

用于周向探测的均匀配光非球面柱透镜设计

郑 翔, 赵柏秦

中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要 针对周向探测系统对探测激光光束发散角大小和能量均匀分布的要求,提出了一种基于非球面柱透镜阵列的分区探测方案。探测系统光源为快轴准直的半导体激光器阵列,激光慢轴由非球面柱透镜阵列进行配光。提出了平行光线光源近似方法来简化复杂的高斯光束相关计算,并最终得到非球面曲线方程。应用上述方程确定的非球面柱透镜阵列,得到发散角可调且功率密度关于弧矢面平面角均匀分布的出射光束,均匀度可达 98.64%。为减小光学系统公差的影响,设计了波浪型结构透镜阵列。通过误差分析可知:透镜材料的折射率误差只影响发散角的大小而不影响配光的均匀性;波浪型透镜阵列替代传统柱透镜阵列,避免了相邻透镜之间的楔形结构,减小了制造难度和制造误差;线光源长度与透镜周期对应,使得装配时透镜偏心和倾斜产生的公差影响减弱。

关键词 光学设计; 非成像光学; 非球面柱透镜; 周向探测; 均匀配光; 高斯光束

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0522003

Design of Aspheric Cylindrical Lens of Uniform Light Distribution for Circumferential Detection

Zheng Xiang, Zhao Baiqin

Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract A solution of partition detection based on aspheric cylindrical lens array is proposed, which aims at the requirements of circumferential detection system on the detection laser beam divergence angle and energy distribution. Source of the detection system is a fast-axis collimated laser diode array. Slow-axis light power is distributed via aspheric cylindrical lens array. Collimated line source approximation is put forward to simplify the complicated process of corresponding calculation on Gaussian beam, and an equation of the aspheric curve is finally established. The aspheric cylindrical lens array is determined by applying this equation, the system can obtain outgoing beam with adjustable divergence angle and uniform power density distribution about plane angle in sagittal plane. And the evenness can reach 98.64%. A lens array with wavy structure is designed to diminish the effect of tolerance of optical system. According to tolerance analysis, the refractive index tolerance of lens material only influences the beam divergence angle instead of the evenness of light distribution. And the traditional structure of lens array is replaced by wavy structure so that wedge shape between adjacent lens can be eliminated effectively, which reduces the difficulty and tolerance in manufacture. Moreover, the length of line source is consistent with the periods of lens array, which weakens the influences of tolerance of lens eccentricity and lens tilt during fabrication.

Key words optical design; non-imaging optics; aspheric cylindrical lens; circumferential detection; uniform light distribution; Gaussian beam

OCIS codes 220.1250; 140.3300; 080.4295; 220.4298

1 引 言

相对于传统空间探测系统,激光空间探测具有主动性好、方向性强和不易受电子干扰等优点,因此它在武器系统中得到了广泛应用。

收稿日期: 2016-12-26; **收到修改稿日期:** 2017-01-18

基金项目: 郑 翔(1992—),男,硕士研究生,主要从事空间探测光学系统方面的研究。E-mail: zhengxiang@semi.ac.cn

作者简介: 赵柏秦(1960—),男,博士,研究员,主要从事激光近炸引信方面的研究。

E-mail: bqzhao@semi.ac.cn(通信联系人)

随着现代化对抗技术的发展,在对目标进行精确定位探测的过程中需要面对越来越复杂的情况,比如探测系统载体与探测目标之间存在着复杂的相互交汇状况,载体与目标的高速运动或旋转等。这就要求激光探测系统必须具有大视场探测、快速识别及精确响应的能力。目前,周向探测系统主要有4种常用的光束布局方式:多辐射方案、分区方案、区域扫描方案和同步扫描方案。其中分区方案结构简单,与多辐射方案相比可探测的最小目标尺寸较小,360°全覆盖探测,多个分区既可同步工作组成一个大的探测场,也可轮换工作形成分区扫描探测以增大功率利用率^[1-2]。

分区方案的光束布置是由几个扇形光束构成的探测场,每个分区的光束应是远场发散角由分区数目决定的线型均匀光束。半导体激光器发出的激光属于高斯光束,快轴和慢轴具有不同的发散角。为了提高光源功率,采用半导体激光器线型阵列,在光束整形时,就需要对快轴发散角进行准直,按分区要求精确扩展慢轴发散角并使得相应角度内功率密度均匀分布。

目前,国内外针对光束整形的方案主要有非球面透镜、柱透镜阵列、复合透镜结构、自由曲面反射镜或透镜等。Wang C Y等^[3]提出一种非球面柱透镜激光标线器对快慢轴准直后的半导体激光光束进行整形,得到在特定距离处的辐射照度均匀分布的线型光束。Bayer A等^[4]提出了一种“chirped”结构的柱透镜阵列,实现大功率激光器慢轴照度均匀分布。Zah Chung-En等^[5]提出一种三圆柱面棱镜,使得半导体激光出射光束在快轴方向上被分割为三部分,然后叠加在远场工作平面上,达到特定工作距离处光强均匀分布。然而以上光学系统设计都只针对特定工作距离平面上的能量分布,没有考虑扩展发散角,且结构较为复杂,加工难度大。黄坤等^[6]提出的三角楔柱透镜和王涛^[7]提出的负柱面镜与正柱面镜组合光学系统实现了激光发散角的扩展,但未改变高斯光束能量分布。自由曲面反射或折射系统实现的线型均匀光束效果好,但结构更为复杂,不适于实际应用^[8-9]。

针对周向探测系统的要求及研究现状的局限,本文提出一种基于非球面柱透镜阵列的分区探测方案。该非球面柱透镜阵列实现出射光束发散角与分区数量对应可调,探测平面内功率密度分布均匀。通过计算非球面曲线斜率变化规律和出射光能量分布、发散角大小的关系,确定非球面柱透镜曲线方程,并提出一种用平行光线光源近似高斯光源的方法以简化与高斯光束有关的计算。这种方法为简化光束整形设计领域的计算提供了参考。此外,设计了一种波浪型透镜阵列,使阵列周期与激光器阵列长度一致,避免了传统透镜阵列相邻透镜之间的楔形结构,由加工误差和装配公差分析可知这种透镜结构减小了加工误差,并使装配公差容限增大,减小了加工难度,加快了周向探测系统的产品化进程。

2 非球面柱透镜阵列设计

2.1 周向探测系统分区方案初始条件

周向探测系统分区方案要求每个分区具有足够的探测距离,均匀的能量分布和零盲区。因此选用大功率窄脉冲半导体激光器阵列,激光波长为860 nm,为提高输出功率,每个激光器管芯有两个发光单元^[10],每个管芯平均功率约为15 W,十管芯阵列功率可达150~200 W。半导体激光器阵列结构图如图1所示,每个发光单元宽度为0.12 mm,间距0.04 mm,管芯间距0.2 mm,则十组管芯阵列总长度为4.8 mm。

激光光束远场发散角快轴约为30°,慢轴约为10°。激光器阵列沿慢轴方向排列,为提高功率密度,需对

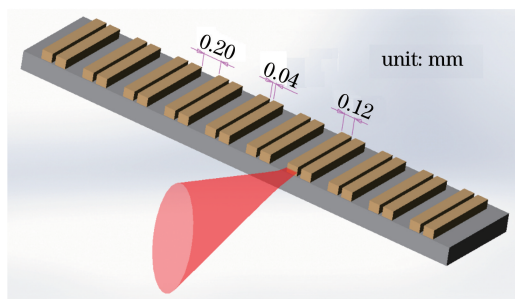


图1 半导体激光器阵列结构图

Fig. 1 Structural drawing of laser diode array

快轴进行准直,准直透镜选用光纤柱透镜,可将快轴发散角减小到 0.42° ^[11]。慢轴整形透镜选用非球面柱透镜阵列对慢轴方向光束能量重分配。

设计激光器阵列驱动电路时,为综合考虑寄生参数与驱动源输出电流能力,激光器阵列组合结构采用串并联结合形式^[12]。因此需要在每个管芯间留有足够的解理间距,即图 1 所示的 0.2 mm ,而 0.2 mm 的暗区会对光束输出连续性产生影响。将激光器阵列长度设计为透镜阵列周期的整数倍,这个解决方案可以通过周期性的排列弥补光源暗区。所用半导体激光器阵列弥补方式如图 2 所示,激光器阵列长度为 4.8 mm ,透镜周期为 1.6 mm ,则将三个透镜周期得到的光源分布重叠后等效为每隔 0.04 mm 存在两个发光单元, 0.04 mm 的暗区对高斯光束输出几乎没有影响,因此该激光阵列可等效为 1.6 mm 的高斯光束线光源。

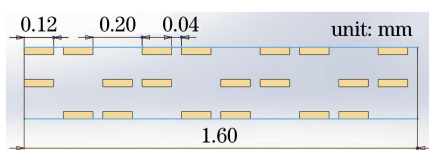


图 2 半导体激光器阵列按透镜周期排布

Fig. 2 Laser diode array arranged by lens cycle

此外,对于其他尺寸的激光器管芯或光刻结构,可以通过相同的周期弥补方式,消除光源暗区的影响。

2.2 非球面柱透镜面型计算

如前所述,半导体激光器阵列先经过光纤柱透镜进行快轴准直,再利用非球面柱透镜对慢轴进行配光,因此以线光源模拟准直后的激光器阵列,光源每点功率均为高斯分布,快轴完全准直,慢轴发散角为 10° 。这个线光源可以看作以 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 入射的无数平行光线光源叠加而成,每束平行光辐射照度都均匀分布,不同入射角度的平行光的功率关于入射角度呈高斯分布。基于这种近似,分析配光时只需考虑 0° 入射的平行光线光源,其他入射角度的平行光配光后的结果只会与 0° 入射平行光的配光结果呈一定角度。

如图 3 所示为单个非球面柱透镜光路图,设激光器慢轴方向为 x 轴,所在平面为弧矢面,快轴方向为 y 轴,所在平面为子午面,主光轴为 z 轴。入射平行光线光源长 1.6 mm ,快轴发散角为 0° ,慢轴发散角 10° ,透镜宽度为 1.6 mm ,与线光源长度对应。

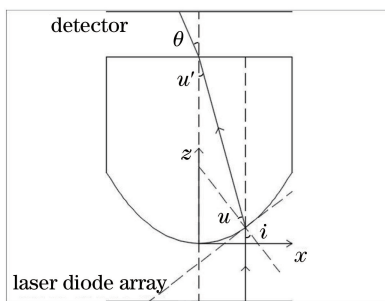


图 3 非球面柱透镜光路图

Fig. 3 Optical path of the aspheric cylindrical lens

因此有透镜半宽度 $x \in [0, 0.8]$,出射光发散半角 $\theta \in [0, \theta_0]$, x 和 θ 成正比,透镜半宽为 0.8 mm ,出射最大发散半角为 θ_0 。已知入射的辐射通量关于空间变量 x 均匀分布,要求出射辐射通量关于发散角均匀分布。可得 θ 与 x 变化关系为:

$$\theta = \frac{5\theta_0}{4}x. \quad (1)$$

由透镜入射点处几何关系可知,入射点处切线斜率 $\frac{dz}{dx}$ 和入射角 i 的关系为:

$$\frac{dz}{dx} = \tan i. \quad (2)$$

根据透镜入射面和出射面折射定律及透镜中光束传播几何关系可得:

$$\sin i = n \sin u, \quad (3)$$

$$\sin \theta = n \sin u', \quad (4)$$

$$u' = i - u. \quad (5)$$

由(3)~(5)式可推出:

$$\tan i = \frac{\sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - 1}. \quad (6)$$

将(1)式和(6)式代入(2)式可得微分方程:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\sin\left(\frac{5\theta_0}{4}x\right)}{\sqrt{n^2 - \sin^2\left(\frac{5\theta_0}{4}x\right)} - 1}. \quad (7)$$

(7)式是根据折射定律和几何关系推出的入射面曲线斜率表达式。斜率与折射定律的关系使得辐射通量关于出射发散角均匀分布。入射面是非球面面型,即 z 关于 x 关系可通过求解该微分方程获得。

对于拥有 4 组激光器阵列模块的周向探测器系统,每组阵列模块的发散角要求达到 90° ,即 $\theta_0 = 45^\circ$,设透镜折射率 $n = 1.58$,代入(7)式求解微分方程数值解。由 Matlab 中刚性微分方程求解函数 ode15s 求得数值解,再通过麦夸特算法拟合得到非球面曲线表达式为:

$$z = 0.8462x^2 + 0.1558x^4 + 0.0204x^6. \quad (8)$$

根据(8)式的非球面曲线表达式,将透镜数据代入光学仿真软件 Zemax 中 Biconic Zernike Lens 模型,发射光源用 1.6 mm 线光源模拟,光源每点功率分布为高斯分布,慢轴发散角为 10° ,发射功率 100 W, Zemax 仿真效果图如图 4 所示。采用 Zemax 中蒙特卡罗分析和光线追迹法得到仿真结果曲线如图 5 所示,纵轴表示单位平面角内的辐射通量,即平面角功率密度,横轴表示 $x-z$ 平面内透镜出射面的出射角,即透镜配光后光束发散半角 θ 。由图 5 可见,平面角功率密度关于激光光束出射角均匀分布,均匀范围可达 $-40^\circ \sim 40^\circ$,均匀度 e 可以表示为:

$$e = 1 - \sum \frac{|\rho_i - \bar{\rho}|}{N\bar{\rho}}, \quad (9)$$

式中 ρ_i 为各角度处功率密度, $\bar{\rho}$ 为平均功率密度, N 为 ρ_i 数量。则 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 范围内均匀度为 98.64%,光束半功率点发散宽度约为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。

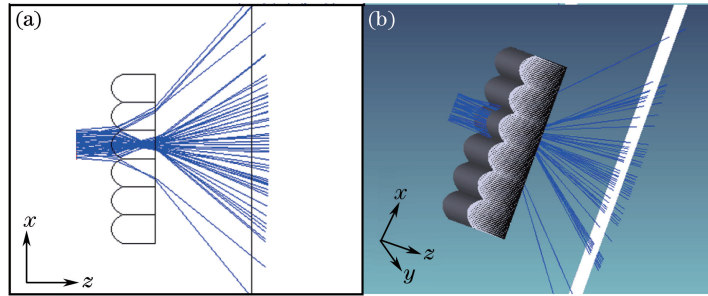


图 4 Zemax 仿真效果图。(a) $x-z$ 平面图; (b) 三维模型

Fig. 4 Simulation layout in Zemax. (a) Layout of $x-z$ plane; (b) 3D model

在实际测量时,平面角功率密度分布可由旋转台搭载 PIN 光电探测器或电荷耦合器件(CCD)图像传感器测得。

2.3 平行光近似方法验证

高斯光束光强分布可以表示为:

$$I = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{\sqrt{2\ln 2}\theta_x}{\theta_{FWHM}}\right)^2\right], \quad (10)$$

式中远场发散角 $\theta_{FWHM} = 10^\circ$, I_0 为峰值光强。光强 I 随 θ_x 呈高斯分布变化。因此验证平行光近似法时,采用微元法将高斯光束的倾斜角度分为 $-10^\circ \sim 10^\circ$,间隔为 1° 的 21 束平行光线光源的 21 束平行光线光源并

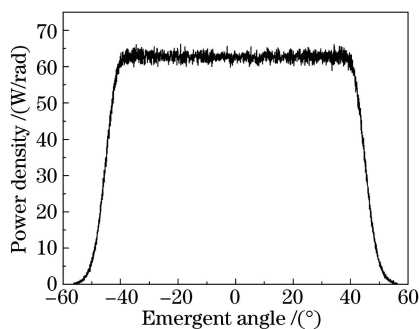


图 5 非球面柱透镜平面角功率密度分布

Fig. 5 Power density distribution of plane angle of the aspheric cylindrical lens

各自照射(8)式所得的透镜,平行光线光源发射功率与倾斜角度关系由(10)式确定,取 $I_0 = 1 \text{ W}$ 。图 6 给出了平行光线光源倾斜角度为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的出射结果,随着倾斜角度增大,光源功率随高斯分布递减,出射光线出现一定的倾斜。由于透镜阵列和光源的对称性, $-10^\circ \sim 0^\circ$ 的功率密度分布曲线关于出射角为 0 的曲线对称。将 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的各微元结果累加并做归一化处理,得到图 7 中平行光近似曲线,将该曲线与真实高斯分布光源的出射结果(图 7 高斯光源曲线)进行比较。由图 7 可见,平行光近似方法得到的平面角功率密度分布情况与真实高斯光源出射结果完全一致。

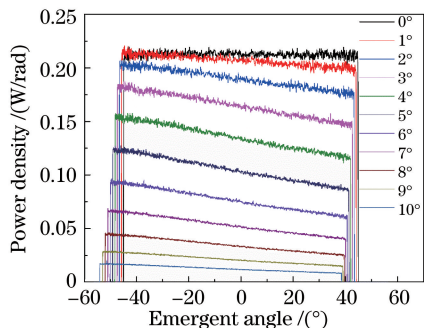


图 6 不同倾斜角的平行光线光源出射结果

Fig. 6 Output of collimated line sources with different inclined angles

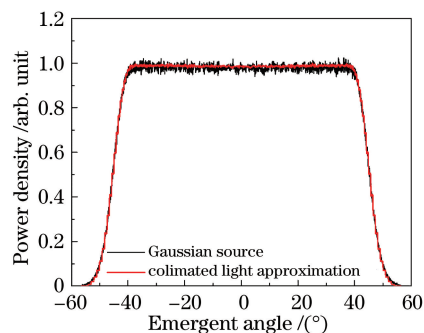


图 7 平行光线光源和高斯光源功率密度分布结果归一化比较

Fig. 7 Comparison of power density distributions of collimated line source and Gaussian source after normalization

2.4 平面角功率密度均匀分布宽度及发散角可调性

所述的计算部分,初始条件为 4 组激光器阵列模块,激光光束发散角为 90° ,因此发散半角 θ_0 设为 45° ,在实际应用中,由于系统对尺寸、探测距离和功率的不同要求,整个周向探测系统可能需要不同组数的激光器模块,每组激光器阵列的发散角就有所不同。针对不同发散角的发散透镜曲线进行计算时,只要将发散半角 θ_0 设为需求的值即可。表 1 给出了 θ_0 为 $22.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时非球面柱透镜的多项式曲线方程,图 8 给出了不同发散角度的 Zemax 仿真结果。由此可见,该方法可方便地计算出对应任意发散角度的非球面柱透镜,且角度适用范围广,功率分布均匀度高。

表 1 不同发散角的透镜参数

Table 1 Lens parameters with different divergence angles

Divergence angle / (°)	θ_0 / (°)	Equation of curves		
		x^2	x^4	x^6
45	22.5	0.4232	0.0193	0.0008
60	30	0.5642	0.0458	0.0030
90	45	0.8462	0.1558	0.0204
120	60	1.1258	0.3862	0.0576

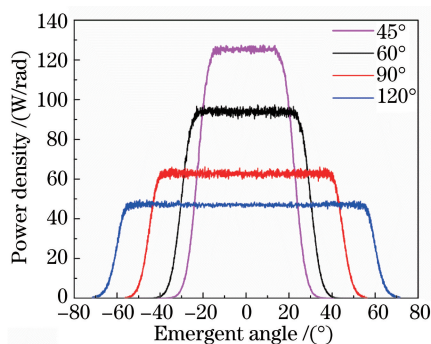


图 8 不同发散角的平面角功率密度分布

Fig. 8 Power density distributions of plane angle with different divergence angles

3 误差分析

光学系统的公差主要来源于透镜设计误差、制造工艺、透镜材料、系统装配和环境。其中,设计所得光学系统的质量由输出光束能量分布均匀度指标来衡量,由 2.2 节可知,输出光束能量分布均匀度可达 98.64%,微小的不均匀性主要来自于蒙特卡罗分析的统计误差,所以认为设计引入的初始误差很小,在此可以忽略。

对于透镜制造工艺,现有的非球面透镜加工工艺主要为对玻璃的车削、磨削、铣削,光学塑料成型技术,光学玻璃模压成型技术和特种加工技术^[13]。选择适当的加工工艺可以减小透镜尺寸、表面粗糙度、曲率等产生的误差。但对于透镜阵列,透镜之间的楔形结构难以加工,若采用加工单个透镜再进行粘连的方法容易引入新的误差。因此,对透镜阵列结构作出改进,设计出波浪型透镜阵列,即每隔一个透镜单元将非球面曲线翻转,透镜柱面的曲率变化规律不变,透镜阵列对激光光束的配光效果也不会发生变化。透镜阵列凸面和凹面的差异在于凸面先汇聚后发散,凹面呈发散状,因此波浪型透镜阵列的周期应为凸面和凹面两个透镜单元的长度之和,激光器阵列线光源的长度应等于波浪型透镜阵列周期的整数倍。为了维持原有激光器阵列的周期弥补方案,波浪型透镜阵列周期应为 1.6 mm,即透镜单元宽度缩小为原来的 0.5 倍,即 0.8 mm,而曲面斜率变化规律不变,则曲面斜率表达式变为:

$$z' = 2 \times 0.8462 \times (2x) + 4 \times 0.1558 \times (2x)^3 + 6 \times 0.0204 \times (2x)^5, \quad (11)$$

非球面面型曲线方程变为:

$$z = 1.6924x^2 + 1.2464x^4 + 0.6528x^6. \quad (12)$$

将(10)式代入 Zemax 仿真模型,并适当减小透镜厚度。光源采用图 1 所示激光器阵列,总输出功率为 150 W,在非球面透镜前采用直径为 0.8 mm 的石英光纤柱透镜准直激光快轴光束,仿真效果图如图 9 所示。仿真得到出射光束快轴和慢轴结果如图 10 所示。由图 10 可见,快轴准直效果好,慢轴功率密度分布均匀,符合设计目标。

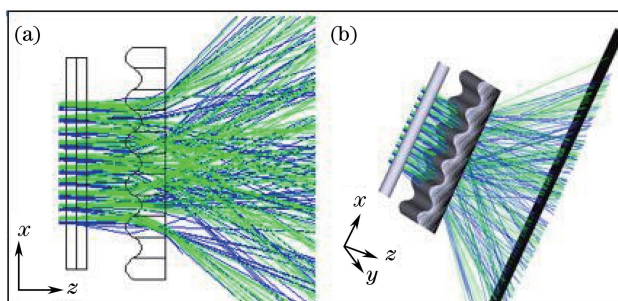


图 9 采用快轴的 Zemax 仿真效果图。(a) $x-z$ 平面图; (b) 三维模型

Fig. 9 Simulation layout in Zemax by using fast-axis. (a) Layout of $x-z$ plane; (b) 3D model

透镜材料和环境的影响主要体现在折射率的误差和激光光源波长的漂移上,由色散关系可知,波长漂移可等同于折射率误差。而对于所用的非球面柱透镜,平面角功率密度关于出射角的分布与透镜非球面曲线

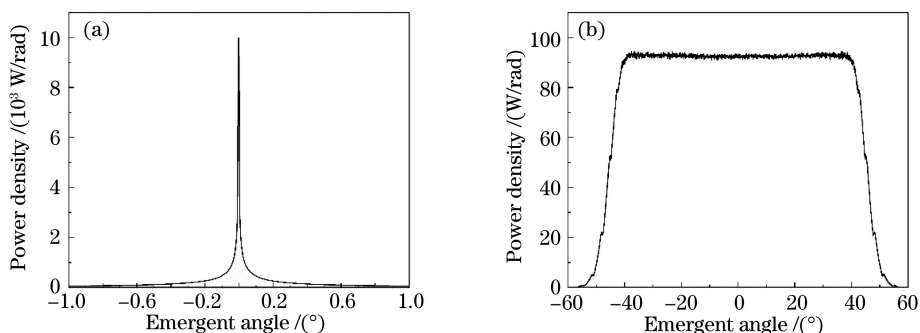


图 10 波浪型透镜阵列仿真结果。(a) 快轴准直结果；(b) 慢轴均匀配光结果

Fig. 10 Simulation result of wavy lens array. (a) Collimated result of fast-axis; (b) uniform distribution result of slow-axis
 的斜率变化相关, 折射率的变化只影响出射光束发散角的大小, 平面角功率密度分布均匀度不发生变化。图 11 给出了出射光束半功率点发散角与折射率的关系。由图 11 可见, 发散角变化与折射率近似成线性关系, 变化速率约为 $1.6^\circ/0.01$ (折射率)。

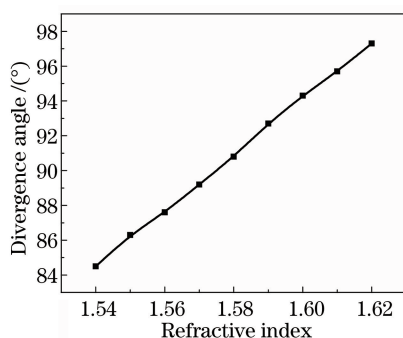


图 11 发散角与折射率关系

Fig. 11 Divergence angle as a function of refractive index

光学系统装配时引入的公差主要来自于机械结构加工误差造成的透镜偏心、倾斜、旋转和物距变化等。对于所设计的波浪型柱透镜阵列, 因为线光源长度与柱透镜阵列周期对应, x 方向的偏心不会引起出射结果的变化; 透镜阵列在 y 方向为柱面, y 方向的偏心没有影响; 透镜关于 x 轴的旋转误差相当于光束经过一个略微倾斜的平行平板, 光束只在 y 方向上发生微小的平移, 功率密度关于角度的分布没有变化; 由平行光线光源近似方法可知, 物距即 z 方向变化对出射光分布影响也极小。因此, 只需考虑透镜关于 y 轴和 z 轴的旋转公差造成的影响。图 12 所示为透镜关于 y 轴旋转 1° 时出射光束的平面角功率密度分布, 光束发散角不变, $-40^\circ \sim 40^\circ$ 范围内的均匀度变为 97.89%。透镜关于 z 轴旋转 1° 时出射光束的功率密度归一化分布情况如图 13 所示, 出射光束成像在 y 方向上倾斜了 1° , x 方向平面角的功率密度分布没有发生变化, 与图 5 一致。

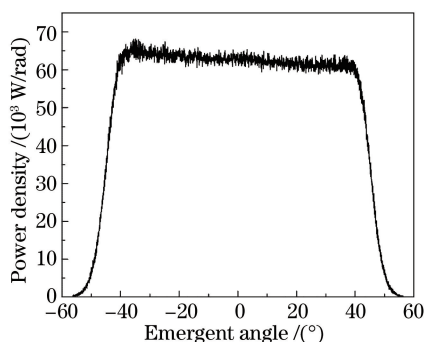


图 12 透镜关于 y 轴旋转 1° 时平面角功率密度分布

Fig. 12 Power density distribution of plane angle while lens rotating 1° around the y -axis

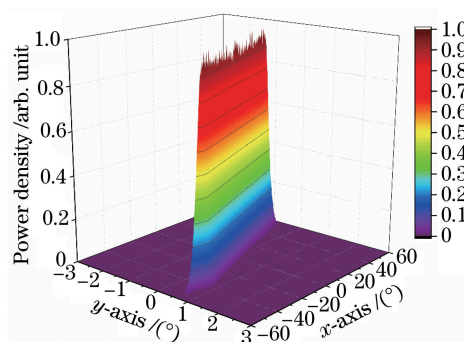


图 13 透镜关于 z 轴旋转 1° 时光束成像

Fig. 13 Beam imaging while lens rotating 1° around the z -axis

4 结 论

针对周向探测系统对探测距离、光束发散角和能量均匀性的要求,提出了一种基于半导体激光器阵列和非球面柱透镜阵列的分区探测方案。出射光束发散角大小及功率分布均匀性由非球面透镜决定,非球面曲线方程通过联立能量传输和透镜折射定律方程得到。计算过程中,提出了平行光线光源近似方法以简化涉及高斯光束的计算。经过 Zemax 光学软件仿真,最终可获得功率密度分布均匀度高达 98.64% 的出射光束,且出射光束发散角可通过调整非球面精确设置。还提出一种波浪型柱透镜阵列,避免了传统透镜阵列相邻透镜之间的楔形结构,可以减小加工难度和加工误差。通过误差分析可知,整个系统的制造和装配公差容限得到了极大的提升。为周向探测系统提供了更简便的设计方案和更适合的度量方法,降低了加工难度和成本,推动了周向探测系统的研究和产品化进程。此外,简化了涉及高斯光束的计算,为光束整形研究领域奠定了扎实的理论基础。

参 考 文 献

- [1] Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin, *et al.* Single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 84-89.
甘霖, 张合, 张祥金, 等. 激光近炸引信单光束脉冲周向探测技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 84-89.
- [2] 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.
- [3] Wang C Y, Tan Q C, Guo R H. Design and optimization of a linear laser beam[J]. *Lasers in Engineering*, 2014, 27(5): 373-381.
- [4] Bayer A, Meinschien J, Mitra T, *et al.* Beam shaping of line generators based on high power diode lasers to achieve high intensity and uniformity levels[C]. *SPIE*, 2008, 7062: 70620X.
- [5] Zah C E, Luo Y, Tsuji S. A novel diode laser beam line generator and homogenizer[C]. *SPIE*, 2005, 5624: 493-497.
- [6] Huang Kun, He Pin'gan, Fan Ruo, *et al.* Uniformization shaping method of line laser beam[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 523-526.
黄坤, 何平安, 范若, 等. 线激光束均匀化整形方法研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 523-526.
- [7] Wang Tao. A novel optical system for laser panoramic fuze[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(5): 412-414.
王涛. 一种新型激光周视引信光学系统[J]. *应用光学*, 2006, 27(5): 412-414.
- [8] Feng Z X, Huang L, Gong M L, *et al.* Beam shaping system design using double freeform optical surfaces[J]. *Optical Express*, 2013, 21(12): 14728-14735.
- [9] Tang Jian, Yang Bo. Free-form reflector design for beam shaping of laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 208002.
唐舰, 杨波. 基于半导体激光器的线性整形自由曲面反射镜设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 208002.
- [10] Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- [11] Gao Xuesong, Gao Chunqing, Gao Mingwei, *et al.* Experimental study by using the micro-cylindrical lens as the fast axis collimator for laser diode array[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(8): 563-565.
高雪松, 高春清, 高明伟, 等. 光纤微透镜用于阵列半导体激光器快轴准直研究[J]. *激光与红外*, 2005, 35(8): 563-565.
- [12] Xin Desheng, Zhang Jianjia, Cheng Yongjie. Research on the key technology of the semiconductor laser light source with high-power and narrow-pulse[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1485-1492.
辛德胜, 张剑家, 程勇杰. 大功率窄脉冲半导体激光光源等效电路参数研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1485-1492.
- [13] Yin Shaohui, Zhang Lexian, Chen Fengjun, *et al.* Review of machining technology and equipment for small aspheric surface[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(2): 103-111.
尹韶辉, 张乐贤, 陈逢军, 等. 小口径非球面加工技术及装备综述[J]. *光学技术*, 2013, 39(2): 103-111.