

激光近炸引信多级光学准直整形透镜研究

甘霖 张合 张祥金

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 针对激光近炸引信发射光束发散角大和远距离目标回波信号微弱等问题,通过分析大视场激光近炸引信光学结构特点,结合激光近炸引信定距影响因素,应用 Zemax 软件,根据非球面光学设计理论,设计出激光发射系统多级非球面准直透镜。仿真结果显示,相对于传统单级非球面准直透镜,利用多级透镜可将中心辐照亮度提高近 10 倍,光斑尺寸得以减小,能量集中。最后,根据设计加工非球面透镜并进行实验,结果表明该准直系统可有效压缩发射激光束光斑尺寸,提高系统探测距离。

关键词 激光光学; 激光近炸引信; 多级准直透镜; 非球面

中图分类号 TJ43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702009

Research on Multi-Level Aspheric Collimating Lens of Laser Proximity Fuze

Gan Lin Zhang He Zhang Xiangjin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The problems of the large beam divergence angle and short detection range in the launch system of laser proximity fuze are investigated. By analyzing the optical structural characteristics of large field laser proximity fuze, combined with characteristics of distance influencing factors, and according to aspheric optical design theory, multilevel aspheric collimating lens are designed using Zemax software. Simulation results show that, comparing with single aspheric collimating lens, multilevel lens increase the brightness of the center of irradiation nearly 10-fold, and the spot size decreases and energy concentrates. At last, aspheric lens is processed and experiment has been done, the results show that this collimating system can compress spot size effectively, and the system detection range is improved.

Key words laser optics; laser proximity fuzes; multi collimating lens; aspheric

OCIS codes 010.3310; 080.4228; 120.4610; 140.3295; 140.3300

1 引言

激光具有定向性、单色性、高亮度和相干性等特点,且能量可有效实现远距离传输,因而具有很好的应用前景。相对于传统的光电引信,激光引信具有主动性好、方向性强和不易受电子干扰等优点。1980 年以来,美国 AGM-88 型高速反雷达导弹、美国和瑞士联合研制的 ADATS 型防空-反坦克导弹、美国 M16 步枪发射的枪榴弹,以及瑞典 RDS-70 导弹、法国“马特拉导弹”都采用了激光引信技术^[1-3]。

半导体激光器由于体积小、质量轻、功耗低、可

直接调制等优点,被广泛应用于激光制导、激光雷达和激光通信等方面^[4]。然而,半导体激光器出射光束并非严格意义上的高斯光束,在垂直和平行结平面方向的发散角差别较大(垂直结平面方向发散角 $\theta_{\perp} \approx 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 平行结平面方向的发散角 $\theta_{\parallel} \approx 10^{\circ} \sim 20^{\circ}$),光束极不对称,严重影响其作用距离,因此必须对其进行准直。

现有多种改善半导体激光器光束质量的方法^[5]。由于激光近炸引信功率和体积方面的要求,一般采用单级透镜准直系统,而激光近炸引信包含光学整形

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(60908037)和国家部委基金基目(9140A05070508BQ0245)资助课题。

作者简介: 甘霖(1987—),男,博士研究生,主要从事激光探测与目标识别等方面的研究。E-mail: kg568605@163.com

导师简介: 张合(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事探测制导与控制等方面的研究。

E-mail: hezhang@mail.njust.edu.cn

透镜、全反平面镜和光学整流罩,均为聚碳酸酯(PC)树脂材料,故考虑将全反平面镜和光学整流罩设计为具有准直功能的光学透镜,实现激光近炸引信多级透镜光学整形系统,提高发射激光准直能力。

2 大视场激光近炸引信发射激光束光学整形系统分析

激光引信大视场方位探测系统主要有多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案 4 种常用的光束布局方案^[3-4,6]。其中多辐射方案、分区方案、分区扫描方案均需要多个激光器和激光接收器,同步扫描的重点是要求接收场与发射场同步匹配,系统结构复杂,均无法在常规弹药激光引信中直接应用。

本文采用一种新型的单光束脉冲周向探测扫描方案,仅采用一个激光发射器实现光束的 360°周向扫描探测,将激光发射器的数量减至最少,相对于传统的 4 种方案,大大减小了激光引信的空间占有率。大视场探测方案结构如图 1 所示。

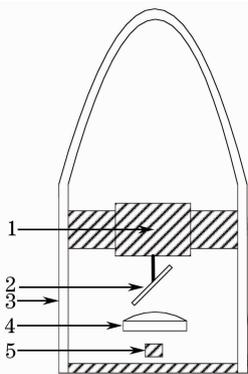


图 1 激光近炸引信大视场探测方案结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of large field detection program of laser proximity fuze

系统工作流程为:激光发射器 5 由电源驱动,发射出激光束,经发射准直透镜 4 准直整形,照射到全反平面镜 2 上,全反平面镜将激光束反射后穿过光学透光窗口 3 射出,全反平面镜由旋转机构 1 带动,匀速周向旋转,完成激光束的 360°大视场空间目标扫描。系统工作流程如图 2 所示。

3 半导体激光器光斑特性及准直系统方案选择

由于半导体激光器的谐振腔反射镜很小,所以其激光束的方向性比其他典型的激光器要差很多。同时有源区厚度与宽度差异很大,所以光束的水平

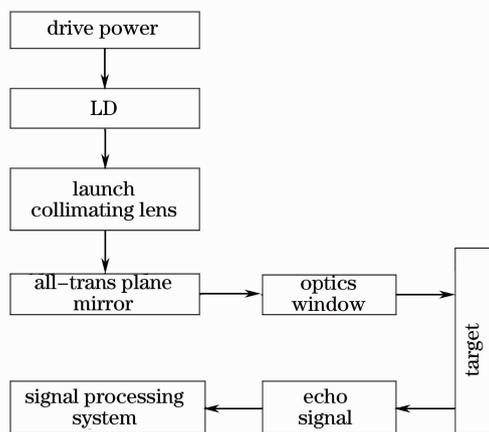


图 2 系统工作流程图

Fig. 2 System of working flow chart

方向和垂直方向发散角的差异也很大。通常,垂直于结平面方向的发散角 θ_{\perp} 达到 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,平行于结平面的发散角 θ_{\parallel} 为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。半导体激光器的远场样图如图 3 所示。由于半导体激光器的发散角差异如此之大,严重影响其探测距离,在激光近炸引信的应用中需对其进行准直整形。

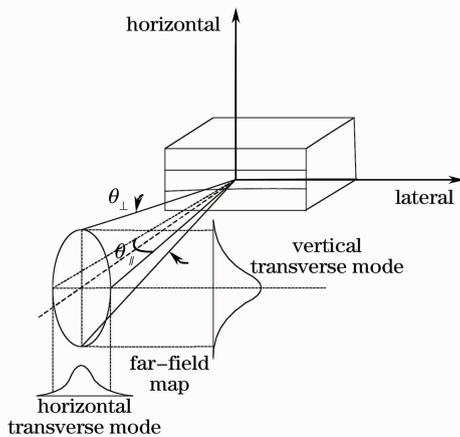


图 3 半导体激光器的远场样图

Fig. 3 Far-field drawing of semiconductor lasers

综合国内外半导体激光器光束准直方法的报道,可将其归纳为单透镜法、组合透镜法、渐变折射率透镜法、液体透镜法、反射法和衍射法等。第一种方法准直效果差,其余方法结构过于复杂。在设计光学准直系统的时候,应全面考虑系统的性能,不仅要满足准直性能,而且也要满足功率和体积等其他方面的要求。在激光引信中,为了减小引信的体积,降低引信成本,激光引信半导体激光器的光学准直系统一般都不采用二级或多级光学准直系统,而是采用单级单透镜光学系统。本文根据大视场激光近炸引信光学透镜结构组成,将全反平面镜和发射透光窗口设计成和发射准直透镜具有相同功能的光

学透镜,实现出射激光束的多级整形,从而减小发射激光束发散角,提高光斑整形能力。

4 非球面透镜组光学设计

非球面光学与球面光学相比,有很大的优势,非球面可以提高系统的相对口径比,扩大视场角,在提高光束质量的同时使得透镜数比球面构成的少,并且镜头形状的小型化,可减轻系统重量,有利于激光近炸引信的小型化。样在提高激光近炸引信系统光束质量的同时,又能使结构相对简单,系统重量减轻,对整个系统具有重要的意义。

非球面曲面方程为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 + \dots, \quad (1)$$

式中 Z 为镜面凹陷度; c 为非球面的基准面或者辅助球面的曲率; r 为镜面的孔径半径; k 为锥面度; a_2, a_4, a_6 为多项式系数^[7]。 Z 与 r 关系如图 4 所示。

当 a_2, a_4, a_6 等系数等于 0 时, (1) 式变为二次曲面方程

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}. \quad (2)$$

本文采取的半导体激光器波长为 904 nm, 发散角 $\theta_{\perp} = 35^\circ, \theta_{\parallel} = 10^\circ$ 。

用 Zemax 软件进行半导体激光器准直透镜设计, 计算出系统焦距 $f = 20$ mm, 数值孔径 NA

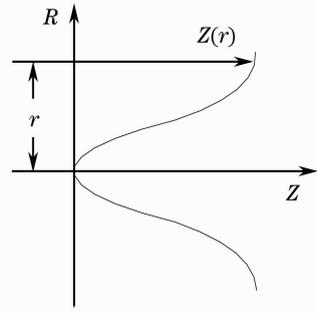


图 4 Z 与 r 关系示意图

Fig. 4 Relationship between of Z and r

$= 0.50$, 准直透镜的前后表面半径分别为 10.39 mm 和 -70.28 mm, 厚度为 6 mm, 孔径为 12 mm。准直透镜结构如图 5 所示。



图 5 准直透镜结构图

Fig. 5 Collimating lens structure

非球面准直透镜像差如表 1 所示, 其中 STO 为第一面镜, IMA 为成像平面, TOT 为球差之和, SPHA 为由指定面贡献的球差值, COMA 为指定贡献的彗差, ASTI 为三级像差, FCUR 为指定面贡献的场面, DIST 为指定面贡献的畸变。表 1 的结果显示系统像质得到有效改善。

表 1 非球面准直透镜像差

Table 1 Aberration of aspheric collimating lens

Surface	SPHA S1	COMA S2	ASTI S3	FCUR S4	DIST S5
1	-0.050730	0.004833	-0.000003	0.000203	0.000002
STO	0.076351	-0.004113	0.000206	0.000032	-0.000022
IMA	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
TOT	0.026800	-0.000313	0.000205	0.000117	-0.000013

与上述步骤一致, 同样采用 Zemax 软件进行全反平面镜和发射透光窗口设计, 设计出的整体结构如图 6 所示。

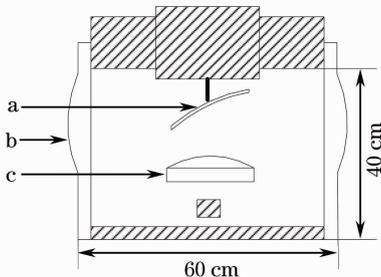


图 6 多级发射准直光学透镜结构图

Fig. 6 Structure of multi-collimating lens

系统工作流程: 激光发射模块发射出竖直方向发散角为 $30^\circ \sim 40^\circ$, 水平方向发散角为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 的脉冲激光束, 经过非球面发射准直透镜 c 一次准直, 照射在下全反会聚非球面镜 a 上, 发射激光束经过下全反会聚非球面镜的二次准直, 照射到发射透光、准直一体化整流罩 b 上, 经过第三次的准直整形, 发射激光束以较小的发散角周向出射, 进行空间目标 360° 大视场探测。

5 系统光学仿真与对比实验分析

采用 Zemax 软件, 对比分析初始远场光斑、经单透镜准直后的远场光斑以及多级准直系统准直后

的 8 m 处远场光斑样图,分别如图 7(a)、(b)、(c)所示。可见,初始光斑尺寸巨大,光斑能量发散,经传统单透镜准直整形后,光斑尺寸减小,能量集中,中心辐照亮度为 0.9001 W/cm^2 ;经多级光学准直透

镜准直后,光斑尺寸显著减小,能量高度会聚,光斑更均匀,光束能量分布更集中,中心辐照亮度达到 8.1246 W/cm^2 ,与单级非球面准直透镜相比,将近增加了 10 倍,系统作用距离得到显著提高。

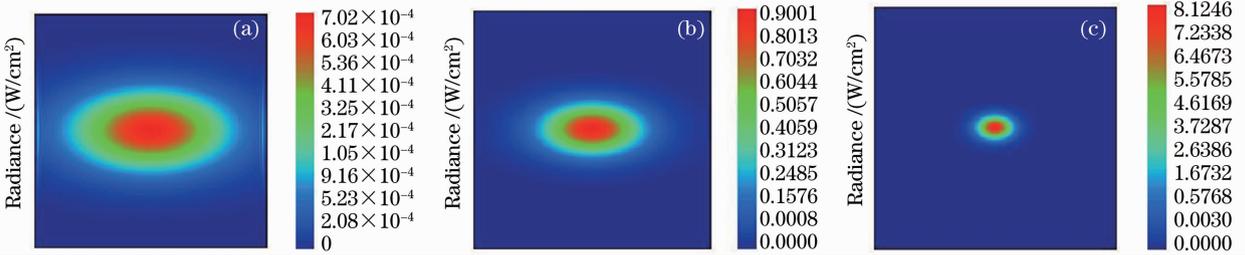


图 7 远场光斑截面图。(a) 准直前光斑远场样图;(b) 单透镜准直后光斑远场样图;(c) 多级透镜准直后远场光斑样图

Fig. 7 Sections of far-field spot. (a) Far-field spot drawing before alignment; (b) far-field spot drawing after collimating by single aspheric lens; (c) far-field spot drawing after collimating by multi-aspheric lens

根据设计加工多级非球面准直透镜,进行准直整形对比试验,图 8(a)为未经任何准直的初始半导体激光器远场光斑,经过单级非球面准直透镜整形的光斑如图 8(b)所示,图 8(c)为经多级非球面透镜组准直后的远场光斑。可见,初始光斑尺寸巨大,光

斑能量发散,经过单级非球面准直透镜准直后的光斑尺寸减小,能量集中,经多级整形透镜准直后的光斑尺寸减小,光斑形状均匀,中心辐照亮度显著提高。与 Zemax 软件仿真结果吻合,对比验证了多级准直光学系统的优越性。

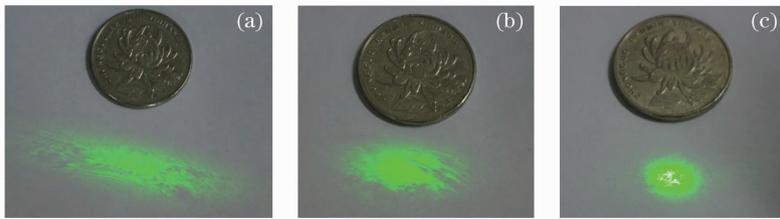


图 8 光学准直实验光斑。(a) 准直前原始光斑;(b) 单透镜准直后光斑;(c) 多级透镜准直后光斑

Fig. 8 Spot of optics collimation experiment. (a) Original spot before collimating; (b) spot after collimating by single lens; (c) spot after collimating by multi-lens

5 结 论

由于半导体激光器发射的激光束具有较大不对称的发散角,根据激光近炸引信发射光学系统结构特点,将传统的全反平面镜设计成全反、会聚一体化透镜,将传统光学透光窗口设计成光学整形、透光一体化整流罩,实现发射激光束的三级准直整形,有效提高了光束发射质量,增加了系统探测距离。

参 考 文 献

- 1 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, *et al.*. Detect or array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 521-525.
杨鹏翎,冯国斌,王振宝,等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 521-525.
- 2 Guo Jing, Zhang He, Zhang Xiangjin. Avalanche photodiode detecting technology for laser fuze[J]. J Detection and Control, 2010, 32(1): 77-79.
郭靖,张河,张祥金. 激光引信雪崩二极管光电探测[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(1): 77-79.

- 3 Ding Zhizhong, Wang Keyi, Zhan Zhenxian. Application of aspherical liquid lens in laser diode beam shaping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 623-626.
丁志忠,王克逸,詹珍贤. 非球面液滴透镜在 LD 光束整形中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 623-626.
- 4 Wang De, Li Xueqian. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 279-283.
王德,李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 279-283.
- 5 Liang Yiping, Dai Teli. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(11): 1305-1311.
梁一平,戴特力. 圆柱透镜对半导体激光光束准直性能的改进[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1305-1311.
- 6 Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 700-704.
张正辉,杨明,许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 700-704.
- 7 Yu Xiuying, Wang Jiang, Jiang Yong, *et al.*. A spheric collimating and shaping element design for diode laser range finders[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5): 71-73.
喻秀英,王江,姜勇,等. 半导体激光测距机非球面准直整形元件的设计[J]. 电光与控制, 2009, 16(5): 71-73.

栏目编辑:宋梅梅