

用于 VCSEL 阵列光分布调控的自由曲面透镜阵列设计

薛宇扬^{1,2}, 苏宙平^{1,2*}

¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 针对垂直腔面发射激光器(VCSEL)设计了自由曲面整形透镜,使 VCSEL 输出光束在目标面呈均匀的辐照度分布。自由曲面透镜前表面为非球面,后表面为自由曲面。在设计自由曲面的设计过程中,在自由曲面透镜中间区域设置虚拟平面,根据虚拟平面和目标面能量之间的关系,确定自由曲面入射光束和出射光束的方向矢量,获得自由曲面采样点上各点的法向矢量。自由曲面的矢高和法向矢量之间构成了一个泊松方程。引进离散余弦变换的方法求解泊松方程,获得了自由曲面的矢高。模拟结果表明使用自由曲面整形透镜可将目标面辐照度均匀度提升到 93.9%。为了适应在高功率场景中的应用,基于单个 VCSEL 模组的辐照度分布,应用蚁狮算法优化 VCSEL 模组之间的距离,对 VCSEL 模组阵列进行了二次光分布调控,使得阵列在目标面上的辐照度均匀度可以达到 85.2%,光效率达到 91.8%。

关键词 光学设计; 垂直腔面发射激光器; 自由曲面; 泊松方程; 离散余弦变换

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231842

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种典型的半导体激光器,被应用于高速光通信和光学传感器^[1]、泵浦全固态激光器或者光纤激光器^[2]、激光雷达^[3]和结构光^[4]等领域。VCSEL 出射的光束通常为高斯分布,而在很多应用场景如激光加工、激光照明等需要进行光场调控或激光整形,使其在目标面产生均匀的辐照度分布^[5]。激光整形常用的器件有微透镜阵列^[6]、衍射光学元件(DOE)^[7]、非球面透镜^[5]、空间光调制器^[8]等。自由曲面光学元件以其光效率高、自由度高、可以灵活调控光分布的特点,已经越来越广泛地应用于激光整形^[9]。常用的自由曲面激光整形方法有 Monge-Ampère 直接构建法^[9-10]、支持二次曲面法(SQM)^[11-12]、能量映射或光线映射法^[13]及波前迭代法整形(IWT)^[14]等。目前,关于使用自由曲面光学元件对 VCSEL 激光进行整形,特别是针对多个 VCSEL 光源构成的模组阵列设计自由曲面并进行光分布调控的报道比较少。

本文设计了自由曲面透镜用于光束整形,该透镜前表面为非球面,后表面为自由曲面,基于自由曲面法向矢量与矢高构建了一个泊松方程^[15],基于离散余弦变换^[16]求出矢高,从而构建自由曲面。单个的 VCSEL 光源可以通过自由曲面透镜调控光分布,使其在目标

面产生均匀的辐照度分布。然而,单个 VCSEL 的光功率有限,其在一些特定应用场景会受到限制,使用多个 VCSEL 光源形成光源阵列可以提升功率。基于单个 VCSEL 模组产生预定的辐照分布,通过蚁狮优化算法优化阵列中各 VCSEL 模组之间的间距对光分布进行二次调控,进而实现了目标面辐照分布均匀度的进一步提升。

2 用于调控 VCSEL 光分布的自由曲面透镜设计法

2.1 设计方法

如图 1 所示,自由曲面透镜包含了两个面,靠近光源的面是一个非球面,用于将 VCSEL 的光束进行准直,第二个面是一个自由曲面,用于调控光分布。在透镜的非球面与自由曲面之间设置一个虚拟平面。将虚

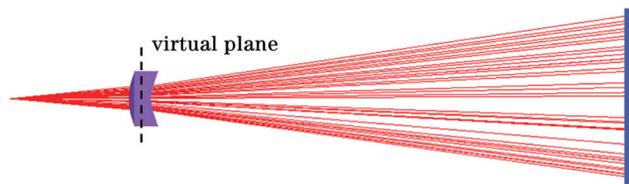


图 1 包含自由曲面透镜的 VCSEL 光束整形系统
Fig. 1 Beam shaping system with VCSEL containing freeform lens

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-02-07; 录用日期: 2024-02-23; 网络首发日期: 2024-03-13

通信作者: *zpsu_optics@163.com

拟平面与目标面进行网格划分,图 2 所示是透镜中的虚拟平面及后表面,其中后表面是一个自由曲面,因此需要通过设计调控目标面上的辐照度分布。

如图 2 所示,网格划分主要是控制虚拟表面和目标面对应网格的面积,使目标面上的辐照度分布均匀。对于虚拟面上任一网格 (i, j) ,也就是图 2(a)中的阴影

网格,其 4 个顶点对应的坐标如图 2(b) 所示,该网格的能量分布可表示为

$$dE_{i,j} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_{y_i}^{y_{i+1}} I(i, j) dx dy, \quad (1)$$

式中: $dE_{i,j}$ 为网格 (i, j) 处的能量, i 和 j 表示网格的索引; $I(i, j)$ 为该网格内的辐照度。

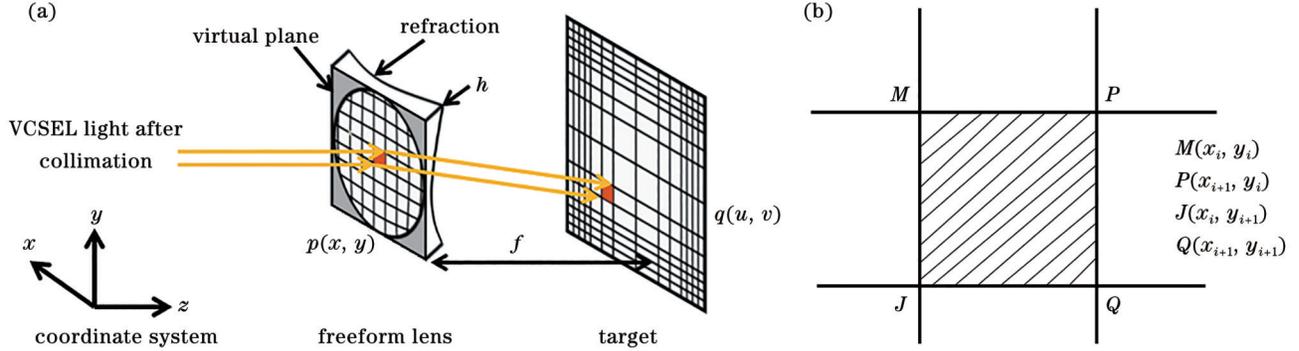


图 2 虚拟平面和目标面网格划分以及网格中的能量计算。(a)虚拟平面和目标面光线的映射关系;(b)单个网格上能量计算示意图
Fig. 2 Schematic of grid distribution between virtual plane and target plane, and energy calculation on each grid (a) Ray mapping relationship between virtual plane and target plane; (b) schematic representation of energy calculation on individual grid

为使目标面上辐照度分布均匀化,需要控制虚拟面和目标面对应网格的面积,图 3 为虚拟面和目标面上得到的最优网格分布。

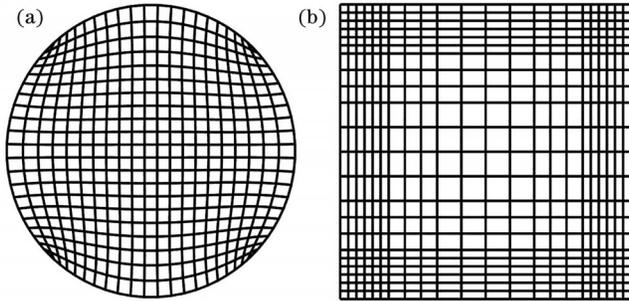


图 3 虚拟平面和目标面优化后的网格分布。(a)虚拟平面;(b)目标面
Fig. 3 Optimized grid distributions on virtual surface and target surface. (a) Virtual plane; (b) target plane

由图 2 可知,虚拟面内的某一网格的光线,经过自由曲面折射到对应的目标面网格。虚拟平面的任一网格点坐标用 (x, y) 表示,目标面的网格坐标用 (u, v) 来表示,通过控制自由曲面各点的法向矢量和矢高,使通过虚拟平面网格点 $p(x, y)$ 的光线经过自由曲面的折射后入射到目标面上 $q(u, v)$ 。光线对应自由曲面上各采样点的法向矢量^[15]可表示为

$$\mathbf{N}_{xy} = \frac{(u-x)\mathbf{i} + (v-y)\mathbf{j}}{n \sqrt{\|q-p\|^2 + (H-h)^2} - (H-h)}, \quad (2)$$

式中: n 为透镜材料的折射率; H 为自由曲面与目标面之间的距离; h 为自由曲面的高度。自由曲面的 z 坐标

可以表示为 $z = h(x, y)$ 。那么,折射表面的法向矢量 \mathbf{N} 可以用高度的一阶导数^[15]表示:

$$\mathbf{N} = \left(\frac{\partial h}{\partial x} \mathbf{i}, \frac{\partial h}{\partial y} \mathbf{j}, -\mathbf{k} \right) = (N_x \mathbf{i}, N_y \mathbf{j}, N_z \mathbf{k}). \quad (3)$$

进一步可以获得^[16]:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{N_x}{N_z} = P, \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{N_y}{N_z} = Q, \quad (5)$$

$$\mathbf{g} = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j}, \quad (6)$$

$$\nabla^2 h = \nabla \cdot \mathbf{g}, \quad (7)$$

式中: ∇ 表示散度运算; \mathbf{g} 为梯度场, $\mathbf{g} = [P, Q]^T$ 。式(7)为一个泊松方程,使用离散余弦变换求该泊松方程,可以获得自由曲面上各采样点的高度^[16]:

$$g_{k,l}^{(N)} = \text{dct2}(\nabla \cdot \mathbf{g}), \quad (8)$$

$$h_{k,l}'' = -\frac{g_{k,l}^{(N)}}{4 \left(\sin^2 \frac{\pi k}{2m} + \sin^2 \frac{\pi l}{2n} \right)}, \quad (9)$$

$$h_{k,l} = \text{idct2}(h_{k,l}''), \quad (10)$$

式中: $\text{dct2}(\cdot)$ 和 $\text{idct2}(\cdot)$ 分别为离散余弦变换及离散余弦逆变换算符; $g_{k,l}^{(N)}$ 为 $\nabla \cdot \mathbf{g}$ 离散余弦变换, N 表示 Neumann 边界条件, k 和 l 为各网格点的索引, $\forall(k, l) \in [0, m-1] \times [0, n-1]$, m 和 n 分别为网格点在 x 和 y 方向的总数量; $h_{k,l}''$ 为频域下的高度; $h_{k,l}$ 为自由曲面上第 (k, l) 个采样点处的矢高。

2.2 设计实例及仿真分析

使用上述的方法,针对 VCSEL 光源设计一款自

由曲面透镜,前表面是非球面,后表面是自由曲面,该系统的主要参数如表 1 所示。光源 VCSEL 的发散角为 8° ,束腰为 0.1 mm,自由曲面透镜的口径为方形,边长为 3.6 mm,透镜选用的材料为 PMMA,折射率 $n=1.49$,透镜与目标平面的距离为 30 mm,目标面的大小为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。VCSEL 出射的光束未经过自由曲面透镜准直、整形调控,直接出射到达目标面上,产生的辐照度分布图及轮廓如图 4 所示。

基于上述参数所设计的自由曲面上各采样点及法向矢量如图 5 所示,自由曲面呈 1/4 对称,该图给出的是透镜自由曲面的 1/4 区域。完整的自由曲面透镜实

表 1 VCSEL 整形系统设计参数
Table 1 Design parameters of beam shaping system for VCSEL

Parameter	Value
Divergent half angle of VCSEL / ($^\circ$)	8
Beam waist of VCSEL / mm	0.1
Beam waist radius after collimation / mm	1.4
Aperture diameter of lens / mm	3.6
Distance between lens and target surface / mm	30
Target surface size / ($\text{mm}\times\text{mm}$)	10×10

体如图 6 所示。

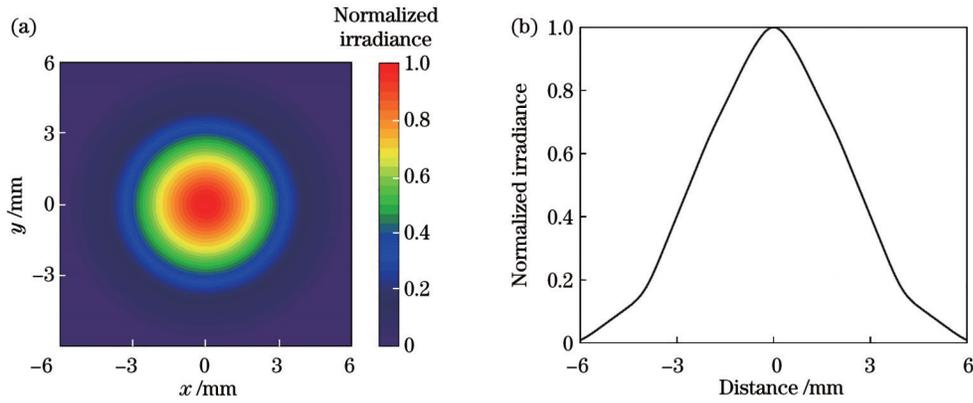


图 4 VCSEL 直接照射目标面辐照度分布图及轮廓曲线。(a) 辐照度分布图; (b) 轮廓曲线

Fig. 4 Irradiance distribution and profile on target surface for VCSEL directly illuminating. (a) Irradiance distribution; (b) profile

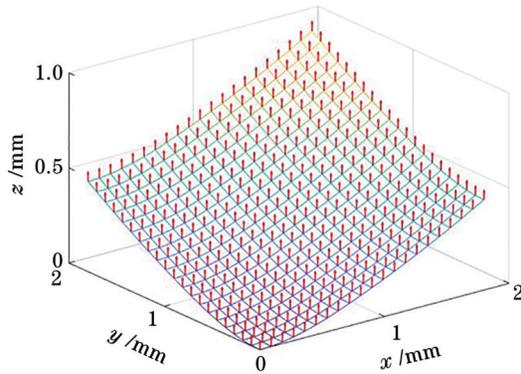


图 5 自由曲面的 1/4 及其对应的法向矢量

Fig. 5 Quarter section of freeform surface and its corresponding normal vector

VCSEL 出射的光束经过该自由曲面透镜,在目标面上产生的辐照度分布图及轮廓如图 7 所示。使用辐照度均匀度的评价标准,计算得到目标面的辐照均匀度达到了 93.9%。辐照度均匀度可表示为

$$U = 1 - \frac{\sigma}{\bar{E}}, \quad (11)$$

式中: U 为目标面的照度均匀度; σ 和 \bar{E} 分别为指定目标面辐照分布的标准差和平均值^[17]。

该方法所设计的自由曲面具有很好的平滑度,可以将其拟合成一个扩展多项式:

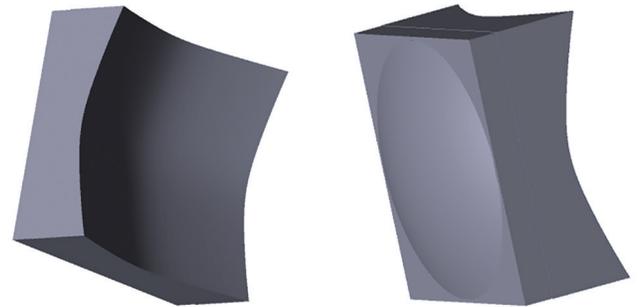


图 6 自由曲面透镜的实体模型图

Fig. 6 Solid model diagrams of freeform lens

$$F(x, y) = a_0 + a_1x^2 + a_2y^2 + \dots + a_ix^{2p}y^{2q} + \dots + a_8y^6 + a_9y^6. \quad (12)$$

该曲面呈 1/4 对称,所以拟合的多项式是一个偶次多项式,这里将其拟合为一个 6 阶的偶次多项式,共有 9 项,拟合精度用均方根误差 (RMSE) 表示,可以达到 2.5×10^{-3} ,拟合后的多项式系数如表 2 所示^[18]。

尽管设计整形系统的过程中考虑光束准直入射的情况,实际中非球面不可能将激光完全准直,仍会有残余发散角,图 8 分析了经过准直后残余的不同角度对目标面上辐照均匀度的影响,可以看出当残余的角度达到 3° ,均匀度降到了 85.4%。

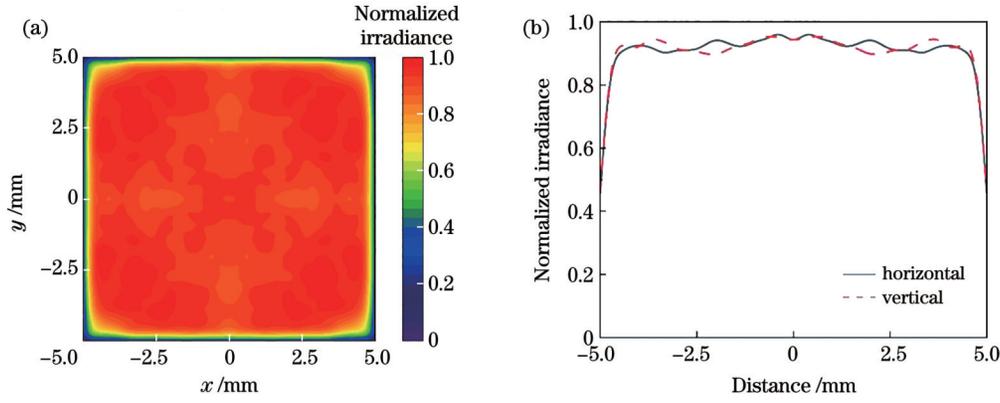


图 7 使用自由曲面透镜的目标面辐照度分布图及轮廓曲线。(a)辐照度分布图;(b)轮廓曲线

Fig. 7 Irradiance distribution and profile curves on target surface generated by freeform lens. (a) Irradiance distribution; (b) profile

表 2 拟合后的多项式系数

Table 2 Fitted polynomial coefficients

Item	a	$x^{2p}y^{2q}$
0	0.005427	1
1	0.244800	x^2
2	0.244800	y^2
3	-0.055850	x^4
4	0.000074	x^2y^2
5	-0.055850	y^4
6	0.000019	x^2y^4
7	0.000019	x^4y^2
8	0.007880	x^6
9	0.007880	y^6

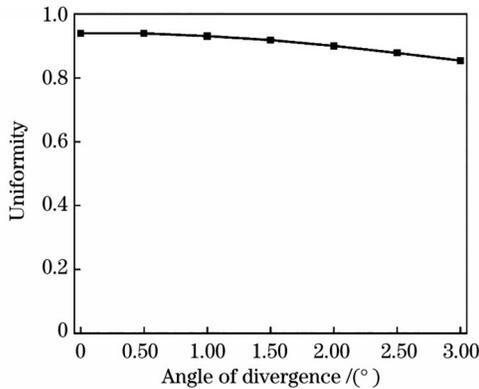


图 8 不同发散角情况下对应的均匀度

Fig. 8 Uniformity at different divergence angles

3 VCSEL 阵列光分布调控技术

3.1 VCSEL 阵列设计的理论与方法

使用多个 VCSEL 形成的光源阵列可以实现高功率的应用场景。这部分将讨论使用多个 VCSEL 光源构成的光源阵列如何调控其光分布,使其在目标面产生均匀的辐照度分布。图 9 所示为一个 3×3 的 VCSEL 阵列,每个 VCSEL 配置了一个自由曲面透

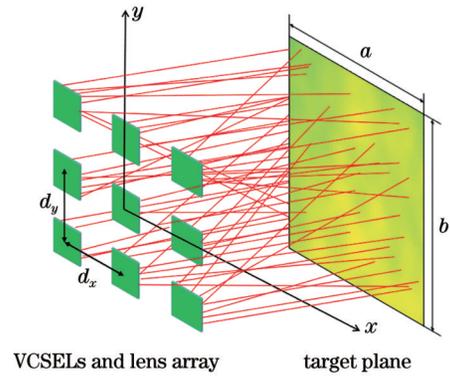


图 9 VCSEL 模组阵列示意图

Fig. 9 Schematic diagram of VCSEL module array system

镜,进行了一次配光。每个 VCSEL 和自由曲面透镜称为一个 VCSEL 模组,每个 VCSEL 模组在目标面上形成一定的辐照度分布,9 个 VCSEL 模组在目标面上的辐照度相互叠加,得到 VCSEL 阵列在目标面上最终的辐照度分布。为了进一步提升目标面的辐照度均匀性,可以再次通过优化 VCSEL 模组间距,使其在目标面上叠加产生均匀的辐照度分布,这是一个二次配光的过程。

每个 VCSEL 模组的辐照度图是一幅数字图像,表示为图像矩阵 I 。当 VCSEL 模组发生平移,其在目标面上产生的辐照图像也会发生相应的平移,VCSEL 模组平移与图像平移之间的关系可表示为

$$d'_x = d_x \frac{W}{M}, d'_y = d_y \frac{H}{N}, \quad (13)$$

式中: d'_x 和 d'_y 分别为沿 x 和 y 方向的 VCSEL 平移距离; d_x 和 d_y 分别为沿 x 和 y 方向的相应辐照图的平移距离(单位: pixel); W 和 H 分别为初始辐照度图的宽度和高度(单位: mm),初始辐照图中有 $M \times N$ 个像素。当图像平移后,将原图像 I 中任何像素点坐标 (u, v) 都映射到新图像中的坐标 (u', v') :

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

假设阵列中所有 VCSEL 模組的初始位置都位于 x - y 平面的原点, 每个 VCSEL 对应的辐照度分布图为 \mathbf{I} , 当每个 VCSEL 模組移动一定距离, 其对应的图像也平移了, 从而生成一个新图像, 表示为 $\mathbf{I}'(d_x, d_y)$ 。这些平移之后产生的新图像叠加之后形成的图像对应的就是 VCSEL 模組阵列产生的辐照度分布图像:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I}'(d_{x1}, d_{y1}) + \mathbf{I}'(d_{x2}, d_{y2}) + \cdots + \mathbf{I}'(d_{xn}, d_{yn})。 \quad (15)$$

通过优化 9 幅新图像位置, 使其叠加成一个均匀的辐照图, 通过每幅新图像的位置可以获得每个 VCSEL 的位置, 从而获得模組之间的距离。优化过程主要是使 VCSEL 阵列在目标平面上产生均匀辐照度分布并且有高的光效率。因此构建优化评价函数 f 要考虑两个重要性能指标, 即均匀度和效率:

$$U(d_{xi}, d_{yi}) = 1 - \frac{\sigma(\mathbf{I}')}{\mu(\mathbf{I}')} > 0.85, \quad (16)$$

$$\eta(d_{xi}, d_{yi}) = \frac{P_s}{P_t}, \quad (17)$$

$$f(d_{xi}, d_{yi}) = 1 - (0.5U + 0.5\eta), \quad (18)$$

式中: $U(d_{xi}, d_{yi})$ 为多个 VCSEL 模組叠加的目标面辐照度分布的均匀度; $\sigma(\mathbf{I}')$ 和 $\mu(\mathbf{I}')$ 分别为辐照度的标准差和均值; $\eta(d_{xi}, d_{yi})$ 为 VCSEL 阵列的光效率; P_s 为光源发射的能量; P_t 为目标面接收的能量; $f(d_{xi}, d_{yi})$ 为评价函数, 评价函数中包含了均匀度和效率两个因素, 在寻找评价函数[式(18)]的最小值时, 首先要满足式(16)中的关于均匀性的要求, 也就是在满足式(16)的解空间范围内寻找评价函数的最小值。通过优化独立变量 (d_{xi}, d_{yi}) , 获得函数 $f(d_{xi}, d_{yi})$ 的最小值。接下来将详细说明优化措施。

1) 通过蒙特卡罗光线追迹的方法生成每个单独 VCSEL 模組的辐照度分布图, 每个辐照度图的光能量高于相应 VCSEL 发射能量的 95%。在开始时, 所有

$n(n=9)$ 个辐照度图应完全重叠。每个辐照度图的中心位于原点。当 VCSEL 模組 $i(1 \leq i \leq 9)$ 移动到一定的位置, 每幅图像也移动到对应的位置, 变成一幅新的图像 $\mathbf{I}'(d_{xi}, d_{yi})$ 。因此, 通过式(15)可以获得叠加后的图像。

2) 在优化之前, 实施了几个约束条件, 限制了每个独立的辐照度图的平移范围:

$$-t_1 \leq d_x \leq t_1, \quad (19)$$

$$-t_2 \leq d_y \leq t_2。 \quad (20)$$

3) 定义了一个评价函数如式(18)所示。通过优化自变量 (d_{xi}, d_{yi}) , 获得函数的最小值, 这里使用蚁狮算法来寻找评价函数的最小值, 关于蚁狮算法的详细说明可以参考文献[19]。

4) 一旦评价函数达到最小值, 就意味着找到了最优的图像位置, 可以计算出每个 VCSEL 模組的最优位置。

3.2 设计实例与优化结果

因为要在目标面产生方形光斑, 阵列所需要的模組数量为 $N^2(N=3)$ 个, 模組数量影响目标面辐照度的强弱以及照射区域面积的大小, 这对均匀度影响不大。设计了一个 3×3 的 VCSEL 模組阵列, 如图 9 所示。每个 VCSEL 模組包括了 VCSEL 光源和一个自由曲面透镜, 目标区域大小为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。在阵列中, 所有的 VCSEL 模組都是相同的。使用第 2 节的方法针对尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的方形 VCSEL 光源设计另一款自由曲面透镜, VCSEL 光源经过自由曲面透镜的照度分布和轮廓图如图 10 所示, 辐照度分布均匀度仅为 53.5%。这个透镜调控的辐照度分布均匀性比较低, 但这更有利于阵列在目标面产生均匀的辐照度分布, 因为阵列在目标面的辐照度分布是多个模組的辐照度分布叠加的结果, 单个模組辐照度分布边缘逐渐减弱, 有利于叠加。

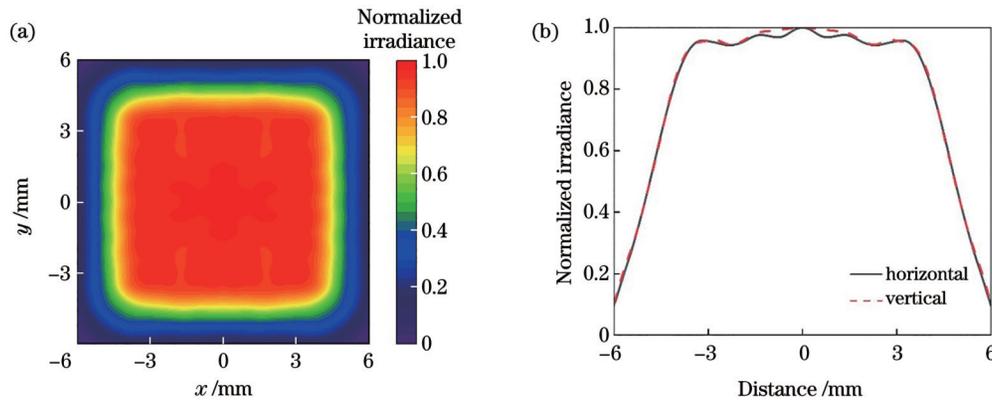


图 10 特定自由曲面透镜在目标面的照度分布图和轮廓曲线。(a)辐照度分布图;(b)轮廓曲线

Fig. 10 Irradiance distribution and profile curves on target plane generated by specific freeform lens. (a) Irradiance distribution; (b) profile

使用第 3.1 节描述的阵列优化设计的方法, 寻找最优的 VCSEL 模組之间的距离, 因为目标面是方形

目标面, 优化过程中控制相邻 VCSEL 模組之间的距离都是相等的, 因此只用这一个间距就可以表示出各

VCSEL 模组的位置。优化过程实际是在优化图像之间的最佳距离,使用蚁狮算法进行优化,优化过程中的收敛曲线如图 11 所示,可以看出收敛速度相当快。当评价函数达到最小值时,可以获得相邻图像之间的最佳距离,从而计算出相邻 VCSEL 模组之间的最佳距离为 10 mm。

通过计算获得最优模组间距,将 9 个自由曲面透

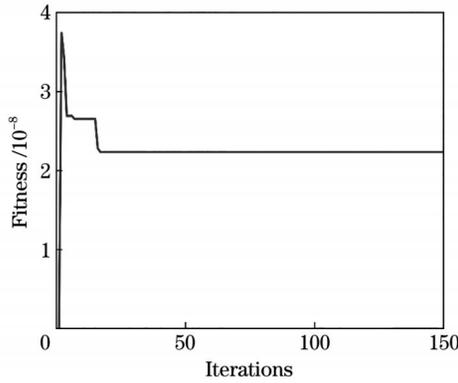
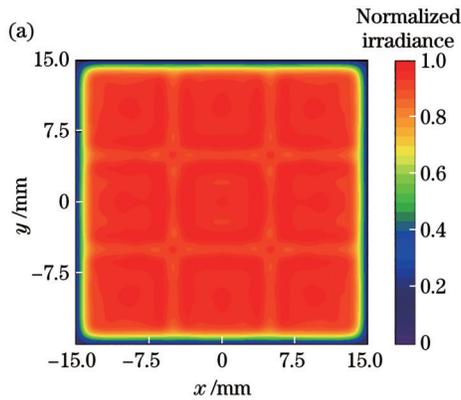


图 11 评价函数随迭代次数的变化曲线

Fig. 11 Variation of the evaluation function value with the number of iterations



镜通过一个固定基板连接在一起,目的是用 9 个自由曲面透镜构成一个透镜阵列,如图 12 所示,这便于之后的装调,该平板使用的材料与自由曲面透镜的材料一样,也是 PMMA,在将来的加工制造中,这 9 个自由曲面透镜与基板可以一起注塑成型。这个基板并不起调控光分布的作用,只是一个连接件,基板的厚度要小于自由曲面透镜的边缘厚度,这样不会影响自由曲面的面形。该 VCSEL 模组阵列产生的辐照度分布图及轮廓如图 13 所示,辐照度均匀度达到了 85.2%。VCSEL 阵列的光效率达到了 91.8%。

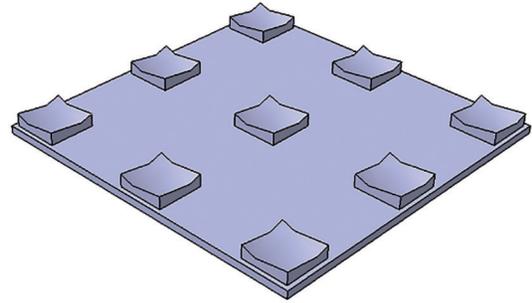


图 12 自由曲面透镜阵列

Fig. 12 Freeform lens array

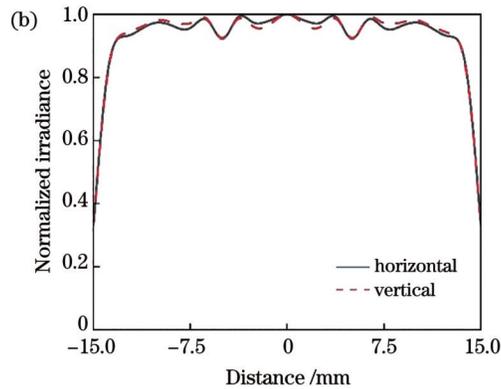


图 13 VCSEL 模组阵列在目标面的辐照度分布和轮廓曲线。(a)辐照度分布图;(b)轮廓曲线

Fig. 13 Irradiance distribution and profile curves on target surface generated by VCSEL module array. (a) Irradiance distribution; (b) profile

4 结 论

将整形透镜自由曲面高度与各采样点的法向矢量之间的关系转化成了泊松方程,通过引进离散余弦变换的方法求解泊松方程,获得了自由曲面的矢高。使用该方法设计的自由曲面透镜,可以使 VCSEL 在目标面产生均匀的辐照度分布,均匀度达到了 93.9%。将 VCSEL 阵列优化问题转化为多个图像叠加强度均匀化的问题。分析表明,为了 VCSEL 阵列能够产生均匀的辐照分布,单个 VCSEL 模组产生的辐照度分布边缘区域不均匀。使用 9 个 VCSEL 模组,排成 3×3 的 VCSEL 模组阵列,通过优化间距,在目标面产生了均匀的辐照度分布,均匀度可以达到 85.2%,光效率达到了 91.8%。在将来的研究过程中,将分析自由曲面

在加工过程和装配过程中的误差对目标面辐照均匀度的影响。

参 考 文 献

- [1] Liu A J, Wolf P, Lott J A, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 121-136.
- [2] 李溶涛, 孟俊清, 陈晓, 等. VCSEL 端面泵浦的全固体激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1801002.
Li R T, Meng J Q, Chen X, et al. VCSEL end-pumped all-solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1801002.
- [3] Ledentsov N N, Makarov O Y, Shchukin V A, et al. High speed VCSEL technology and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1749-1763.
- [4] 尹维, 李明雨, 胡岩, 等. 基于 VCSEL 投影阵列的散斑结构光三维成像技术及其传感器设计[J]. *激光与光电子学进展*,

- 2023, 60(8): 0811014.
- Yin W, Li M Y, Hu Y, et al. Speckle structured-light-based three-dimensional imaging technology and its sensor design using VCSEL projection array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811014.
- [5] Bykov D A, Daskolovich L L, Byzov E V, et al. Supporting quadric method for designing refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions and wavefronts[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26304-26318.
- [6] Jin Y H, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [7] 于晨昊. 基于 DOE 的 2 μm 波段高斯光束平顶化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- Yu C H. Research on flattening of gaussian beam in 2 μm band based on diffractive optical element[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [8] Li S S, Ding L, Du P Y, et al. Using the spatial light modulator as a binary optical element: application to spatial beam shaping for high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24): 7060-7064.
- [9] Wu R M, Liu P, Zhang Y Q, et al. A mathematical model of the single freeform surface design for collimated beam shaping [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20974-20989.
- [10] Zhang Y Q, Wu R M, Liu P, et al. Double freeform surfaces design for laser beam shaping with Monge-Ampère equation method[J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 297-305.
- [11] Olikev V. Controlling light with freeform multifocal lens designed with supporting quadric method (SQM) [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A58-A72.
- [12] Mingazov A A, Bykov D A, Bezus E A, et al. On the use of the supporting quadric method in the problem of designing double freeform surfaces for collimated beam shaping[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22642-22657.
- [13] Bösel C, Worku N G, Gross H. Ray-mapping approach in double freeform surface design for collimated beam shaping beyond the paraxial approximation[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3679-3688.
- [14] Feng Z X, Cheng D W, Wang Y T. Iterative freeform lens design for optical field control[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(9): 1775-1783.
- [15] Yue Y H, Iwasaki K, Chen B Y, et al. Poisson-based continuous surface generation for goal-based caustics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(3): 31.
- [16] Quéau Y, Durou J D, Aujol J F. Normal integration: a survey [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2018, 60(4): 576-593.
- [17] Su Z P, Xue D L, Ji Z C. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): A843-A855.
- [18] 臧泽茂, 苏宙平, 张文裕, 等. 高平滑度自由曲面激光束整形透镜设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822023.
- Zang Z M, Su Z P, Zhang W Y, et al. Design of high-smoothness freeform lens for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822023.
- [19] Mirjalili S. The ant lion optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2015, 83: 80-98.

Freeform Lens Array Design for Precise Control of Irradiance Distribution in VCSEL Array

Xue Yuyang^{1,2}, Su Zhouping^{1,2*}

¹*School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;*

²*Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Opto-Electronic Engineering and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China*

Abstract

Objective The vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is a typical semiconductor laser widely employed in high-speed optical communication, optical sensors, pumped solid-state lasers or fiber lasers, LiDAR, and structured light applications. The irradiance distributions of the VCSELs typically conform to a Gaussian distribution. In various application scenarios such as laser processing and laser illumination, it is necessary to achieve a uniform irradiance distribution on the target plane. Among various methods for laser shaping, freeform optical components have gained increasing popularity due to their high optical efficiency and flexibility in controlling light distribution. However, there is a paucity of literature regarding the utilization of freeform optical elements for shaping VCSEL lasers, particularly in terms of designing freeform surfaces to manipulate irradiance distribution for VCSEL array modules. In this paper, we present the design of both a freeform lens and a freeform lens array specifically and tailor the light distributions for single VCSEL sources and VCSEL arrays respectively to achieve a uniform irradiance distribution on the target plane.

Methods The design of a freeform shaping lens for VCSELs aims to achieve a uniform irradiance distribution on the target surface for the output beam. The front surface of the lens is aspherical, while the back surface is freeform. The rays emitted by the VCSEL are collimated through the aspherical surface, and the collimated beam is then incident on the freeform surface, through which the irradiance distribution is regulated to produce a uniform irradiance distribution on the target plane. During the design process, a virtual surface is incorporated within the middle region of the freeform lens to

establish a relationship between its energy distribution and that of the target plane. This enables the determination of direction vectors of incident and outgoing rays, as well as obtaining normal vectors for each point on the sample points of the free-form surface. By formulating a Poisson equation relating sag of freeform surface and normal vector, we employ the discrete cosine transform method to solve it and obtain vector heights for achieving the desired performance. Due to the size of the VCSEL source, the rays emitted by the VCSEL still have a small divergence angle after passing through the aspherical collimation. The effect of the divergence angle on the uniformity of the irradiation distribution on the target surface is investigated. It is shown that the uniformity is reduced to 85% when the residual divergence angle reaches 3° . A VCSEL array consists of several individual VCSEL modules equipped with a freeform lens. An evaluation function is constructed that guarantees simultaneous control of the uniformity and efficiency of the irradiance distribution of the VCSEL module array. The optimal spacing between these modules is obtained using the evaluation function by employing the Antlion optimization algorithm. The optimal VCSEL array enables the generation of a uniform irradiance distribution on the target plane with high optical efficiency.

Results and Discussions A freeform lens is specifically designed for a single VCSEL light source, featuring an aspherical front surface and a freeform back surface. The emitted beam from the VCSEL light source, with a waist of 0.1 mm and a divergence angle of 8° , is efficiently transformed into a square uniform spot of $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ on the target plane, achieving an impressive irradiation uniformity of 93.9%. The second freeform lens is specifically designed for a VCSEL source with an emitting area of $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$; however, it only achieves an irradiation uniformity of 53.5% on the target plane. Each VCSEL combined with the second freeform lens forms what we refer to as a VCSEL module. The optimal 3×3 array of modules is generated by employing the antlion optimization algorithm to determine the optimal spacing between VCSEL modules. With the implementation of an optimized VCSEL module array, we have successfully achieved a remarkable enhancement in irradiation uniformity, reaching up to 85.2% on the larger target plane of $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. Moreover, our study has demonstrated an impressive overall light efficiency level of 91.8% for the VCSEL array.

Conclusions The relationship between the sags of the freeform surface and the normal vector of each sampling point is transformed into a Poisson equation in this paper, and the sags of the freeform surface are obtained using the discrete cosine transform (DCT) method. By employing this approach, a freeform lens can be designed to achieve uniform irradiance distribution on the target plane with a high level of uniformity reaching 93.9%. Furthermore, we address an optimization problem for VCSEL arrays by transforming it into an intensity homogenization problem through multiple image superposition. The analysis reveals that to achieve uniform irradiance distribution from VCSEL arrays, it is necessary to generate non-uniform irradiance distribution on edge regions by individual VCSEL modules. Based on nine VCSEL modules with the optimal spacing, we can achieve uniform irradiance distribution on the target plane with a uniformity of 85.2% and an optical efficiency of 91.8%. The forthcoming research will explore the impact of fabrication and assembly tolerances of the freeform lenses on irradiation uniformity.

Key words optical design; vertical-cavity surface-emitting laser; freeform; Poisson equation; discrete cosine transform