

## 底发射 VCSEL 片上点阵结构光投影装置设计

阮仁杰<sup>1,2,3</sup>, 曹银花<sup>1,2,3</sup>, 王晓帆<sup>1,2,3</sup>, 马艳红<sup>1,2,3</sup>, 王智勇<sup>1,2,3</sup>, 兰 天<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. 北京工业大学北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;
2. 北京工业大学跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124;
3. 北京工业大学材料与制造学部先进半导体光电技术研究所, 北京 100124)

**摘要:** 为解决现有点阵结构光投影装置中准直透镜会导致较强的零级衍射而造成投影点阵光强分布不均匀的问题, 提出了一种基于底发射垂直腔面发射激光器的片上点阵光投影装置结构, 并给出了衍射光学元件设计思路。首先对目标光场进行光强调整和坐标变换, 在无准直透镜情况下利用基于瑞利-索末菲衍射积分的 Gerchberg-Saxton 改进算法获得片上衍射光学元件的相位分布, 并最终对该点阵投影装置的投影效果进行评估。结果表明: 在衍射光学元件设计过程中采用高斯光束作为光源时, 该结构能更好地抑制零级衍射, 获得光强分布更加均匀的投影点阵。此外, 该结构不仅可省去透镜的安装, 减小投影装置尺寸, 还可通过流片工艺实现光源和衍射光学元件一体化集成。

**关键词:** 衍射光学; 片上结构光; 瑞利-索末菲衍射积分; 衍射光学元件; Gerchberg-Saxton 算法; 底发射 VCSEL

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210640

## Design of on-chip dot array structured light projector using bottom-emitting VCSEL

Ruan Renjie<sup>1,2,3</sup>, Cao Yinhua<sup>1,2,3</sup>, Wang Xiaofan<sup>1,2,3</sup>, Ma Yanhong<sup>1,2,3</sup>, Wang Zhiyong<sup>1,2,3</sup>, Lan Tian<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Trans-scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Institute of Advanced Technology on Semiconductor Optics & Electronics, Department of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To solve the problem that the collimating lens in the existing dot array structured light projector will result in dramatical zero-order diffraction and uneven intensity distribution of the projected dot, an on-chip dot array structured light projector based on bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting laser was proposed as well as the design of the corresponding diffractive optical element. In the design, the target intensity distribution was firstly modified with intensity adjustment and coordinate transformation. Then, the improved Gerchberg-Saxton algorithm based on the Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral was applied to obtain the phase distribution of the on-chip diffractive optical element of the projector without collimating lens. Eventually,

收稿日期: 2021-09-03; 修订日期: 2022-01-14

基金项目: 北京市博士后工作经费 (2020-Z2-043)

作者简介: 阮仁杰, 男, 硕士生, 主要从事大功率半导体及底发射 VCSEL 方面的研究。

导师简介: 曹银花, 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事大功率半导体激光技术及工程化技术方面的研究。

通讯作者: 兰天, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事 III-V 族化合物半导体材料生长以及高亮度边发射/面发射半导体激光器设计与制备方面的研究。

evaluations of the projected dot was conducted. Simulation results show that the projector can suppress the zero-order diffraction better and obtain more uniformly-distributed intensity when the gaussian beam is used as the light source. In addition, the structure can omit the installation of the collimating lens, thus, reducing the size of the projector and realizing the integration of the light source and the diffractive optical element through chip manufacturing process.

**Key words:** diffractive optics; on-chip structured light; Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral; diffractive optical element; Gerchberg-Saxton algorithm; bottom-emitting VCSEL

## 0 引言

典型的点阵结构光 3D 传感装置首先由红外激光点阵投射装置投射出近红外波段的点阵光斑, 点阵图案受到物体表面形状的影响而产生形变, 发生形变后的图案被红外图像传感器接收, 最终基于图案的形变程度以及传感器与光源的位置关系计算出目标物的深度信息, 该技术目前已经广泛应用于人脸识别<sup>[1]</sup>、体感游戏<sup>[2]</sup>、人机交互<sup>[3]</sup>、机器视觉<sup>[4]</sup>等领域。红外激光投射装置通常由激光源 (laser source)、晶圆级镜头 (wafer level optics, WLO) 和衍射光学元件 (diffractive optical element, DOE) 三部分组成<sup>[5]</sup>。投射装置的工作原理是晶圆级镜头利用光的折射原理, 将波瓣较宽的衍射图案校准汇聚为窄波瓣的近似平行光, 光再经过衍射光学元件的衍射分束为若干束光线, 从而在一定衍射距离处得到散点状的结构光<sup>[6]</sup>。

现有结构在计算 DOE 相位时将入射光简化为平面波, 然而高斯光束经透镜准直后依旧为高斯光束, 这样会导致投影点阵均匀性下降, 光强分布不均匀, 中心零级衍射较强。现有的点阵投影装置中, WLO 和 DOE 通常是单独生产制造, 因此使用中需要将这两部分与激光源同轴安装调试。而 WLO 需要根据入射光的发散角和透镜焦距来确定其安装位置, 以确保经过透镜的高斯光束准直为近似的平行光。此外, 由于透镜本身会对入射光发生反射和吸收, 从而降低对入射光利用率。

目前已有研究人员在底发射 VCSEL 衬底上刻蚀 DOE 和微透镜来获得均匀的平顶光<sup>[7]</sup>和减小光束发散角<sup>[8]</sup>, 并没有用来获取点阵结构光。为此, 笔者提出了一种片上点阵结构光投影装置, 考虑实际底发射垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 衬底厚度, 利用基于瑞利-索末菲衍射积分的 Gerchberg-Saxton 加权改进算法<sup>[9]</sup>得到 DOE

的相位分布, 最终获得可直接制备在衬底背面的 DOE 元件设计方案。相比于现有的点阵投影装置, 文中设计的新型结构在保证点阵投影效果和抑制零级衍射的同时省去了 WLO, 大幅度降低了系统复杂度, 并提高入射光利用率, 为实现片上点阵结构光投影结构提供了一个新思路。

## 1 基本设计原理

图 1 为目前通用的点阵结构光投影装置结构示意图 (标记为结构 1)。图中, VCSEL 阵列作为激光源, 激光光束经过准直透镜准直后入射到 DOE, 再通过 DOE 整形后最终在接收屏上形成特定的光强分布。图 2 为文中提出的一种片上点阵结构光投影装置示意图 (标记为结构 2), 采用底发射 VCSEL 作为光源, 其省去了图 1 中的准直透镜, 并将 DOE 直接集成在 VCSEL 衬底背面, 底发射 VCSEL 发出的高斯光束经过衬底背面的 DOE 的光束整形后在衍射接收屏上形成点阵光。在衬底上设计 DOE 的关键就是考虑实际衬底厚度的限制, 同时利用入射光的复振幅分布和出射光的强度分布求解得到 DOE 的相位分布。

计算结构 2 中衬底上 DOE 的相位分布。设底发射 VCSEL 从氧化孔径处发出的是拉盖尔-高斯光束, 则其复振幅分布函数可表达为:

$$U_{mn}(r, \phi, z) = C_{mn} \frac{w_0}{w(z)} \left[ \frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right]^m L_n^m \left[ \frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[ -\frac{r^2}{w^2(z)} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{array} \right\} \times \exp \left\{ -i[kz - (m+n+1)] \cdot \arctan \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right\} \times \exp \left[ -i \frac{kr^2}{2R(z)} \right] \quad (1)$$

式中:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  表示氧化孔径到 DOE 上采样点的距离;  $\phi$  表示幅角;  $z$  表示氧化孔径到 DOE 的距离 ( $0 < z < 1 \text{ mm}$ );  $w_0$  表示束腰半径 (VCSEL 激光器的光束束腰近似在氧化孔径处,  $0 < w_0 < 10 \mu\text{m}$ );  $w(z)$  表示

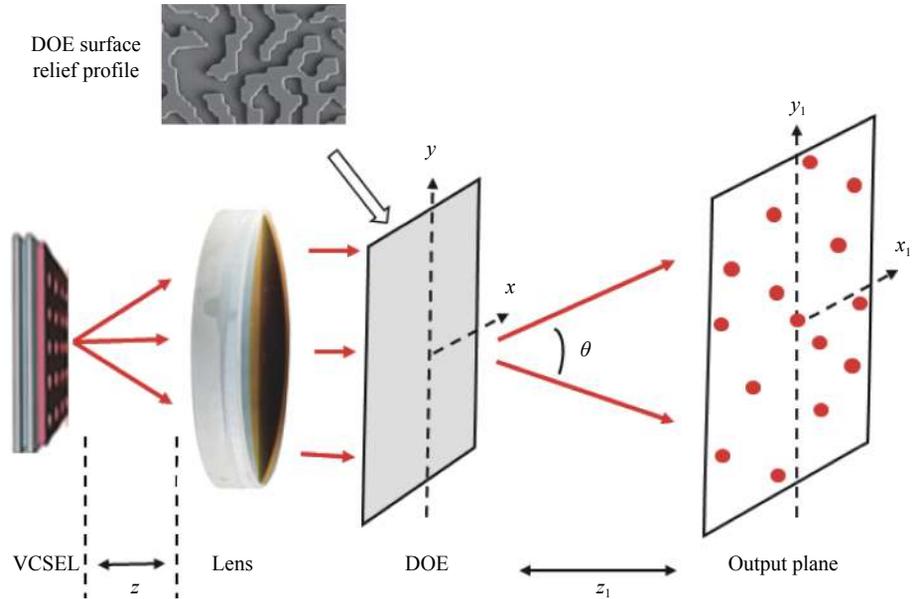


图 1 现有的点阵结构光投影装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of existing dot array structured light projector

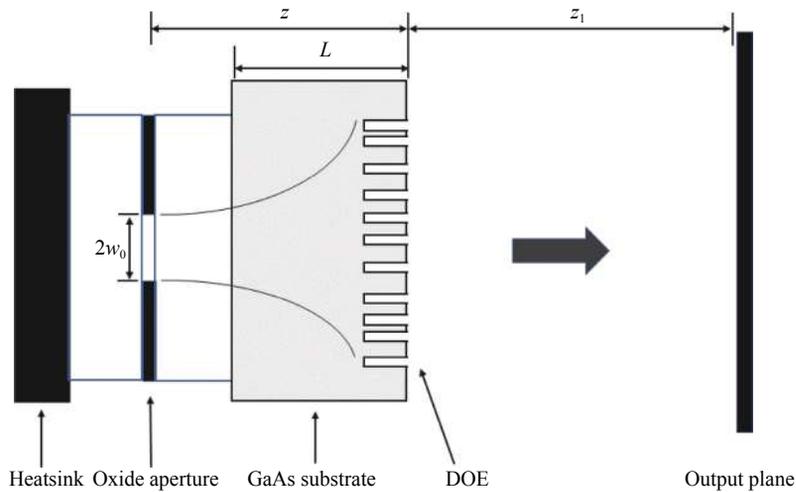


图 2 片上点阵结构光投影装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of on-chip dot array structured light projector

距离束腰为  $z$  处的光斑半径;  $R(z)$  为光束传播到  $z$  处时的等相位面曲率半径;  $\lambda$  表示波长;  $C_{mn}$  表示归一化常数;  $L_n^m$  表示缔合拉盖尔多项式。  $m$  和  $n$  与高阶模的级次有关, 光斑在径向  $r$  有  $n$  条节线, 在幅角  $\phi$  方向有  $m$  条节线。  $\cos m\phi$  和  $\sin m\phi$  的区别在于光斑的极值和零点的方向互易。

设 DOE 的相位分布为  $\varphi(x, y)$ , 则其透过率函数为:

$$t(x, y) = \exp(i\varphi(x, y)) \quad (2)$$

当 DOE 上的入射光的复振幅分布为  $U_{mn}(r, \varphi, z)$  时, 从 DOE 出射的复振幅分布为:

$$u_t(x, y) = U_{mn}(r, \varphi, z) \times t(x, y) \quad (3)$$

因此, 根据瑞利-索末菲衍射积分可知<sup>[10]</sup>, 距离 DOE 面  $z_1$  处的衍射屏上光场分布为:

$$u(x_1, y_1) = \iint u_t(x, y) h(x_1, y_1, x, y) dx dy \quad (4)$$

其中, 脉冲响应函数:

$$h(x_1, y_1, x, y) = \frac{z_1 \exp(ikR_1)(1 - ikR_1)}{2\pi R_1^3} \quad (5)$$

式中:  $k = 2\pi/\lambda$  为自由空间的波数,  $z_1$  为从 DOE 到衍射屏的衍射距离;  $R_1$  为 DOE 面上采样点到衍射屏上采样点之间的距离, 可表示为:

$$R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + z_1^2} \quad (6)$$

通常情况下,公式(4)不存在解析解,通过求和方式非常耗时,可以对瑞利-索末菲衍射积分做远场近似,将其简化成快速傅里叶变换形式,大大减少了计算量。首先,在远场条件下将 $R_1$ 近似为 $r_1$ ,即:

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \quad (7)$$

公式(4)可以改写为:

$$u(x_1, y_1) = \frac{1}{i\lambda z_1} \exp(ikr_1) \frac{z_1^2}{r_1^2} \iint u_t(x, y) \times \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z_1} \left(x \frac{x_1 z_1}{r_1} + y \frac{y_1 z_1}{r_1}\right)\right] dx dy \quad (8)$$

调整光强和坐标变换<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{z_1}{r_1} x_1, y_2 = \frac{z_1}{r_1} y_1 \\ u(x_2, y_2) = u(x_1, y_1) \frac{r_1^2}{z_1^2} \end{cases} \quad (9)$$

公式(8)可改为:

$$u(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda z_1} \exp(ikr_1) \iint u_t(x, y) \times \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z_1} (xx_2 + yy_2)\right] dx dy = \frac{1}{i\lambda z_1} \exp(ikr_1) \mathbb{F}\{u_t(x, y)\} \quad (10)$$

式中: $\mathbb{F}\{\}$ 代表二维傅里叶变换。由此便得到了激光光束在经过衬底上 DOE 后在 $z_1$ 处的复振幅分布。

随后,将 G-S 算法结合上述求解远场复振幅分布的方法即可求出衬底上 DOE 的相位分布。G-S 算法的本质就是利用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 和快速傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 在输入面和输出面之间往复迭代,最终获得输入面的相位分布。

计算 DOE 相位分布的具体步骤为:

(1) 确定目标光场和采样倍数。将编码图 (图 3(a)) 作为目标光场并进行坐标变换和光强调整,对每个编码元素进行采样,水平和垂直方向上的采样间隔为 $\Delta x_1$ 和 $\Delta y_1$ ,衍射面的采样倍数与入射面 (DOE 面) 的采样倍数相同,采样倍数越小则编码图 (目标光场) 在衍射面上的还原度越差,采样倍数越大还原误差越小,但相位的计算量越大。此外,为了降低场内噪声和增加设计中的振幅自由度,需要对信号窗口外进行补 0 操作,同理,补 0 区域过大和过小也会对相位计算造成影响;

(2) 确定 DOE 设计参数。由入射波长、衍射距离和采样倍数确定入射面的采样间隔 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ ;

(3) 确定 DOE 面的初始相位值 $\varphi(x, y)$  (取值为 $0 \sim 2\pi$ 的随机值),设置最大迭代次数 $K$ 或迭代终止条件;

(4) 通过公式(1)~(10)计算输出面 (衍射屏) 的复振幅分布 $u(x_2, y_2)$ ;

(5) 保留 $u(x_2, y_2)$ 的相位 $\varphi(x_2, y_2)$ ,利用 G-S 加权改进算法<sup>[12]</sup>将输出面的振幅替换为目标振幅 $\beta Ag(x_2, y_2) + (1 - \beta)|u(x_2, y_2)|$ , $0 \leq \beta \leq 2$ ,得到输出面复振幅分布 $u'(x_2, y_2)$ 。对 $u'(x_2, y_2)$ 做二维傅里叶逆变换,得到 DOE 面的复振幅分布 $u_t'(x_2, y_2)$ ;

(6) 通过计算 $u_t'(x_2, y_2)$ 的相位角,得到 DOE 的相位 $\varphi'(x, y)$ 。由于 DOE 的设计和制造较为复杂,为了方便后续制造采用二进制 DOE,将 $\varphi'(x, y)$ 量化为 0 和 $\pi$ <sup>[13]</sup>,即 $\varphi''(x, y) = \begin{cases} 0, & -\frac{\pi}{2} < \varphi'(x, y) < \frac{\pi}{2} \\ \pi, & \text{other} \end{cases}$ ,将新的相位 $\varphi''(x, y)$ 作为 DOE 的初始相位;

(7) 重复步骤(4)~(6),直至达到最大迭代次数 $K$ 或满足迭代截止条件,最终获得目标 DOE 的相位分布。

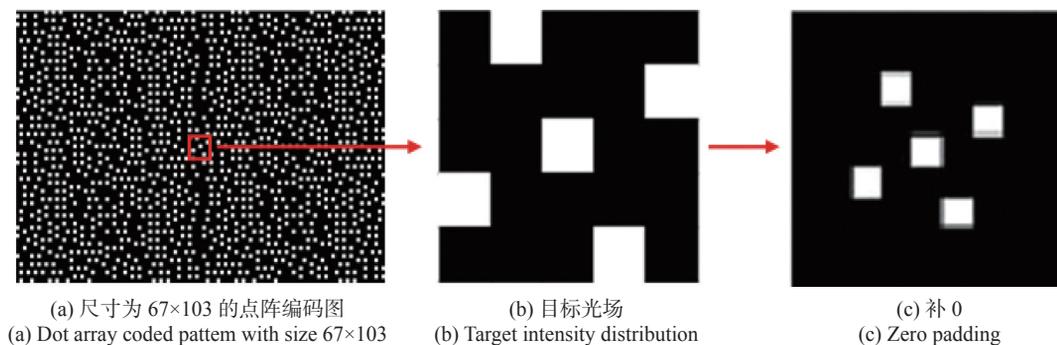


图 3 点阵编码

Fig.3 Dot array coded pattern

## 2 模 拟

采用图 2 所示的新型结构来模拟点阵结构光投影, 新型结构的参数设置如表 1 所示。输出光为基模拉盖尔-高斯光束,  $w_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $z = 505 \mu\text{m}$ ,  $L = 500 \mu\text{m}$ , DOE 的采样间隔为:

$$\Delta x = \frac{\lambda z_1}{M \Delta x_1} = \frac{\lambda z_1}{L_x} \quad (11)$$

$$\Delta y = \frac{\lambda z_1}{N \Delta y_1} = \frac{\lambda z_1}{L_y} \quad (12)$$

式中:  $z_1$  为经过 DOE 后的衍射距离。DOE 的刻蚀深度为<sup>[14]</sup>:

$$h = \frac{\lambda \varphi'(x_2, y_2)}{2\pi(n-1)} \quad (13)$$

文中采用的点阵编码如图 3(a) 所示。由于大尺寸目标光场的编码点数太多, 计算量非常大, 只选取了点阵编码中心位置的  $5 \times 5$  个编码点(图 3(b)) 进行验证。为了增加设计自由度和抑制场内噪声, 对  $5 \times 5$  的

编码区域外补 0 处理, 补 0 后的目标光场边长是原来的 1.8 倍, 形成新的  $9 \times 9$  编码图案(图 3(c))。设每个编码点的采样倍数为  $3 \times 3$ , 即整个编码区域的采样点数为  $(9 \times 3)^2$ , 图 4(a) 为计算得出的 DOE 相位分布图, 白色部分表示相位为  $\pi$ , 黑色部分表示相位为 0, 图 4(b) 为衍射面处的输出光光强分布。同样, 将编码

表 1 结构 2 中的相关物理参数

Tab.1 Structural parameters used in structure-2

Parameter	Value
Wavelength, $\lambda/\text{nm}$	980
Length of target light field, $L_x/\text{m}$	0.01
Width of target light field, $L_y/\text{m}$	0.01
Waist radius of VCSEL, $w_0/\mu\text{m}$	2
Distance from oxide aperture to DOE, $z/\mu\text{m}$	505
Thickness of substrate, $L/\mu\text{m}$	500
Refractive index of GaAs, $n$	3.52
Horizontal sampling ratio, $M$	-
Longitudinal sampling ratio, $N$	-

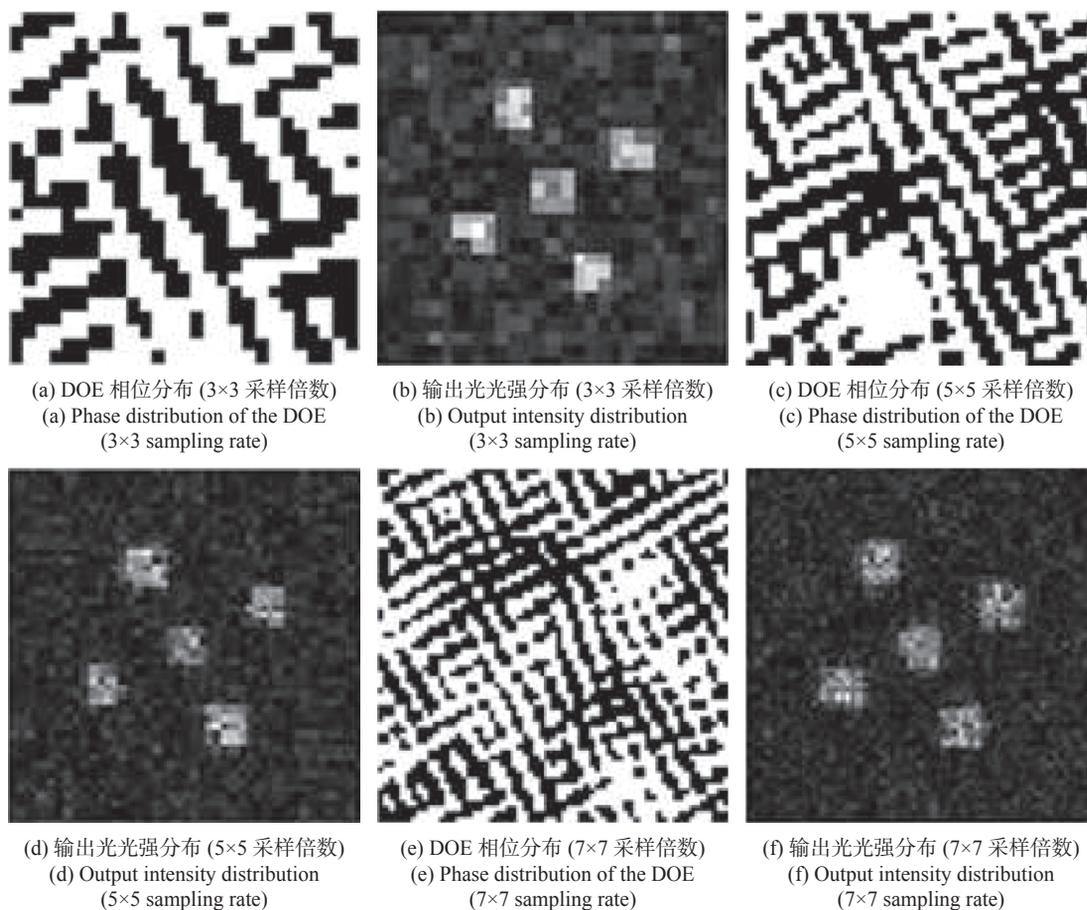


图 4 不同采样倍数下的仿真结果

Fig.4 Simulation results under different sampling ratio

点的采样倍数改变为 5×5 和 7×7 后,再分别计算得到 DOE 相位分布和输出光光强分布,如图 4(c)~(f) 所示。若将编码点的采样倍数增加,从图 4 中可以看到相位分布会更加细化和复杂,相应的相位计算量也更大。

通过仿真计算可知,当采样倍数为 7×7 时,最终的输出光光强与目标光强最为吻合,虽然存在一定的误差和畸变,但不影响特征点匹配,而采样倍数为 3×3 时,输出光畸变较大,影响特征点匹配。理论上,在一定范围内采样倍数越大,还原编码图时的误差畸变越小,也就是实际出光的光强分布和目标光强分布差别越小。

为了比较结构 1 和结构 2 对最终输出光光强分

布的差异,对结构 1 也进行了相同计算,衍射全角、DOE 的采样间隔、衍射距离、补 0 区域等都保持不变。采样倍数分别设置为 3×3、5×5 和 7×7,对补 0 后的 9×9 编码点进行计算,结果如图 5 所示。比较图 4 和图 5 的出射光光强分布可知,结构 1 得到的输出光光强分布不均匀,这是由于在计算 DOE 相位时为了简化计算复杂度,将经过准直后的高斯光束近似为平面波,而实际情况下高斯光在经过准直镜准直后依旧为高斯光,那么计算得到的 DOE 相位分布并不精确,因此结构 1 在实际出光时会有较强的零级衍射。此外,在实际应用中,高斯光束经过准直透镜时会发生反射和吸收,损失一部分入射光,降低入射光利用率。

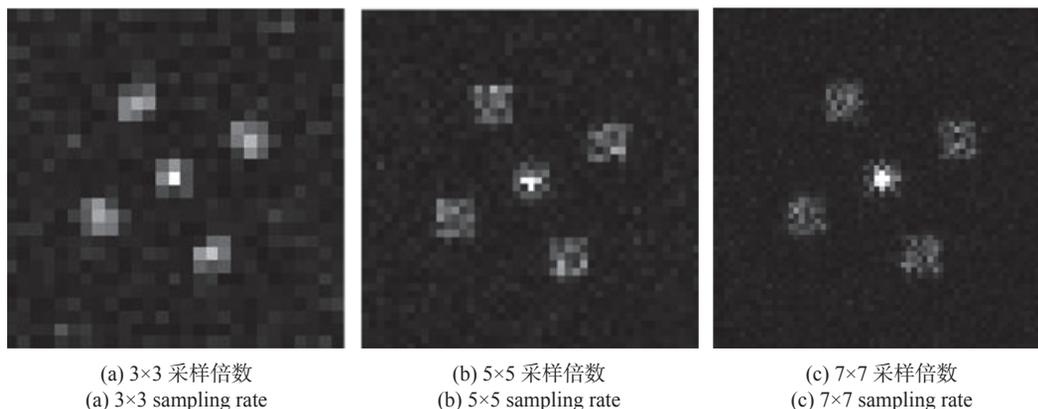


图 5 结构 1 的输出光光强分布

Fig.5 Output light intensity distribution of structure-1

### 3 分析与讨论

为了对输出光质量进行定量评价,引入三个评价函数,分别为均方误差 (mean squared error, MSE)<sup>[15]</sup>、峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)<sup>[16]</sup> 和光能利用率 (light utility efficiency,  $\eta$ )<sup>[17]</sup>, 分别探讨采样倍数  $M \times N$ 、束腰半径  $w_0$ 、衬底厚度  $L$  对输出光质量的影响。其中, MSE 代表输出面光斑的调制度,是表示光斑均匀度的一个指标,其值越小,代表输出光与目标光强的差距越小; PSNR 是衡量原图像与输出图像差距的指标,其值越大表示图像恢复效果越好;  $\eta$  代表投影点的光能与整个信号窗口的光能的比值,  $\eta$  越大代表噪声抑制地越好,投影点越清晰。三个评价函数分别表示如下:

$$MSE = \frac{\sum_m \sum_n (f(m,n) - f_D(m,n))^2}{\sum_m \sum_n (f(m,n))^2} \quad (14)$$

式中:  $f(m,n)$  代表目标光场的振幅分布;  $f_D(m,n)$  代表输出光振幅分布;  $m$  和  $n$  代表水平和竖直方向上的采样点数。

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{255^2 (m \times n)}{\sum_m \sum_n (I(m,n) - I_D(m,n))^2} \right) \quad (15)$$

式中:  $I(m,n)$  代表目标光场的光强分布;  $I_D(m,n)$  代表输出光光强分布;  $m$  和  $n$  代表水平和竖直方向上的采样点数。

$$\eta = \frac{\sum_{(k,l) \in w_1} I_{(k,l)}}{\sum_{(k,l) \in w_2} I_{(k,l)}} \quad (16)$$

式中:  $I_{(k,l)}$  代表采样点的光场强度;  $w_1$  代表投影点区域;  $w_2$  代表补 0 后的整个信号窗口区域;  $k$  和  $l$  代表水平和竖直方向上的采样点数。

结构 2 中设置  $w_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $L = 500 \mu\text{m}$ , 衍射全角、采样倍数、衍射距离、补 0 区域等与结构 1 相同, 为了计算方便, 设水平和垂直方向上的采样倍数相同, 即  $M = N$ , 讨论采样倍数大小对输出光的影响, 计算结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 结构 1 的最大光能利用率和结构 2 接近, 而投影点均匀度明显不如结构 2。结构 2 的采样倍数在 3~11 范围内时, 随着采样倍数的增大, 光能利用率  $\eta$  越来越大, MSE 值越小, PSNR 值越大, 由此确定采样倍数  $11 \times 11$  是最佳采样倍数, 此时  $\eta$  约为 76%。然而当采样倍数大于  $11 \times 11$  时,  $\eta$  反而会降低, MSE 值增加, PSNR 值减小, 这是由于采样点数过多后, 补 0 区域已不能对场内噪声进行有效抑制。

随后, 设  $M = N = 11$ ,  $L = 500 \mu\text{m}$ , 讨论  $w_0$  大小对结构 2 的输出光的影响。

从图 7 中可以看出, 随着氧化孔径增大,  $\eta$  和 PSNR 值逐渐增大, MSE 值逐渐减小, 表明对场内噪声

抑制效果越来越好, 光斑的均匀性越好, 图像越来越清晰。这是由于随着氧化孔径的增大, 高斯光束的瑞利距离也在增加。但随着氧化孔径的增大, VCSEL 发出的光束会包含更多的高阶模式高斯光, 不利于结构光的设计和应用。

设  $M = N = 11$ ,  $w_0 = 5 \mu\text{m}$ , 讨论  $L$  大小对结构 2 的输出光的影响。

从图 8 中可以看出, 在衬底厚度小于  $400 \mu\text{m}$  时, 光斑均匀性、信噪比、光能利用率都随着衬底厚度的增加而减小。当衬底厚度大于  $400 \mu\text{m}$  后, 光斑均匀性、信噪比、光能利用率都随着衬底厚度的增加而增加, 并且在厚度大于  $600 \mu\text{m}$  时各项指标都优于  $100 \mu\text{m}$ 。但是在实际制造过程中, 衬底过厚可能会吸收更多的激光, 从而降低电光转换效率。

综上, 在底发射 VCSEL 衬底上设计 DOE 时, 采样倍数、氧化孔径大小、衬底厚度会共同影响输出光的质量, 必须综合这三个变量一起考虑才能获得最佳

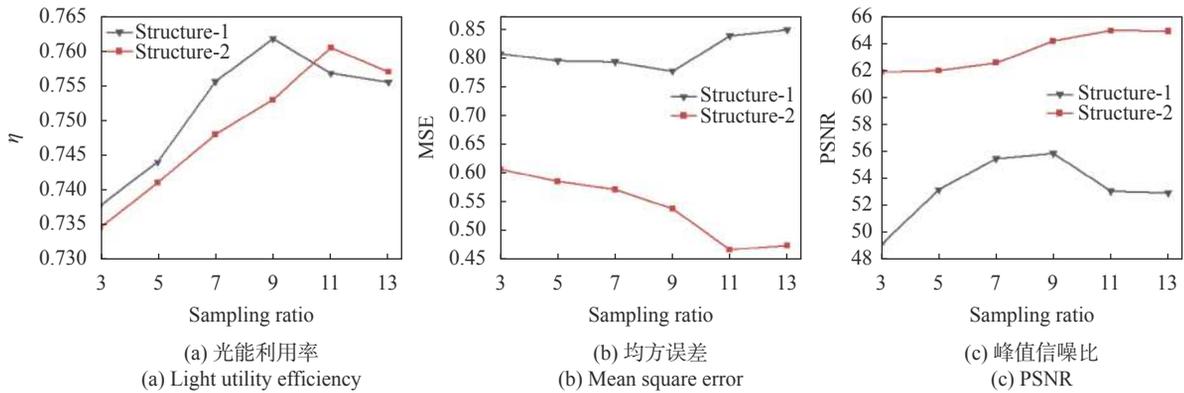


图 6 不同采样倍数下的评价指标对比图

Fig.6 Comparison diagram of evaluation index under different sampling ratio

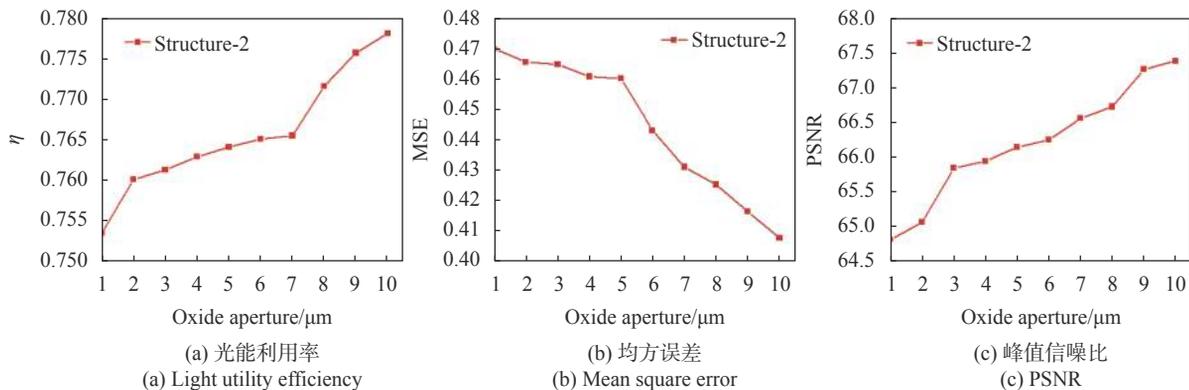


图 7 不同氧化孔径下的评价指标

Fig.7 Evaluation index under different oxide apertures

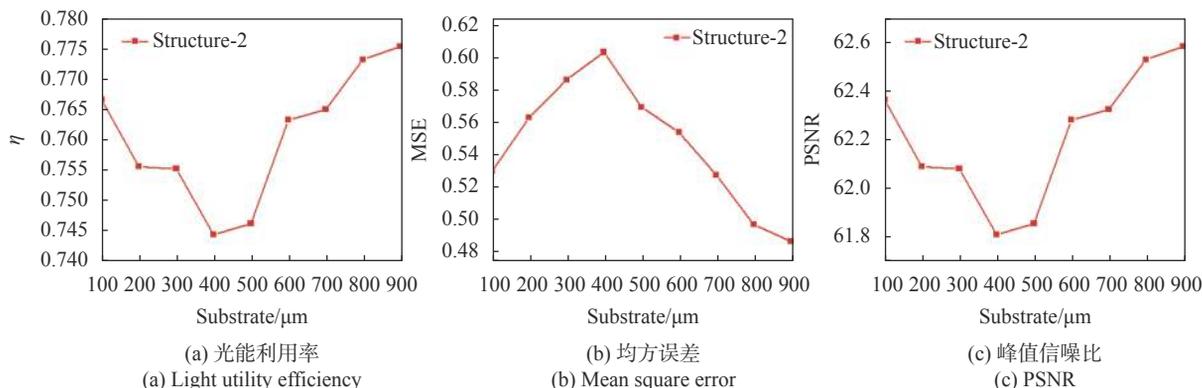


图 8 不同衬底厚度下的评价指标

Fig.8 Evaluation index under different thickness of substrate

的结构光。因此，文中选取  $M = N = 11$ ,  $w_0 = 5 \mu\text{m}$ ,  $L = 600 \mu\text{m}$  作为最佳设计参数。最后，利用光学软件 Virtuallab Fusion 模拟了结构 2 的出光效果，目标光场编码点设置为  $45 \times 45$  (补 0 前为  $21 \times 21$ )，模拟结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出，新型结构光投射装置能够发出清晰可辨且畸变较小的点阵结构光。

设计方案，通过对光场中心零级衍射的进一步抑制，实现了在底发射 VCSEL 衬底上直接集成 DOE 元件，从而获得更加均匀分布的点阵结构光，同时得到了最优的结构设计参数。通过对比，验证了该结构与现有点阵光结构能达到相同的投影效果。该结构降低了现有点阵光投影系统复杂度，提高入射光利用率，为实现小尺寸、紧凑型点阵结构光投影结构提供了一个新思路。下一步将完成该结构的制备以及投影效果的测试，该结构的制备难点在于 DOE 的中心需要与激光束的光轴重合以达到最佳的衍射效果，且该结构的制备对于刻蚀设备的精度要求较高。

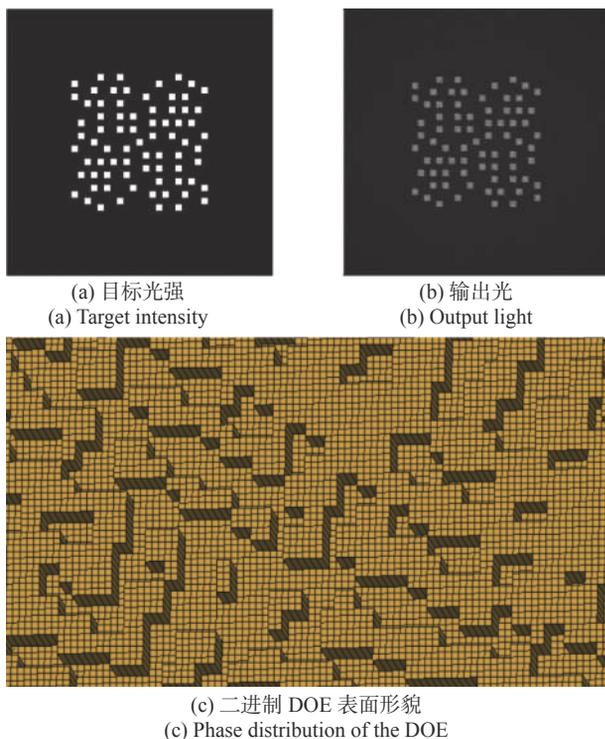


图 9 最佳设计参数下的仿真结果

Fig.9 Simulation results under the optimized design parameters

### 4 结论

文中提出了一种新型片上点阵结构光投射装置

### 参考文献:

- [1] Song Z, Tang S, Gu F, et al. DOE-based structured-light method for accurate 3D sensing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 120: 21-30.
- [2] Zuberi F A, Khatri S, Junejo K N. Dynamic gesture recognition using machine learning techniques and factors affecting its accuracy [C]//2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH). IEEE, 2016: 310-313.
- [3] Lv Z, Xu Y, Li G, et al. A new finger touch detection algorithm and prototype system architecture for pervasive bare-hand human computer interaction [C]//2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2013: 725-728.
- [4] Zhen Z W, Guang j Z, Xin L. The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2001, 2: 787-790.
- [5] Ye J, Zhou C H. Time-resolved coded structured light for 3D

- measurement [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(1): 5-12.
- [6] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age? —An introduction to 3D structured-light sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303001. (in Chinese)
- [7] Zhang X, Chen Y, Ma Q, et al. A beam-shaped study of the stable polarization VCSEL [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(6): 1-5.
- [8] Wang Z, Ning Y, Zhang Y, et al. High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23900-23905.
- [9] Pang H, Yin S Y, Deng Q L, et al. A novel method for the design of diffractive optical elements based on the Rayleigh-Sommerfeld integral [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 38-44.
- [10] Wutting A, Kanka M, Kreuzer H J, et al. Packed domain Rayleigh-Sommerfeld wavefield propagation for large targets [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 270036.
- [11] Lv X, Song Q, Li D, et al. Modified iterative algorithm for the design of wide-diffraction angle diffraction optical element [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(9): 093106.
- [12] Soifer V A, Kotlar V, Doskolovich L. Interactive Methods for Diffractive Optical Elements Computation[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [13] Zhao Yongshun. Diffractive optical element design for generating point-array structured light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] Du C L, Zhou L S, Qiu C K, et al. Study and application of diffractive microlens array [J]. *Optical Technology*, 1998, 131(3): 17-19. (in Chinese)
- [15] Pang H, Wang J, Cao A, et al. Accurate hologram generation using layer-based method and iterative Fourier transform algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 2200108.
- [16] Fang S. Research on algorithms of computer-generated hologram for three-dimensional object based on tomography[D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] Pang H, Ying C F, Fan C J, et al. Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 977-981. (in Chinese)