

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

VirtualLabTM 在微小梯度折射率透镜性能分析中的应用

王 驰^{1,2}, 孙 凡^{1*}, 于 洋¹, 张 芳¹

(1. 上海大学 精密机械工程系, 上海 200072;

2. 讯技光电科技(上海)有限公司, 上海 200030)

摘要:研究了场追迹物理光学软件 VirtualLabTM 在微小梯度折射率 (GRIN) 透镜性能分析中的应用。简述了微小 GRIN 透镜的基本特性, 在 VirtualLabTM 环境中建立了微小 GRIN 透镜的光学模型, 数值分析了不同长度的 GRIN 透镜的聚焦性能。实验显示微小 GRIN 透镜具有 1/2 节距的长度周期, 并且长度在 1/4 节距时具有强烈的聚焦性能。结果验证了仿真取得的数据与理论分析吻合, 表明研究 GRIN 透镜聚焦性能的周期性可为小型光学探头的设计与制作提供理论依据和有效手段, 而 VirtualLabTM 适于 GRIN 透镜小型化的研究, 是光学系统设计与分析中一个直观而有效的工具。

关键词:梯度折射率 (GRIN) 透镜; 聚焦特性; 场追迹; VirtualLabTM; 节距

中图分类号: TH703; O473 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152313.0000

Application of VirtualLabTM in performance analysis of miniaturized GRIN lenses

WANG Chi^{1,2}, SUN Fan^{1*}, YU Yang¹, ZHANG Fang¹

(1. Department of Precision Mechanical Engineering,
Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. InfoTek Information Science & Technology Co. Inc., Shanghai 200030, China)

* Corresponding author, E-mail: shusunfan@163.com

Abstract: The application of field-tracing physical optical software VirtualLabTM to the performance analysis of a miniaturized gradient-index (GRIN) lens were investigated. and the basic properties of the miniaturized GRIN lens was introduced, the lensoptical model of miniaturized GRIN lens was established in the platform of VirtualLabTM. Then, focusing properties of GRIN lenses with different lengths were simulated. The simulation results show that the miniaturized GRIN lens has a period of 1/2 pitch length and appears strong focusing performance at the length of 1/4 pitch, which is consistent with related theory. The experimental results verify that the research on periodicity of focusing performance for GRIN lenses can provide theoretical basis and effective methods for design and fabrication of smaller optical probes. Moreover, the VirtualLabTM is confirmed to be an intuitive and effective tool to optics design and analysis and is applicable to miniaturized investigation of

收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2015-07-02.

基金项目: 上海市晨光计划资助项目 (No. 12CG47); 上海市教育委员会科研创新项目 (No. 13YZ22)

GRIN lenses.

Key words: Gradient Index (GRIN) lens; focusing performance; field-tracing; VirtualLab™; pitch

1 引 言

GRIN 透镜 (Gradient-index Lens, GRIN lens) 是折射率分布关于中心轴对称并沿径向方向梯度变化的一种自聚焦透镜,在光学相干层析技术 (Optical coherence tomography, OCT) 用微小光学探头研制方面受到了学者的青睐。如 S. Guo 和 T. Xie 等人设计了具有动态跟踪功能的内窥式 OCT 用自聚焦光学探头^[1-3]。K. Aljaseem 等人研究了尺寸在 4 mm 量级的内窥式光学探头^[4]。P. Meemon 等人研究了用于高分辨率 OCT 成像系统的动态聚焦导管^[5]。E. J. Min 等人提出了手持式光纤扫描探头^[6]。近年来,基于 GRIN 光纤镜头的超小光学探头得到了研制和发展。2002 年,Swanson 发明了基于 GRIN 光纤镜头的超小光学探头^[7],Reed 和 Jafri 等人利用该探头研究了活体、在线检测的 OCT 系统^[8-9]。2007 年,Mao 等人研究了超小 GRIN 光纤探头的制作与光学性能检测方法^[10-11]。2011 年,本课题组开始了超小 GRIN 光学探头的解析设计和制作方法的研究^[12-15]。

GRIN 透镜的传光性能是小型化探头研究应用的关键,如 GRIN 透镜的焦距和聚焦光斑尺寸在很大程度上分别决定了检测的工作距离和分辨率。然而,对于小型尤其是超小型的 GRIN 透镜来说,其焦距和聚焦光斑尺寸很小,难以靠实验来检测。本课题组在文献[16-17]中论述了利用物理光学软件 GLAD 仿真微小 GRIN 光学探头的数值分析技术;在文献[18]中研究了场追迹建模技术在微小 GRIN 光纤探头设计与性能分析中的应用,在文献[19]中研究了利用场追迹软件 Virtual-Lab™对 GRIN 光学探头进行建模的具体方法。GRIN 透镜是微小光学探头研制中的关键部件,本文在已有研究成果基础上,论述了微小 GRIN 透镜在 VirtualLab™环境中的建模技术,并对不同长度尺寸的 GRIN 透镜进行了聚焦性能分析。

2 GRIN 透镜的基本特性

相对传统的透镜而言,GRIN 透镜在光学系

统小型化等方面具有诸多优势。如图 1(a)所示,传统透镜的聚焦成像工作方式如下:透镜材料与空气的折射率有较大差异,当光束通过透镜时,在透镜的两个曲面先后发生折射而聚焦;显然,这对透镜表面的制作工艺要求很高,又因为是曲面而限制了其小型化方面的发展。如图 1(b)所示,与传统透镜不同,GRIN 透镜根据其折射率的连续变化对入射光束进行聚焦,因其端面是平面而便于与其它光学元件集成,这有利于透镜的小型化研究与制作,其焦距和聚焦光斑尺寸可通过适当改变其长度来调整。

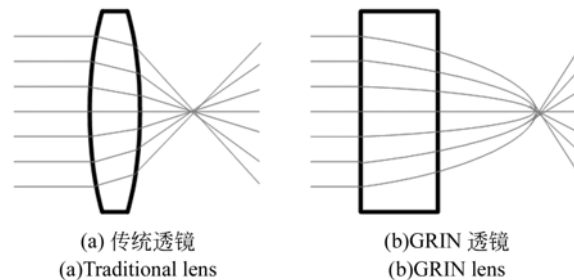


图 1 传统透镜与 GRIN 透镜的聚焦性能比较
Fig. 1 Performance of traditional lens and GRIN lens

GRIN 透镜的折射率在径向方向近似为抛物线分布,其表达式为:

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{g^2}{2} r^2 \right), \quad (1)$$

式中: n_0 代表中心轴线处的折射率, r 和 g 分别表示距离轴线的径向位置和梯度折射率的变化常数(单位为 1 mm^{-1}), g 体现了 GRIN 透镜对入射光束的聚焦程度。

GRIN 光纤透镜对光束的聚焦性能具有节距性(或周期性),节距 P 的表达式为:

$$P = 2\pi/g. \quad (2)$$

根据公式(2),GRIN 光纤透镜的节距跟入射光束的高度位置以及入射角等参数无关,只取决于 GRIN 光纤材料的折射率分布。图 2 形象地表示了 GRIN 透镜对光束聚焦与节距的关系。如果入射光束为对称分布的面光源 AB ,在 $1/4$ 节距处聚焦为“汇聚点 1”,在 $1/2$ 节距处形成与 AB 大小相等、方向相反的像 $B'A'$,在 $3/4$ 节距再次聚焦为

“汇聚点 2”, 在一个节距处形成与 AB 大小相等、方向相同的像 $A'B''$ 。因此, 从透镜对光束聚焦成像的角度而言, GRIN 光纤透镜具有一个节距的长度周期; 然而, 如果光源为高斯型, 它在 GRIN 透镜的入射面上可认为强度分布呈高斯型的轴对称面光源, 在实际的信号处理中不必考虑与光纤轴线垂直方向(即横向)的方向性, 因此, 它对应的 GRIN 透镜对光束的聚焦性能具有 $1/2$ 节距的长度周期。在设计 GRIN 光纤探针时, 一般应考虑光纤透镜长度接近 $1/4$ 节距, 以获得较好的聚焦效果, 但这种长度的 GRIN 光纤透镜因强烈的聚焦特性, 其焦距或工作距离很短。

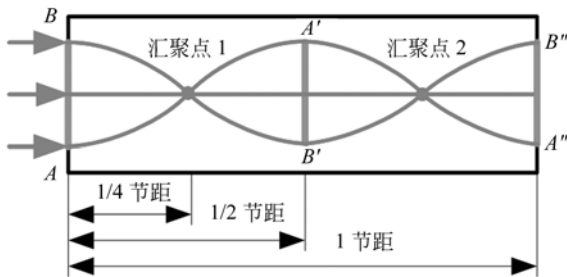


图 2 GRIN 透镜聚焦特性示意图

Fig. 2 Focusing characteristics of GRIN lens

3 VirtualLab™ 在微小 GRIN 透镜性能分析中的应用

3.1 VirtualLab™ 简介

VirtualLab™ 是由德国 LightTrans 公司研发的一款物理光学数值分析软件, 基于电磁场核心理论, 通过求解麦克斯韦方程组 (Maxwell's equations) 获得整个光学系统空间里的光波场向量信息, 即场追迹。在图形化的交互接口 (GUI) 中用 Light Path 流程图的表示方法进行光学系统的建模与分析, 光源、元件和探测器可以在光学元件库中灵活调用并进行光学特性编辑。VirtualLab™ 是目前市场上唯一一个统一化的光学建模与分析平台, 目前兼容了几何光学、平面波光谱法、Fresnel 远场积分、Fourier 模式方法、光束传播方法、 $ABCD$ 矩阵传输等多种模拟技术, 对光学系统的不同媒质区域, 可自动选择传输模拟技术, 也可由用户根据需要自主设置传输方式。另外, 为了便于光学系统的建模与分析, VirtualLab™ 提供了多

种工具箱, 如基本工具箱 (Starter Toolbox)、衍射光学工具箱 (Diffraction Optic Toolbox)、光栅工具箱 (Grating Toolbox) 和激光谐振腔工具箱 (Laser Resonator Toolbox) 等。其中, 基本工具箱是统一建模的平台, 适用于各种光学系统分析, 用于建构和分析多种光学系统。

3.2 微小 GRIN 透镜模型

利用 VirtualLab™ 的 Starter 工具箱对 GRIN 透镜进行建模, 其 Light Path 流程图如图 3 所示。其中, GRIN 透镜由元件 “Double Interface Component” (双端口元件) 来表示, 元件 Gaussian Wave 指高斯型光源, 元件 Beam Parameters 表示光束参数探测器, 元件 Virtual Screen 表示虚拟屏。双击任一元件可弹出参数或特性编辑窗口, 根据需要灵活改变相应参数, 其中, 高斯光源的波长设为 830 nm , 束腰设为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$; 光束探测器用以检测高斯光束通过 GRIN 透镜后的束腰大小。

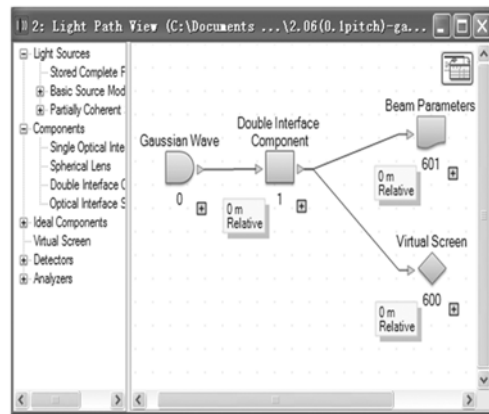


图 3 GRIN 透镜建模与分析光路流程图

Fig. 3 Diagram of modeling and light path of GRIN lens

微小 GRIN 透镜 (即元件 Double Interface Component) 的编辑窗口如图 4 所示, 其长度和孔径在 Structure 中的 Physical Extension 和 Definition Area 编辑框中设置, 设孔径为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 端面 and 材料特性通过鼠标单击 First interface、Second interface 和 Medium between interfaces 的 Edit 选项中进行编辑, 其中设置微小 GRIN 透镜的折射率梯度变化常数为 $0.305/\text{mm}$ (对应节距长度为 20.6 mm)。传输方式选为自动设置, 由软件自动选择并进行光束传播计算。

参数设置完成后运行程序并进行光束性能检

测。如图 5 所示是高斯光束通过长为 2.06 mm (1/10 节距) 的 GRIN 透镜的高斯光斑及其强度分布。显然,利用 VirtualLab 可以直观地观测光束分析。

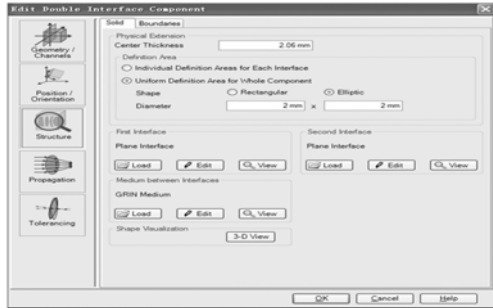


图 4 GRIN 透镜编辑窗口
Fig. 4 Edit window of GRIN lens

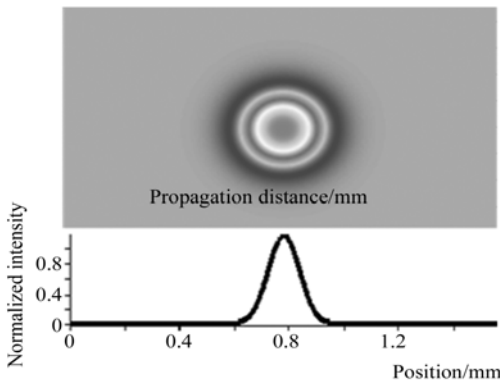


图 5 高斯光束通过 GRIN 透镜后的光斑及强度分布轮廓
Fig. 5 Spot profile and intensity distribution of Gauss beam going through GRIN lens

3.3 微小 GRIN 透镜的性能分析

根据图 3 所示的微小 GRIN 透镜模型及性能分析的光路流程图,针对 1/10 节距、1/8 节距、1/6 节距、1/5 节距和 1/4 节距长(对应长度分别为:2.06,2.575,3.433,4.12 和 5.15 mm)的 5 种 GRIN 透镜的传光性能进行了模拟分析,结果如图 6 所示。不难看出,光束通过 GRIN 透镜后先聚焦至某一位置,然后进行发散,1/10 节距、1/8 节距、1/6 节距、1/5 节距和 1/4 节距长的 GRIN 透镜的焦距(定义为束腰最小位置与透镜输出端面之间的长度)分别为 2.8,2.0,1.2,0.65 和 0 mm,对应的束腰半径分别为 9.0,7.5,6.2,5.6 和 5.3 μm 。因此,微小 GRIN 透镜长越逼近 1/4 节距,聚焦性能越强烈,表现为焦距和束腰半

径均变小,与理论分析吻合。

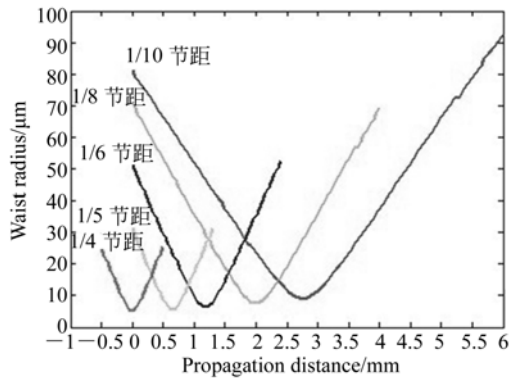


图 6 高斯光束通过不同长度 GRIN 透镜后的传播性能
Fig. 6 Transmission performance of Gauss beams going through GRIN lens with different lengths

为了进一步验证微小 GRIN 透镜的性能,针对如表 1 所示的节距长度的微小 GRIN 透镜分别进行了聚焦性能仿真,即通过连续增加 GRIN 透镜长度的方式,观测输出高斯光斑的变化情况。图 7 所示是微小 GRIN 透镜输出端面处的高斯光斑的束腰半径随 GRIN 透镜长度变化的拟合曲线,容易发现如下结论:(1)束腰大小随 GRIN 透镜长度的变化具有周期性,其周期为 1/2 节距长度;(2)在 5.15 mm (1/4 节距长)和 15.45 mm (3/4 节距长)处束腰最小(约为 6 μm),说明聚焦最为强烈;(3)在 10.3 mm (1/2 节距长)和 20.6 mm (1 节距长)处,束腰最大,约为 100 μm ,这与输入高斯光束的束腰相等;(4)作为前三个结论的拓展,当透镜长度越接近 1/4 节距的奇数倍长时,聚焦性能越强烈,越接近 1/4 节距的偶数倍长

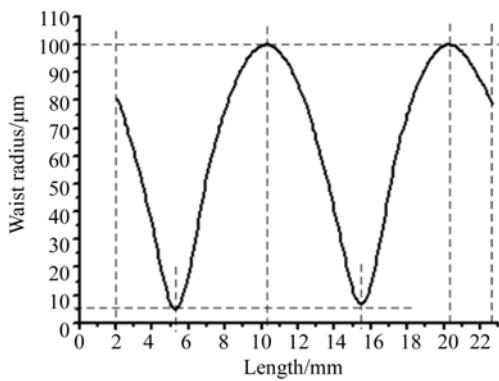


图 7 不同长度 GRIN 透镜输出端面处的束腰半径
Fig. 7 Waist radius at output end plane for Grin lens of different lengths

时,聚焦性能越弱。

这些仿真结果及结论与 GRIN 透镜的基本特性吻合,这一方面说明了基于 VirtualLab™ 的数值分析技术可很好地进行理论验证;另一方面,它可

直观而有效地帮助设计和分析光学系统性能,尤其在微小 GRIN 透镜尺寸特别小,这些功能靠实验难以进行的情况下。因此,VirtualLab™ 是 GRIN 透镜及其小型化研究中的一个有效工具。

表 1 微小 GRIN 透镜的节距长度

Tab. 1 Pitch lengths of micro GRIN lens

节距	长度/mm	节距	长度/mm	节距	长度/mm	节距	长度/mm
1/10	2.06	1/4 + 1/10	7.21	1/2 + 1/10	12.36	1/2 + 1/4 + 1/10	17.51
1/9	2.29	1/4 + 1/9	7.44	1/2 + 1/9	12.59	1/2 + 1/4 + 1/9	17.74
1/8	2.575	1/4 + 1/8	7.725	1/2 + 1/8	12.875	1/2 + 1/4 + 1/8	18.025
1/7	2.943	1/4 + 1/7	8.093	1/2 + 1/7	13.243	1/2 + 1/4 + 1/7	18.393
1/6	3.433	1/4 + 1/6	8.583	1/2 + 1/6	13.733	1/2 + 1/4 + 1/6	18.883
1/5	4.12	1/4 + 1/5	9.27	1/2 + 1/5	14.42	1/2 + 1/4 + 1/5	19.57
1/4	5.15	1/4 + 1/4	10.3	1/2 + 1/4	15.45	1/2 + 1/4 + 1/4	20.6

4 结 论

本文在简述微小 GRIN 透镜特性的基础上,在场追迹物理光学软件 VirtualLab™ 环境里建立微小 GRIN 透镜光学模型并进行了性能分析,仿真取得的数据与理论分析结果吻合,验证了微小

GRIN 透镜的聚焦性能具有 1/2 节距的周期长度,并且在逼近 1/4 节距的奇数倍时聚焦最为强烈,从而说明了 VirtualLab™ 是光学设计与分析中的一个直观而有效的工具,可为 GRIN 透镜的小型化及其它光学系统的设计与制作提供一种有效手段。

参考文献:

- [1] GUO SH G, YU L F, SEPEHR A, *et al.*. Gradient-index lens rod based probe for office-based optical coherence tomography of the human larynx[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, 14(1): 014017.
- [2] XIE T Q, GUO SH G, CHEN ZH P. GRIN lens rod based probe for endoscopic spectral domain optical coherence tomography with fast dynamic focus tracking [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3238-3246.
- [3] XIE T Q, LIU G J, KREUTER K, *et al.*. In vivo three-dimensional imaging of normal tissue and tumors in the rabbit pleural cavity using endoscopic swept source optical coherence tomography with thoracoscopic guidance[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, 14(6): 064045.
- [4] ALJASEN K, WERBER A, SEIFERT A, *et al.*. Fiber optic tunable probe for endoscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, 10: 044012.
- [5] MEEMON P, LEE K S, MURALI S, *et al.*. Optical design of a dynamic focus catheter for high-resolution endoscopic optical coherence tomography[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2452-2457.
- [6] MIN E J, NA J, RYU S Y, *et al.*. Single-body lensed-fiber scanning probe actuated by magnetic force for optical imaging[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1897-1899.
- [7] SWANSON E, PETERSEN C L, MCNAMARA E, *et al.*. Ultrasmall optical probes, imaging optics, and methods for using same; U. S. Patent 6445939 [P]. 2002.
- [8] REED W A, YAN M F, SCHNITZER M J. Gradient-index fiber-optic microprobes for minimally invasive in vivo low-coherence interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27: 1794-1796.
- [9] JAFRI M S, FARHANG S, TANG R S, *et al.*. Optical coherence tomography in the diagnosis and treatment of neurological disorders [J]. *Biomed. Opt.*, 2005, 10(5): 051603.
- [10] MAO Y X, CHANG SH D, SHERIF SH, *et al.*.

- Graded-index fiber lens proposed for ultrasmall probes used in biomedical imaging[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23):5887-5894.
- [11] MAO Y X, CHANG SH D, FLUERARU C. Fiber lens for ultra-small probes used in optical coherent tomography[J]. *Biomedical Science and Engineering*, 2010, 3: 27-34.
- [12] WANG CH, MAO Y X, YU Y J, *et al.*. Analytical method for designing gradient-index fiber probes[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): 094202.
- [13] 王驰,毕书博,于瀛洁,等. 梯度折射率光纤探针的光学特征参数[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905001.
WANG CH, BI SH B, YU Y J, *et al.*. Optical characteristic parameter of gradient-index fiber probe[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9):0905001. (in Chinese)
- [14] WANG CH, BI SH B, YU Y J, *et al.*. Further analysis of focusing performance of an ultra-small gradient-index fiber probe [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 013106.
- [15] WANG CH, ZHANG F, BI SH B, *et al.*. Fabrication method for ultra-small gradient-index fiber probe [J]. *Advances in Manufacturing*, 2014, 2(4): 327-332.
- [16] WANG CH, MAO Y X, YU Y J, *et al.*. Numerical simulation of gradient-index fibre probe and its properties of light propagation [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(11):114218.
- [17] WANG CH, MAO Y X, YU Y J, *et al.*. Numerical analysis of GRIN lens based miniature probes for optical coherence tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2300-2307.
- [18] 王驰,毕书博,于瀛洁,等. 超小自聚焦光纤探头研究用场迹数值模拟技术[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024217.
WANG CH, BI SH B, YU Y J, *et al.*. Field-tracing based numerical simulation technique for the investigation of ultra-small self-focusing optical fiber probe [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2):024217. (in Chinese)
- [19] WANG CH, BI SH B, YU Y J, *et al.*. Field-tracing modeling of the ultra-small gradient-index fiber probe [J]. *Optik*, 2013, 124: 6437-6443.

作者简介:



王 驰(1982 -),男,河南太康人,博士,副研究员,2004年于河南科技大学获得学士学位,2006年和2009年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事精密测试及仪器等方面的研究工作。E-mail:wangchi@shu.edu.cn

通讯作者:



孙 凡(1994 -),男,浙江金华人,硕士研究生,2014年于上海大学获得学士学位,主要从事 GRIN 透镜的研究。E-mail:shusunfan@163.com