

微柱镜面周期性纹理结构衍射杂散光研究

孙昊¹, 唐乐^{1,2,4}, 王春艳¹, 张为国^{3,4}, 杜春雷^{2,4}, 夏良平^{2,4*}¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长江师范学院微纳光电器件与智能感知系统重点实验室, 重庆 408100;³中国科学院重庆绿色智能技术研究院微纳制造与系统集成研究中心, 重庆 400714;⁴珠海迈时光电科技有限公司, 广东 珠海 519060

摘要 为分析车床加工百微米级口径微柱透镜时遗留周期性刀纹产生的杂散光影响, 构建了周期结构模型, 分析了表面周期性纹理结构对衍射杂散光的影响。利用傅里叶光学理论建立了该结构的衍射理论模型, 计算了在不同深度下的衍射光场强度分布规律, 所获得的理论结果与商业光学软件 VirtualLab 的物理光学仿真和实验测试结果基本一致, 实现了对理论模型的理论验证, 为进一步解决该类光学器件中周期性加工刀纹产生的衍射杂散光问题提供了理论依据, 对微柱透镜的高精度加工具有指导意义。

关键词 衍射; 周期性纹理; 微柱透镜; 傅里叶光学; 杂散光

中图分类号 N34 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230783

1 引言

微柱透镜及柱透镜阵列在激光照明、激光切割、激光显示及光刻等领域具有广泛应用^[1-3]。如在工业领域, 作为基础光学器件, 微柱透镜因准直效果好、结构紧凑、能量损耗低等优点^[4], 常用于体积较小的半导体激光器的光束整形^[5]。随着应用场景的不断拓展, 市场对微柱透镜及其阵列透镜的要求不断上升, 对该类器件的快速高精度加工需求更加迫切。

微柱透镜通常采用传统机械磨削、超精密车削及模压成形等方法加工而成^[6-7]。在车床加工过程中, 车床刀具的步进常为恒定周期, 这决定了透镜表面必然存在与刀纹对应的周期性纹理结构。这一周期性纹理结构在强激光照射下将激发明显的衍射现象^[8], 并在光路中形成干扰系统的杂散光, 严重影响光学系统功能。然而, 目前关于这一现象的研究报道较少, 导致该问题的解决缺乏理论指导依据。

基于这一现状, 本文开展了柱透镜加工表面的周期性纹理对光束质量影响的研究, 在傅里叶光学的基础上建立了具有周期性纹理特征的柱透镜的衍射杂散光分析模型, 并结合 VirtualLab 物理光学仿真和快轴准直微柱透镜实验, 基于该模型对衍射杂散光的分布进行了理论计算、模拟仿真和实验验证, 得到了一致的规律, 为该类光学器件中周期纹理引起的衍射杂散光

问题的解决提供了理论参考。

2 现象

为了研究表面周期性纹理对光束质量的影响, 以半导体激光快轴准直微柱透镜为例, 搭建了图 1 所示的光路对这一透镜进行光学性能的测试。半导体激光芯片发出的发散激光首先经过快轴准直柱透镜, 实现快轴准直后再经过慢轴准直镜进行慢轴准直^[9], 得到的高功率密度准直激光经过衰减片后由探测器捕获光斑, 由此获得其空间光场的分布结果。在该实验中, 所

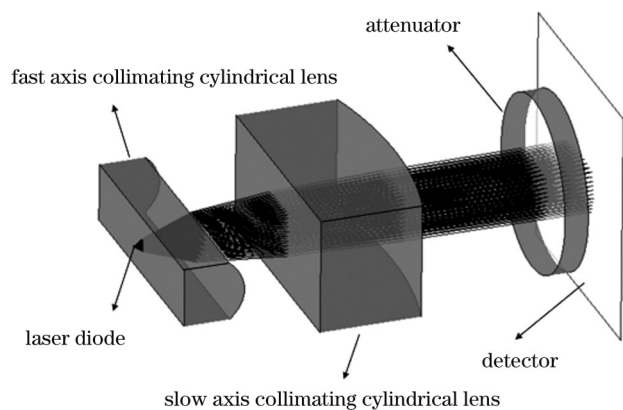


图 1 柱透镜光学性能测试示意图

Fig. 1 Schematic for testing optical performance of cylindrical lens

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-07-13; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20220755KJ)、重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-LZX0056)、重庆市教委项目(KJZD-K202101403, KJCX2020049, HZ2021014, CXQT20027)

通信作者: *xialp@yznu.edu.cn

采用的半导体激光芯片波长为 915 nm, 快轴发散全角为 31°, 慢轴发散全角 12°。快轴准直微柱透镜截面长

度为 2.0 mm, 宽度为 0.5 mm, 柱透镜材料及面形参数如表 1 所示。

表 1 快轴准直微柱透镜设计参数

Table 1 Design parameters of fast axis collimating micro-cylindrical lens

Radius of curvature /mm	Conic	4th order term	6th order term	8th order term	10th order term	12th order term
0.285	-0.98	-3.17	-10.62	9.96	-819.05	8900.16

经过实验测试, 光电探测器阵列所获得的准直后的光斑分布如图 2(a) 所示, 此时可以清楚看到光斑能量集中分布于中央区域, 柱透镜的准直性能较好, 但在快轴方向(竖直方向)光斑向两端产生了一定程度的弥

散, 形成的杂散光独立于主光斑存在, 对后端光路应用产生严重影响。在实验过程中, 为了能清晰地看到周围的杂散光, 将探测器响应度调至图 2(a) 所示的中央区域能量过曝状态。

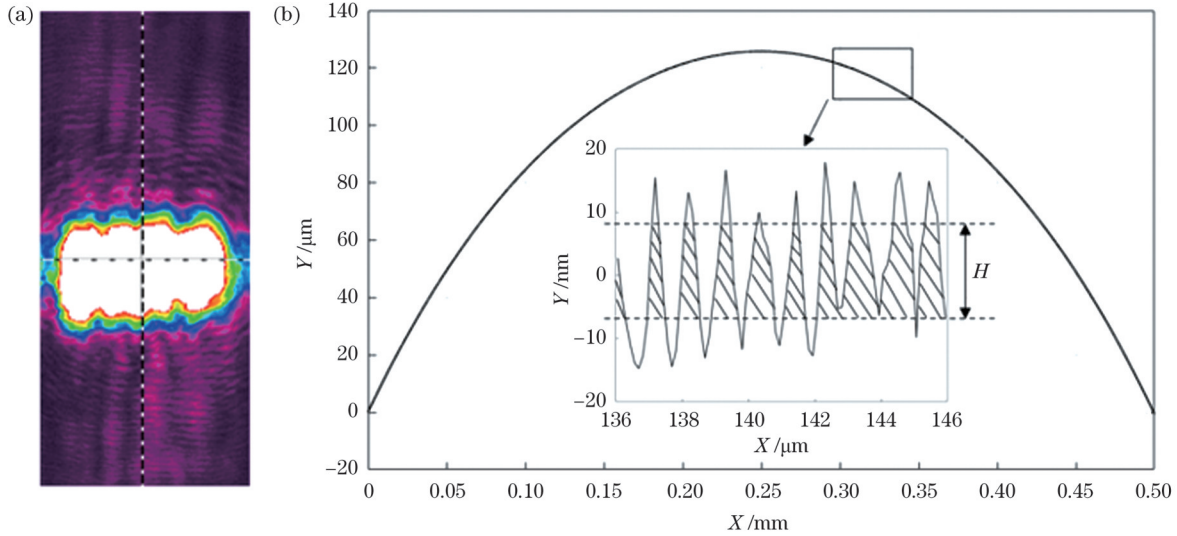


图 2 微柱透镜调试光斑和对应的截面轮廓特征图。(a) 测试得到的光斑图; (b) 快轴微柱透镜表面轮廓及局部误差测试结果
Fig. 2 Debugging spot of micro-cylindrical lens and corresponding cross-section profile feature. (a) Spot pattern obtained by measurement; (b) surface profile and local error test result of fast axis micro-cylindrical lens

图 2(a) 中光斑快轴方向的能量分布情况由快轴准直微柱透镜决定。因此, 以快轴准直微柱透镜为主要分析对象, 进一步采用三维轮廓仪对快轴微柱透镜的表面进行了面形测试, 测试结果如图 2(b) 所示。该结果表明, 其整体面形与表 1 参数一致, 因此在光斑分布中, 中央准直区对应的准直结果较好。然而, 在去除理想面形后, 获得的面形误差的局部放大图表明, 该误差面形存在较规律的起伏振荡。通过进一步分析可知, 这种振荡表现出周期性的纹理特征, 其纹理的间隔为 1 μm, 这与加工该微柱透镜时所设置的刀具步进距离一致。因此, 可判定该纹理是微柱透镜加工时遗留的刀纹。通过统计, 可获得整个截面内所有这种纹理结构的峰谷均值, 如图 2 中 H 所示, 其表征这种周期纹理结构的显著程度。由于这种结构存在周期性特征, 在激光二极管(LD)的照射下, 其衍射效应将产生图 2(a) 所示的与主光斑偏离的杂散光。

3 结构与模型

为了对上述微柱透镜表面的周期性纹理结构及其产生的衍射杂散光进行理论分析, 基于车床加工时残留刀纹的特征, 建立了图 3 所示的微柱透镜结构模型。

该模型由理想微柱透镜面形和周期纹理结构叠加而成, 理想面为理论设计柱面, 周期纹理结构根据加工刀口特征给出, 通过刀口半径(r)、刀具步进距离(Δx), 可获得出纹理结构的峰谷均值 H 。根据两个结构复合后形成的面形, 通过计算其对入射光波的相位调制函数, 利用傅里叶光学理论, 可得到这种周期性纹理结构产生的衍射杂散光的分布情况^[10]。

根据图 3 所示结构, 微柱透镜的厚度(h)包含了理想面形厚度 $h_1(x)$ 和周期纹理结构的厚度 $h_2(x)$, 因此

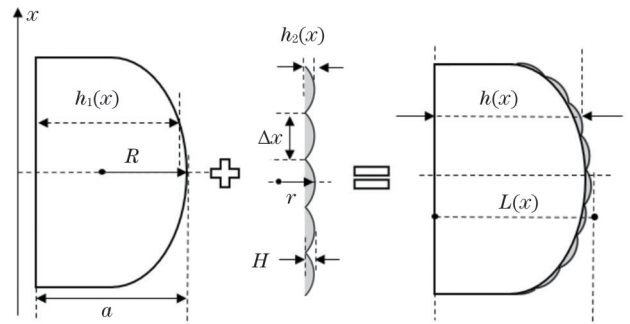


图 3 周期纹理结构的构成图

Fig. 3 Composition diagrams of periodic texture structure

其整体厚度函数满足

$$h(x) = h_1(x) + h_2(x), \quad (1)$$

式中: x 为采样点的位置坐标; $h_1(x)$ 和 $h_2(x)$ 的表达式均采用了傍轴近似。

对于微柱透镜, 其理想面形部分所对应的厚度函数 $h_1(x)$ 满足

$$h_1(x) = a - (R - \sqrt{R^2 - x^2}) = a - \frac{x^2}{2R}, \quad (2)$$

式中: a 为理想微柱透镜的中心厚度; R 为理想微柱透镜的曲率半径。

对于周期性纹理结构, 根据刀具及其步进工作方式, 得到其厚度函数 $h_2(x)$ 为

$$h_2(x) = h_2(x \pm K\Delta x) = H - (r - \sqrt{r^2 - x^2}) = \left[1 - \frac{x^2}{(0.5\Delta x)^2 + H^2} \right] H, K \in [0, N], \quad (3)$$

式中: K 为从透镜中心位置到当前子周期纹理结构位置子透镜的数目; N 为从透镜中心位置到边缘位置子周期纹理结构数量的最大值。

透镜的相位变换函数, 可以由光程给出, 透镜的光程 $L(x)$ 表示为

$$L(x) = nh(x) + [a + H - h(x)] = a + H + (n - 1)h(x), \quad (4)$$

式中: n 为微柱透镜的折射率。

然而, 透镜子口径大小是有限的, 相当于存在一个有限大小的孔径, 为了表示透镜的有限孔径效应, 加入光瞳函数 $[P(x)]$, 透镜透射系数表示为

$$\tilde{i}(x) = \exp[ikL(x)]P(x) = \exp(ika) \exp(ikH) \exp[ik(n - 1)h(x)]P(x), \quad (5)$$

式中: k 为空间角频率; 在透镜孔径内 $P(x) = 1$, 在其他位置 $P(x) = 0$ 。

探测面上光场的复振幅分布为入射光复振幅乘以透镜透射系数的傅里叶变换结果, 对振幅进行平方运算就可以得到光强的分布。入射球面波复振幅分布的一般形式^[11]表示为

$$u(x) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left(ik\frac{x^2}{2f}\right), \quad (6)$$

式中: λ 为入射光波长; f 为入射光与透镜之间的距离。

因此探测面复振幅分布可以表示为

$$U(x) = u(x)\mathcal{F}[\tilde{i}(x)], \quad (7)$$

式中: $\mathcal{F}[\tilde{i}(x)]$ 为透镜透射系数的傅里叶变换。

探测面光强分布为

$$I(x) = |U(x)|^2. \quad (8)$$

4 讨论分析

由上述模型可知, 实际加工柱透镜的面形由理想面和周期纹理结构叠加而成。为了对上述结构及其产生的衍射杂散光理论模型进行验证, 首先利用软件建立图 3 所示的快轴准直微柱透镜的三维结构, 对于所建立的快轴准直微柱透镜结构, 其理论面形的材料参数保持不变, 周期纹理结构的曲率半径、厚度、通光口径等参数确定, 表征周期纹理显著程度的纹理深度 H 为变量。在 VirtualLab 软件中, 构建与图 1 一致的光路进行物理光学仿真, 得到不同周期纹理深度下的仿真光分布, 如图 4(a)、(b) 所示, 其分别对应 $H = 0$ nm 和 $H = 26.8$ nm。

通过对该光分布中主光斑的分析可知, 柱透镜表

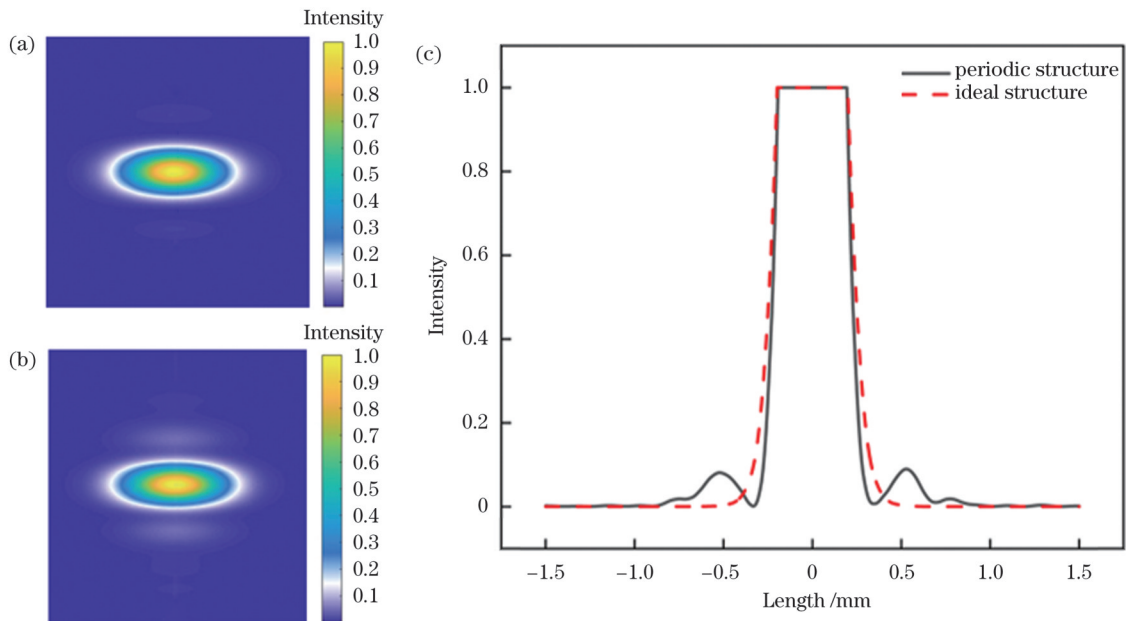


图 4 仿真光斑和快轴方向的光强分布图。(a) $H = 0$ nm 时的光斑; (b) $H = 26.8$ nm 时的光斑; (c) 光强截面分布图
Fig. 4 Simulated spots and intensity distribution along fast axis direction. (a) Spot when $H = 0$ nm; (b) spot when $H = 26.8$ nm; (c) cross-sectional distribution of light intensity

面周期纹理特征并不会影响光束准直性,不同深度 H 下主光斑的快轴发散角和直径基本一致,发散角约为 0.4° ,直径为 0.48 mm 。然而,与图 4(a)所示的光斑相比,可以看到,在图 4(b)所示的光斑中,其竖直方向(快轴方向)会出现一个独立于主光斑的衍射弥散斑,这表明柱透镜表面的周期纹理结构产生了恶化其准直性能的衍射杂散光。

为了进一步量化衍射杂散光,沿光分布图中白色虚线箭头方向(快轴方向)对光斑能量进行截取,并采用与图 2(a)所示的相似设置,即将光斑中间区域能量调至过曝状态,得到的光束快轴方向的能量强度分布如图 4(c)所示,理想结构、周期结构分别对应图 4(a)、

(b)中的光斑,其中存在表面周期纹理的柱透镜与理想柱透镜相比,产生了与图 2 实验一致的独立于主光斑的衍射杂散光,且其强度可通过衍射杂散光峰值进行量化。

为了进一步验证所建立的理论模型的准确性,选取 6 组实际加工得到的微柱透镜, H 分别为 13.1 、 15.3 、 16.2 、 18.2 、 22.8 、 26.8 nm ,采用图 1 所示光路对所加工的微柱透镜进行光学测试,得到的强度分布如图 5 所示。可以看到, H 越大,产生的衍射杂散光越强。当柱透镜表面 H 大于 16.2 nm 时,衍射杂散光较为显著,将对器件的光学性能产生不可忽略的影响。

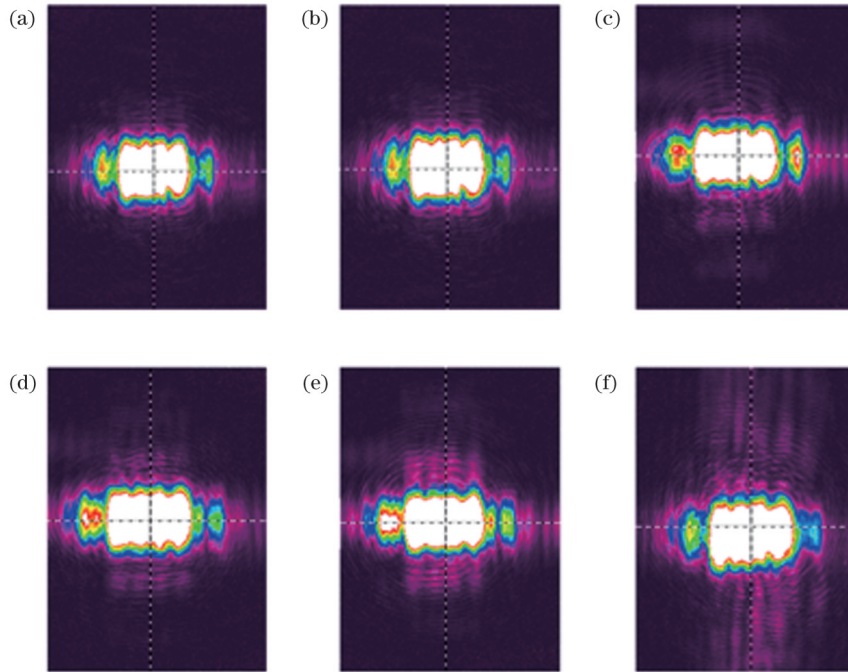


图 5 实验测得的光斑图。(a) $H=13.1\text{ nm}$; (b) $H=15.3\text{ nm}$; (c) $H=16.2\text{ nm}$; (d) $H=18.2\text{ nm}$; (e) $H=22.8\text{ nm}$; (f) $H=26.8\text{ nm}$
 Fig. 5 Spot patterns obtained by experiment. (a) $H=13.1\text{ nm}$; (b) $H=15.3\text{ nm}$; (c) $H=16.2\text{ nm}$; (d) $H=18.2\text{ nm}$; (e) $H=22.8\text{ nm}$; (f) $H=26.8\text{ nm}$

针对上述 6 组器件,采用所建立的理论分析模型以及商业软件进行计算,获得 6 组 H 不同的柱透镜的衍射峰值强度,如图 6 所示,其中方块虚线数据表示软件仿真结果,圆形实线数据对应理论模型的计算结果。该结果表明,随着 H 的不断增大,产生的归一化杂散光的峰值强度不断增大,衍射杂散光强度随 H 的增加呈近似线性变化,且模型计算结果与软件仿真结果基本吻合,同时该变化趋势与图 5 所示的变化趋势基本一致,验证了所建立的微柱透镜表面周期纹理结构模型和衍射杂散光分析模型的准确性。基于以上模型的分析,可以得到衍射杂散光与周期纹理结构的关系,当 H 控制在 16.2 nm 以内时,衍射杂散光能得到有效控制,由此得出了微柱透镜表面周期纹理结构深度的控制要求,为微柱透镜的加工提供了理论依据。

此外,通过上述模型的分析 and 实验可知,透镜表面

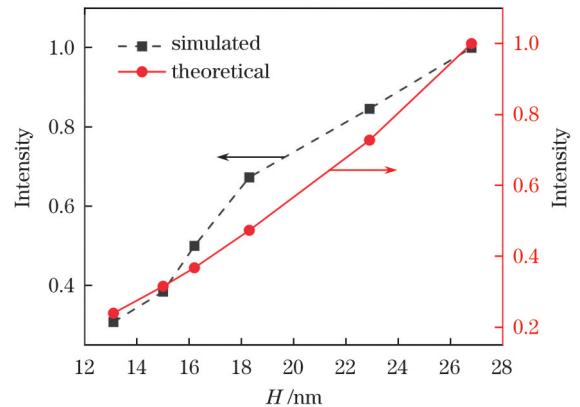


图 6 杂散光峰值强度随 H 变化的规律
 Fig. 6 Peak intensity of stray light versus H

周期纹理结构能够产生固定级次和角度的衍射现象。因此可尝试破坏其表面周期特征,以达到削弱杂散光

的目的。在 H 同为 26.8 nm 的情况下,根据理论模型,在理想微柱透镜面形上构建了图 7(b)所示的非周期结构刀纹,图 7(a)为对应的周期结构刀纹细节图。两种不同纹理结构的柱透镜经理论仿真后,获得的光斑的强度截面分布如图 7(c)所示,其中实线代表周期纹

理结构的结果,点划线代表非周期纹理结构的结果。该结果显示,非周期纹理结构的衍射杂散光强度峰值仅为相同 H 下周周期纹理结构的 1/3,这说明在加工过程中对刀纹间距进行非周期化处理,可显著改善其产生的衍射杂散光强度。

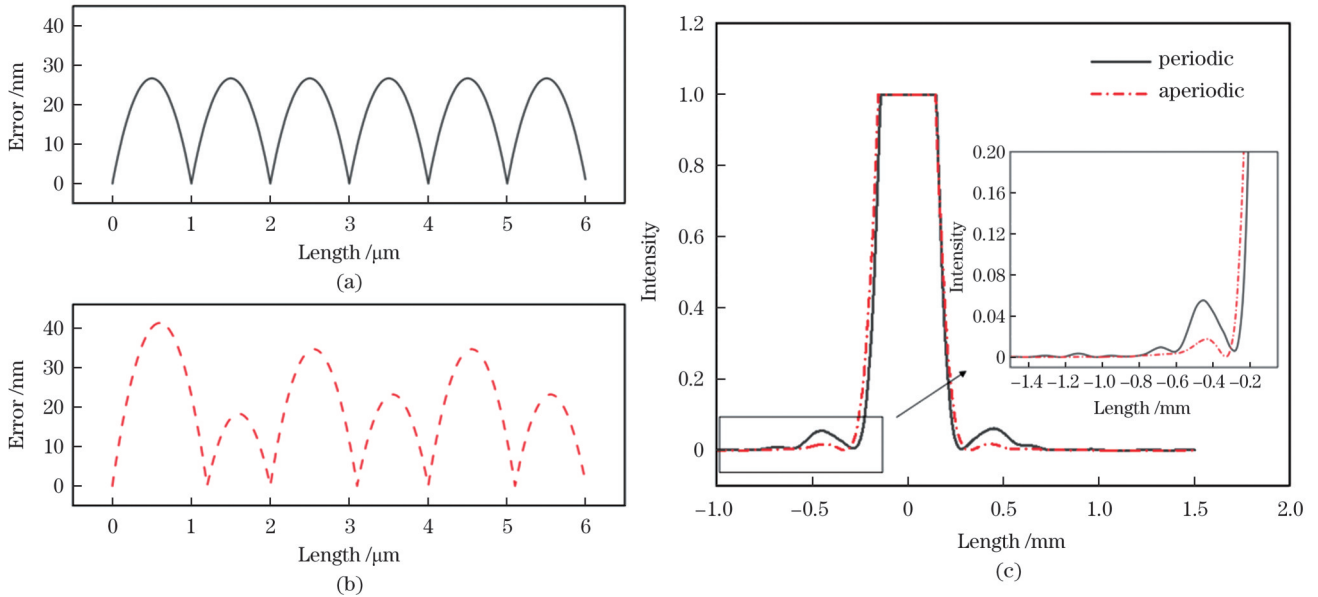


图 7 微柱透镜截面误差和对应的快轴方向的光强分布。(a)周期结构刀纹细节图;(b)非周期结构刀纹细节图;(c)微柱透镜的光强截面分布图

Fig. 7 Cross-sectional error of micro-cylindrical lens and corresponding light intensity distribution along fast axis direction. (a) Detail view of knife pattern with periodic structure; (b) detail view of knife pattern with aperiodic structure; (c) cross-sectional distribution of light intensity of micro-cylindrical lens

5 结 论

研究了微柱透镜表面周期性纹理与光束衍射杂散光之间的关系,建立了微柱透镜周期纹理结构的分析模型,给出了周期结构与衍射杂散光强度关系的理论计算和仿真分析方法,该方法得到的计算结果与实验结果基本一致。研究结论为解决微柱透镜加工过程中周期结构刀纹产生的衍射杂散光问题提供了理论分析方法。

参 考 文 献

- [1] 赵旺,董理治,杨平,等.目标粗糙特性对主动照明信标波前探测的影响[J].中国激光,2019,46(7):0705002.
Zhao W, Dong L Z, Yang P, et al. Influence of surface roughness on wavefront sensing performance of active illumination beacon[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0705002.
- [2] Dubey A K, Yadava V. Laser beam machining—a review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(6): 609-628.
- [3] 甘雨,张方,朱思羽,等.光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J].中国激光,2019,46(3):0304007.
Gan Y, Zhang F, Zhu S Y, et al. Evaluation algorithm of pupil characteristic parameters in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304007.
- [4] Guo C W, Xiong B X, Zhang G J, et al. LD beam collimation based on aspheric cylindrical lens[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10838: 1083817.
- [5] 许昌,彭钦军,王志敏,等.一种光束整形的光学系统:CN218767618U[P].2023-03-28.
Xu C, Peng Q, Wang Z, et al. Optical system for beam shaping: CN218767618U[P]. 2023-03-28.
- [6] 郑鑫宇.柱阵列玻璃透镜模压成形仿真及实验研究[D].长沙:湖南大学,2021.
Zheng X Y. Simulation and experimental study on compression molding of cylindrical array glass lens[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [7] 青建宏.基于紫外压印技术的柱面微透镜阵列制备研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2022.
Qing J H. Research on the fabrication of cylindrical microlens array based on UV imprinting technology[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [8] 郭福源,李连煌,郑华.小平坦波面光场的衍射与准直特性[J].光学学报,2021,41(4):0426001.
Guo F Y, Li L H, Zheng H. Diffraction and collimation characteristics of small light fields with planar wavefronts[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0426001.
- [9] 蒋全伟,张兰平,郭林辉,等.高亮度半导体激光光纤模块中光学补偿方法[J].中国激光,2021,48(11):1101003.
Jiang Q W, Zhang L P, Guo L H, et al. Optical compensation method for pigtail module in high-brightness laser diodes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1101003.
- [10] 赵凯华,钟锡华.光学[M].北京:北京大学出版社,1984.
Zhao K H, Zhong X H. Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 1984.
- [11] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.

Diffraction Stray Light of Periodic Texture of Micro-cylindrical Lens

Sun Hao¹, Tang Le^{1,2,4}, Wang Chunyan¹, Zhang Weiguo^{3,4}, Du Chunlei^{2,4}, Xia Liangping^{2,4*}

¹*School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

²*Key Laboratory of Micro Nano Optoelectronic Devices and Intelligent Perception Systems, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China;*

³*Research Center for Micro-Nano Manufacturing and System Integration, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;*

⁴*Zhuhai Multiscale Optoelectronics Technology Co., Ltd., Zhuhai 519060, Guangdong, China*

Abstract

Objective In the field of optics, micro-cylindrical lenses and cylindrical lens arrays are commonly used optical devices usually processed by traditional mechanical grinding, ultraprecision turning, and die forming. In the process of diamond lathe machining, the tool machining step often has a constant period, resulting in the formation of a periodic texture structure corresponding to the knife pattern on the lens surface. This structure causes an obvious diffraction phenomenon under strong laser irradiation and produces stray light that interferes with the optical path in the optical system, seriously affecting the function of the optical system. However, there are few reports on this phenomenon at present, resulting in a lack of theoretical guidance for solving this problem.

Methods To analyze the influence of stray light on the surface of a 100- μm -diameter micro-cylindrical lens caused by lathe machining, a model of the periodic texture structure is constructed, and the influence of the surface periodic texture structure on diffractive stray light is analyzed. The theoretical diffraction model of the structure is established by using Fourier optical theory, and the intensity distribution rules of the diffracted light field at different depths are calculated. The theoretical rules obtained are basically consistent with the physical optics simulation and experimental test results of the commercial optical software VirtualLab, and the theoretical model is verified theoretically and experimentally.

Results and Discussions Based on the model of the periodic texture structure, the light spots of the ideal lens are compared with those of the lens with the periodic texture structure. As shown in Fig. 5, compared with those of the ideal lens, the light spots of the lens with the periodic texture structure produce obvious diffractive stray light along the fast axis direction. In view of this phenomenon, the beam intensity distributions are calculated and simulated at different depths of the periodic texture structure on the surface of the micro-cylindrical lens, as shown in Fig. 6. It can be seen that, the deeper the periodic structure, the stronger the diffractive stray light generated. When the surface texture depth of the cylindrical lens is greater than 16.2 nm, the diffracted stray light is more significant, which has a significant impact on the optical performance of the device. This is basically consistent with the experimental result. Finally, according to the research results, a method is proposed to control the depth of the periodic structure and destroy the periodic characteristics of the surface to weaken the diffractive stray light.

Conclusions In this study, the relationship between the periodic texture of the micro-cylindrical lens and the diffracted stray light of the beam is studied, an analysis model of the periodic texture structure of the micro-cylindrical lens is established, and theoretical calculation and simulation analysis methods for analyzing the relationship between the periodic structure and the intensity of the diffracted stray light are given. This research provides a theoretical analysis method for solving the problem of diffractive stray light caused by periodic knife grain in the machining process of micro-cylindrical lenses.

Key words diffraction; periodic texture; microcylindrical lens; Fourier optics; stray light