出光束的光斑半径 w_0 和远场发散角 θ_0 , 二者随输出镜与棒主平面距离的变化关系是相反的。并用实验的方法研究了双棒串接固体激光器输出镜的最佳透过率。

关键词: 输出镜; 固体激光器; 光束质量; 最佳透过率

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Influence of position of output mirror on beam of two-rod solid-state laser

YU Ben-hai^{1,2}

(1. National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China; 2. Department of Physics, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Influence of position of output mirror on beam of two-rod solid-state laser has been analysed by means of matrix optics and experiment. The results show that the stability zone, the mode volume and the output power of two-rod solid-state laser are affected by the position of output mirror. The mode volume and output power of equal interval resonator are larger than the other resonators. The facula radius w_0 and the far field divergent angle θ_0 are also affected by the position of the output mirror. The optimum transmissivity of output mirror for two-rod solid-state laser has been investigated by experiment.

Key words: output mirror; solid-state laser; beam quality; optimum transmissivity

引 言

固体激光器因其体积较小、操作方便、高峰值功率等优点, 在各个领域获得了广泛的应用。由于单棒激光器的功率相对较低, 常将两根(或多根)激光棒串接起来, 以提高其输出功率。对于双棒(或多棒)串接固体激光器的分析与设计, 许多学者从不同的角度做了大量的研究工作, 如 KIM 等人分析了谐振腔的参数对光束质量因子 M^2 的影响^[1], 李正佳等人分析了多元热透镜谐振腔内模式的动态匹配特征, 当两棒的热特性不一致时, 可以通过调节谐振腔的参数来改善因热特性差异造成的模失配状态^[2]。笔者从实际设计高功率固体激光器谐振腔参数的角

度分析了双棒串接固体激光器输出镜对稳定区间、模体积、输出功率以及光束质量的影响。

为了获得较大的稳定范围和模体积, 双棒串接固体激光器常采用平-平腔型^[3], 而且输出镜与棒主平面的距离 L_1 与两棒主平面间的距离 L_2 常采用两种典型类型^[4~6]: 一种是 $L_1 = L_2$, 另一种是 $L_2 = 2L_1$ 。本文中以平-平腔型为例, 通过理论和实验相结合的方法, 分析了这两种情况下输出镜对双棒串接固体激光器输出光束的影响, 主要包括输出镜的位置和透过率对光斑半径 w_0 、远场发散角 θ_0 和输出功率的影响。用同样的方法可以分析多棒的情况, 此结论为双棒(或多棒)固体激光器谐振腔的设计提供了理论依据。

1 输出镜对光束质量的影响

1.1 对光斑半径 w_0 的影响

典型双棒串接固体激光器谐振腔如图 1 所示, M_1 为输出镜, M_2 为全反镜。为了分析的方便, 假

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178004)

作者简介: 余本海(1970-), 男, 讲师, 硕士研究生, 现从事固体激光器件的研究。

E-mail: yubenhai163@163.com

收稿日期: 2003-03-17; 收到修改稿日期: 2003-05-26

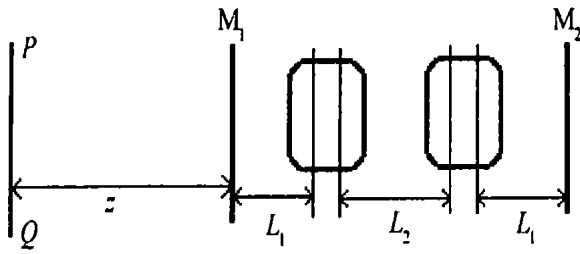


Fig. 1 Resonator of two-rod solid-state laser

设两个固体激光棒完全相同,泵浦灯完全相同且均匀泵浦,则可以利用多元件光学谐振腔的等价腔分析方法^[7],得到光束在谐振腔内往返一周的 $ABCD$ 传输矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $A = 1 - 8L_1f^{-1} - 4L_2f^{-1} + 12L_1L_2f^{-2} + 8L_1^2f^{-2} + 2L_2^2f^{-2} - 8L_1^2L_2f^{-3} - 4L_1L_2^2f^{-3} + 2L_1^2L_2^2f^{-3}$, $B = 4L_1 + 2L_2 - 12L_1^2f^{-1} - 12L_1L_2f^{-1} - 2L_2^2f^{-1} + 18L_1^2L_2f^{-2} + 6L_1L_2^2f^{-2} + 8L_1^3f^{-2} - 6L_1^2L_2^2f^{-3} - 8L_1^3L_2f^{-3} + 2L_1^3L_2^2f^{-4}$, $C = -4f^{-1} + 8L_1f^{-2} + 6L_2f^{-2} - 8L_1L_2f^{-3} - 2L_2^2f^{-3} + 2L_1L_2^2f^{-4}$, $D = 1 - 8L_1f^{-1} - 4L_2f^{-1} + 12L_1L_2f^{-2} + 8L_1^2f^{-2} + 2L_2^2f^{-2} - 8L_1^2L_2f^{-3} - 4L_1L_2^2f^{-3} + 2L_1^2L_2^2f^{-4}$. f 为激光棒热焦距。对于实际使用的激光棒,在一定泵浦功率时的热焦距是可以测量的。而由激光腔的稳定条件和热焦距的值,由(1)式可以确定 L_1, L_2 的取值范围,即稳定区间。

FREIBERG^[8], KOECHNER^[9]等已经指出,任一高阶模与基模之间的光斑半径和发散角存在一定的倍数关系,该倍数随不同的模式序数而异。姚建铨等指出^[10],实际固体激光器的选模小孔不是足够小时,其运转模中包含有 TEM_{00} 模和若干低阶模,对于任意处混合模与基模光斑半径之比保持一定的常数 K (多模系数),实际上可以把低阶混合模的光束看成是基模高斯光束半径增加 K 倍的类高斯光束。所以为了分析的方便,本文中对光斑半径和发散角的分析均按照高斯光束来进行的,其变化规律与实际光束是相同的。

双棒串接固体激光器在稳定区间工作时,其输出基模高斯光束的束腰在输出镜上,且输出镜上的光斑半径为^[11]:

$$w_0^2 = \frac{\lambda_0}{\pi n} \frac{2B}{[4 - (A + D)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

式中, λ_0 是真空中激光波长, n 为激光晶体的折射率。由(1)式、(2)式可以看出,参考面 PQ 上的光斑大小与 w_0 有关,也就与输出镜距激光棒主面的距离 L_1 有关,而且 L_1, L_2 的值不仅影响 w_0 的大小,还影响其变化趋势。例如对于两支棒长为 150mm 的 Nd:YAG 激光棒来说,测得其热焦距为 160mm,当 $L_1 = L_2$ 时,其稳定区间有两个,分别为 $0 \leq L_1 \leq 160\text{mm}$ 和 $320\text{mm} \leq L_1 \leq 480\text{mm}$,当 $L_2 = 2L_1$ 时,其稳定区间也有两个,分别为 $0 \leq L_1 \leq 42\text{mm}$ 和 $75\text{mm} \leq L_1 \leq 92\text{mm}$,这两种情况下 w_0 与 L_1 的关系如图 2 所示。可以看出,当 $L_1 = L_2$ 时,在较小的稳定区间内, w_0 随 L_1 增大而呈 n 形变化。在较大的稳定区间内, w_0 随 L_1 增大而减小。当 $L_2 = 2L_1$ 时,在两个稳定区间内, w_0 均随 L_1 增大而增大。

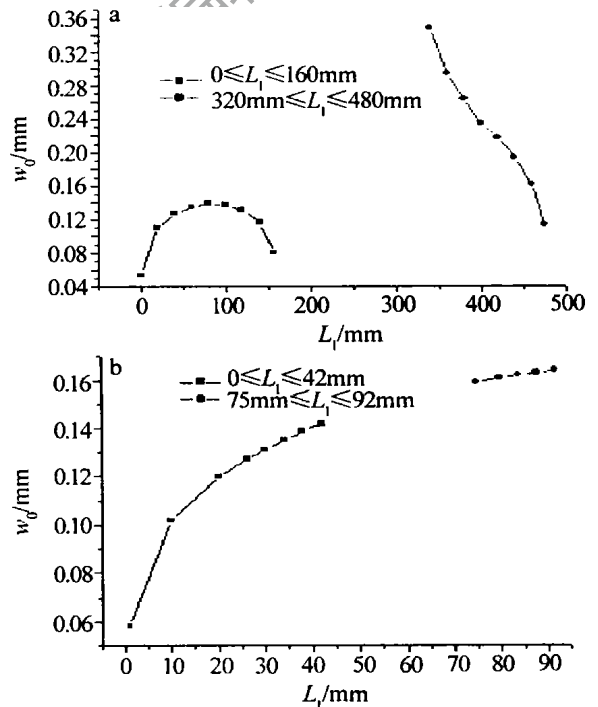


Fig. 2 The relationship between facula radius w_0 and L_1
a- $L_1 = L_2$ b- $2L_1 = L_2$

1.2 对远场发散角 θ_0 的影响

光学谐振腔输出基模高斯光束远场发散角为^[7]:

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \left[\left(\frac{w_e}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_e}{\pi w_e} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, w_e, R_e 分别为在折射率 n_e (若为空气可取 $n_e = 1, \lambda_e = \lambda$) 测量空间中任意 z 值处的高斯光束光斑半径和等相面曲率半径。为计算方便起见,取在输出镜的外侧(如图 1 所示)。

用(1)式所示的矩阵元可将(3)式表示为:

$$\theta_0^2 = \pm \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{\eta_s^2 (D - A)^2 + \eta_n^2 [4 - (A + D)^2]}{2 \eta_n B [4 - (A + D)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

式中, λ 为输出激光的波长, 所用 YAG 激光器的输出波长为 $1.06\mu\text{m}$, η_s, η_n 分别为输出镜和激光传输介质的折射率, 当激光在空气中传输时, 可取 $\eta_n = 1$ 。

由(4)式可以得到在 $L_1 = L_2$ 和 $L_2 = 2L_1$ 两种情况下, 参数同 1.1 节的双棒串接 YAG 激光器在相应的稳定区内, 输出基模高斯光束的远场发散角与输出镜距棒主面的距离 L_1 的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出, 当 $L_1 = L_2$ 时, 在值较小的稳定区间, 远场发散角 θ_0 随 L_1 的增大而呈 U 型变化, 在值较大的稳定区间, θ_0 随 L_1 的增大而增大。当 $L_2 = 2L_1$ 时, 在两个稳定区内, θ_0 均随 L_1 的增大而减小。

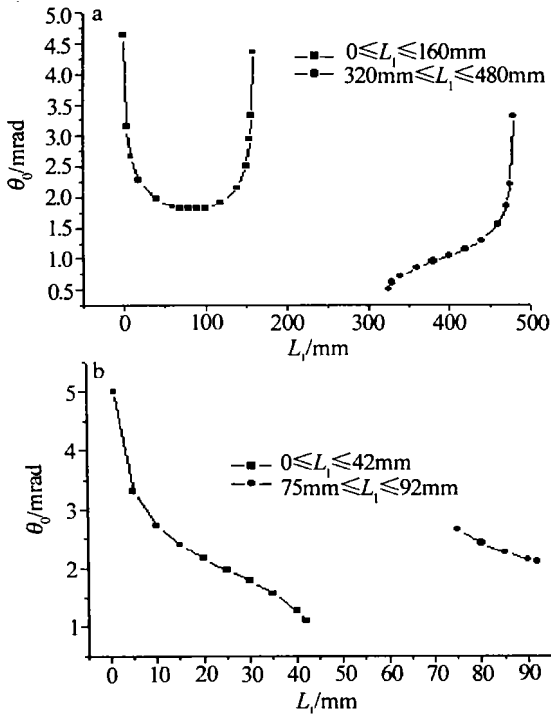


Fig. 3 The relationship between far field divergent angle θ_0 and L_1
a - $L_1 = L_2$ b - $2L_1 = L_2$

1.3 实验结果

实验时的两支 NdYAG 棒为 $\varnothing 8\text{mm} \times 150\text{mm}$, 聚光腔为双椭圆镀金金属腔, 氩灯为 $\varnothing 7.8\text{mm} \times 150\text{mm}$, 输出镜的透过率为 30%, 考虑聚光腔的实际尺寸, 对于 $L_2 = L_1$ 和 $L_2 = 2L_1$ 两种情况, 均取值较大的稳定区间, 则测得其光斑半径 w 以及远场发散角 θ 与 L_1 的关系如图 4 所示。

比较图 2、图 3 和图 4 可以看出, 实际的光斑半径 w 与远场发散角 θ 要比基模时的 w_0 和 θ_0 大得多, 但是两者随 L_1 的变化规律是相同的。还可以

发现, 输出光束远场发散角 θ 随 L_1 的变化情况与光斑半径 w_0 随 L_1 的变化情况正好相反, 即当 L_1 在某个值时, 若远场发散角 θ 相对较小, 则光斑半径 w 就相对较大, 反之亦然。所以, 为了提高双棒固体激光器的光束质量, 在设计谐振腔时, 必须同时兼顾远场发散角 θ 与光斑半径 w 的值, 这样才能得到较好的光束质量。

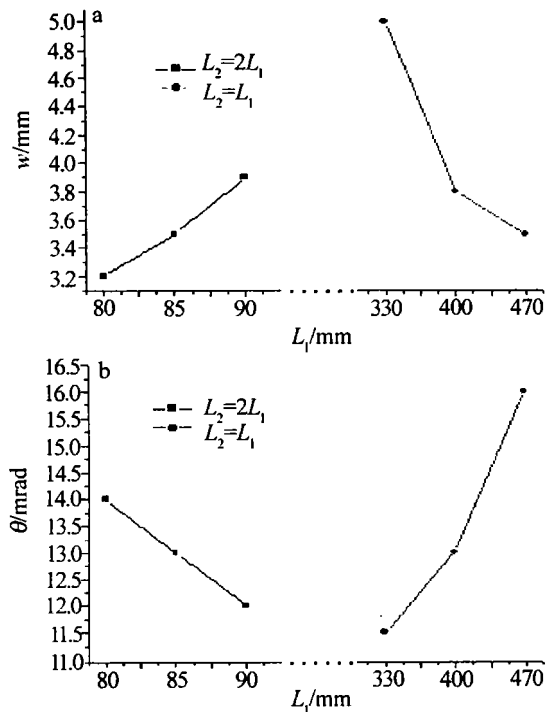


Fig. 4 The results of experiment

2 输出镜对输出功率的影响

2.1 输出镜位置对输出功率的影响

对于固体激光器来说, 激光棒的质量、注入功率的大小、冷却效果等因素直接影响了热焦距的大小。而不同的热焦距又对应着不同的稳定区间。在稳定区内, 输出镜与棒主面的距离 L_1 的值直接影响了模体积的大小, 进而影响了激光器的输出功率。

图 1 所示谐振腔中基模高斯光束的模体积近似等于两端圆台的体积与中间圆柱体的体积之和, 总的模体积为两棒的模体积之和。实验时的参数同 1.3 节所述, 取值较大的稳定区间, 则在 $L_1 = L_2$ 和 $2L_2 = 2L_1$ 两种情况下, 分别得到模体积 V 与 L_1 的关系如图 5 所示。

实验时的输入功率约为 20kW, 则得到两种腔型的输出功率与 L_1 的关系曲线如图 6 所示。可以看出, 实验结果与理论分析是一致的。从图 5、图 6 可以看出, 在相应的稳定区内, 当 $L_1 = L_2$ 时, 双

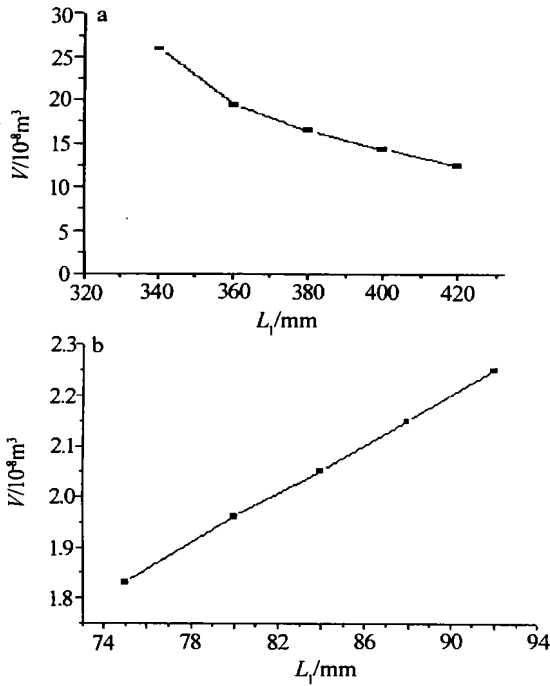


Fig. 5 The relationship between mode volume V and L_1 ($f = 160\text{mm}$)
a $-L_1 = L_2$ b $-2L_1 = L_2$

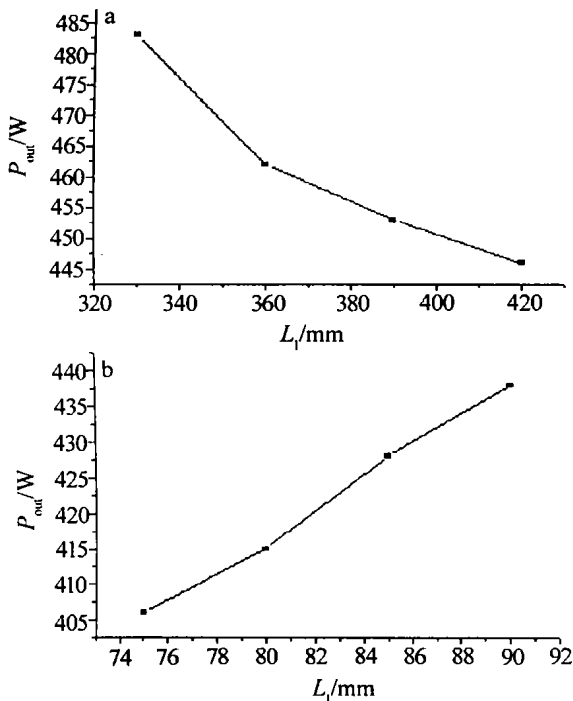


Fig. 6 The relationship between output power P and L_1
a $-L_1 = L_2$ b $-L_2 = 2L_1$

棒串接固体激光器的模体积和输出功率均随 L_1 的增大而减小,当 $L_2 = 2L_1$ 时,模体积和输出功率均随 L_1 的增大而增大。而且在其它参数相同的情况下,当 $L_1 = L_2$ 时,其模体积和输出功率要比 $L_2 = 2L_1$ 时的大。所以为了提高双棒串接固体激光器的输出功率,在设计谐振腔的几何尺寸时,应当使输出镜与棒主平面的距离与两棒主平面间的距离相等,

而且使其值靠近稳定区间的下限。

2.2 输出镜透过率对输出功率的影响

对于固体激光器而言,总的输入功率越大,则输出镜的透过率就应越大。考虑到双棒串接固体激光器正常工作的最大输入功率为 24kW ,分别用透过率为 25% , 30% , 35% 的输出镜进行了比较实验,结果如图 7 所示。由图可以看出,当透过率在 30% 时,在高输入功率时能得到最大的输出功率,且透过率在 30% 左右的一个较小范围内变化时对输出功率影响不大。

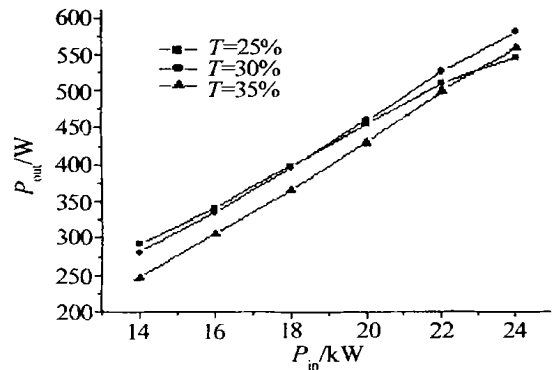


Fig. 7 The relationship between output power and input power under different transmissivity

3 总结

(1) 输出镜的位置影响了双棒串接固体激光器稳定范围和模体积,进而影响其输出功率,当谐振腔内输出镜与棒主平面的距离 L_1 与两棒主平面间的距离 L_2 相等时,在值较大的稳定区间的模体积和输出功率随 L_1 的增大而减小,而当 $L_2 = 2L_1$ 时,其模体积和输出功率随 L_1 的增大而增大,总的来说,当输入功率相同时,前者的输出功率要比后者的大。

(2) 输出镜的位置影响输出光束的光斑半径 w_0 和远场发散角 θ_0 。当 $L_1 = L_2$ 时,在较小的稳定区间内, w_0 先随 L_1 增大而增大,后随 L_1 增大而减小,呈 n 形变化。在较大的稳定区间内, w_0 随 L_1 增大而减小。当 $L_2 = 2L_1$ 时,在两个稳定区间内, w_0 均随 L_1 增大而增大。而远场发散角 θ_0 与 L_1 的关系同 w_0 与 L_1 的关系正好是相反的,所以,为了提高双棒固体激光器的光束质量,在设计谐振腔时,必须同时兼顾远场发散角 θ_0 与光斑半径 w_0 的值。

(3) 双棒串接固体激光器的最佳透过率可以通过理论和实验相结合的方法得到,当透过率在最佳透过率附近一个较小范围内变化时对输出功率影响不大。
(下转第 102 页)

续表

类型	型号(名称)	国别(制造商)	结构	性能特点	备注
散射探测型	毒胡萝卜丛	美国 Martin Marrantia 公司		舰载及车载;接收大气气溶胶散射的激光能量,并将其分类	已生产装备
	PA7030 告警器	英国 Plessy 雷达公司	由散射探测器和二极管探测器及显示器组成,二极管阵列探测器由 12 个单元围成环形	坦克及车载;散射探测 0.69 μm 和 1.06 μm ; 二极管探测 0.4 μm ~ 1.1 μm ,视场水平 360°, 俯仰 55°; 角分辨率 15°	1978 年通过部队鉴定

4 激光探测告警技术发展趋势

早期激光告警器主要是非成像型探测器,其波长覆盖范围较窄,主要集中在可见和近红外波段;方位分辨力较低,一般为几度到几十度,取决于二极管的数量;不能确定激光波长;器件大而笨重,作战效能不高。随着激光技术的飞速发展,军用激光器的种类和波长覆盖范围迅速扩大,对激光告警器的要求越来越高。同时,现代光电子技术的深入发展,也使得研制更高性能的告警器成为可能。

目前,激光探测告警技术的研究主要集中在以下几个方面:将波长覆盖范围不同的探测器组合到一起,以拓宽光谱响应范围;提高激光告警的方位分辨力,如采用光纤延迟技术、CCD 摄像技术,在非成像型告警器中采用邻域相关技术等;为了测定激光波长,研制出相干识别型激光告警器;为了更精确地判断激光威胁源的性质,还要求告警器能够识别激光的脉冲特性,如脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲编码特征等;为了适合于单兵使用,人们开发出小型、便携式的激光告警器^[8];为对抗激光对卫星的威胁,需要开发小型的、抗辐射能力强的星载激光告警设备,CCD 由于存在辐射软化问题难以胜任,有源像素传感器(ASP)则是一种兼具 CCD 优良特性和

抗辐射性能的新型传感器,因而成为星载激光告警器的首选^[9,10]。

今后激光探测告警技术将与雷达及其它告警技术结合在一起,构成全波段、一体化的告警设备。不同告警技术的结合和信号数据的综合处理,可以对威胁源的特征做出精确判断,从而可以采取更有效的防护和反击措施,提高作战系统的战场生存能力。

参 考 文 献

- [1] COLEMAN C L. International Defense Review, 1986(7): 965 ~ 967.
- [2] 金梅. 激光技术, 1989, 13(3): 27 ~ 34.
- [3] 施德恒, 高宗江. 激光与红外, 1998, 28(3): 136 ~ 139.
- [4] 施德恒, 郭峰. 激光与红外, 1999, 29(1): 9 ~ 13.
- [5] 张洁. 航天电子对抗, 2002(2): 42 ~ 46.
- [6] 王海先. 中国激光, 2000, 27(9): 851 ~ 856.
- [7] 尼喜, 施德恒. 激光杂志, 1998, 19(3): 14 ~ 16.
- [8] 付伟. 电光系统, 1997, 77: 7 ~ 11.
- [9] 付伟, 刘静, 侯振宁. 电光系统, 2001(4): 5 ~ 14.
- [10] 王喜焱, 张洁. 航天电子对抗, 2002(2): 38 ~ 41.
- [11] 付伟. 舰船电子对抗, 2001(1): 1 ~ 4.
- [12] 曾宪林, 郑仲明. 航天电子对抗, 2001(2): 21 ~ 25.
- [13] 付伟. 电子对抗技术, 1999, 14(2): 39 ~ 44.
- [14] 付伟. 红外与激光工程, 1996, 25(1): 2 ~ 7.
- [15] 付伟. 激光与红外, 1994, 24(2): 34 ~ 36.
- [16] 周滨. 军事电子, 1992(11): 21 ~ 25.
- [17] 周滨. 军事电子, 1992(10): 18 ~ 21.
- [18] 卢万欣, 梁桂云, 秦永左. 激光技术, 1992, 16(3): 180 ~ 183.

(上接第 97 页)

参 考 文 献

- [1] KIM H S, LEE S M, KO D K *et al.* Opt Commun, 2002, 201(15): 381 ~ 389.
- [2] 李正佳, 夏文建, 朱长虹 *et al.* 激光技术, 1998, 22(5): 284 ~ 286.
- [3] DRIEDGER K P, IFFLANDER R M, WEBER H. IEEE J Q E, 1988, 24(4): 665 ~ 667.
- [4] 侯学元, 黄俊刚, 李宇飞 *et al.* 应用激光, 2001, 21(6): 378 ~ 380.
- [5] 陈莹, 王立新, 曾祥江 *et al.* 中国激光, 2000, 27(9): 782 ~ 784.
- [6] 杨盛谊, 陈莹, 王振家 *et al.* 激光技术, 2001, 25(1): 73 ~ 76.
- [7] 吕百达. 激光光学, 2 版, 成都: 四川大学出版社, 1992. 77 ~ 85.
- [8] FREIBERG R J, HALSTED A S. Appl Opt, 1969, 8(2): 355 ~ 360.
- [9] KOECHNER W. Solid-state laser engineering. New York: Springer-Verlag, 1976. 635 ~ 648.
- [10] 姚建铨, 宁喜发, FAHLEN T S. 光学学报, 1984, 4(3): 271 ~ 277.
- [11] KORTZHP, IFFLANDER R M, WEBER H *et al.* Appl Opt, 1981, 20(23): 4124 ~ 4129.