

文章编号: 1001-3806(2003)05-0437-03

微型准直透镜的研究与设计

熊华平 曹明翠

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 自聚焦透镜与多模光纤的折射率分布都遵从平方律分布, 基于这个事实, 进行了以多模光纤生产工艺制造微型准直透镜的研究和设计。结果表明, 该微型准直透镜用作单模光纤准直器, 具有良好的准直性能, 该器件较之自聚焦透镜, 尺寸更小且制造工艺简单。

关键词: 自聚焦透镜; 微型准直透镜; 单模光纤准直器; 多模光纤

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

The research and design of micro-align-lens

Xiong Huaping, Cao Mingcui

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The refractive index profile of gradient-index (GRIN) lens obeys square rule, as same as multimode-fiber. Based on this fact, the research and design of micro-align-lens which is fabricated by means of multimode-fiber fabrication techniques is carried out. Results show that the micro-align-lens has good performance as single-mode-fiber (SMF) collimator. Compared with GRIN lens, it has smaller size and can be fabricated simply.

Key words: gradient-index (GRIN) lens; micro-align-lens; single-mode-fiber (SMF) collimator; multimode fiber

引 言

在波分复用(WDM)技术中,为降低 WDM 器件的插入损耗,必须要用到光纤准直系统,即在输入与接收单模光纤(SMF)的端部放置光纤准直器,对输入进 WDM 器件的光束进行准直,对输出的光束进行聚焦接收,以提高耦合效率^[1]。目前,最为常用的光纤准直器是 1/4 节距的自聚焦透镜(GRIN),其焦点就在端面上,可与 SMF 端面直接粘接,具有易调整对准、易耦合组装的优点,使整个 WDM 器件结构小巧、紧凑、牢固。全世界范围内,只有为数不多的厂家能提供 GRIN 透镜,这给国内的科研及生产带来了一定的困难。因此,作者希望利用国内现有技术开发一种光纤准直器,它能在一定范围发挥 GRIN 透镜的作用,减轻在 WDM 器件的科研与生产中对 GRIN 透镜的依赖。考虑到平方律分布多模光纤中光束传播规律与 GRIN 透镜中一致,且国内具备生产多模光纤的工艺,作者决定利用平方律分布多模光纤的制造工艺生产一种新型微型准直透镜

(以下简称微透镜),代替 GRIN 透镜用来作单模光纤准直器。这种微透镜结构与多模光纤基本一致,其芯径约为多模光纤芯径的(5~7)倍。相对于 GRIN 透镜,它尺寸更小,制造工艺简单,性价比高。

1 微型准直透镜的研究

微透镜与 GRIN 透镜折射率分布同属平方律分布,写为:

$$n(r) = n_0 [1 - (\sqrt{A}r)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中, $\sqrt{A} = \sqrt{2\Delta}/a$ (1/mm) (2) 为自聚焦常数, Δ 为相对折射率差, a 为透镜芯径(对 GRIN 透镜而言,由于没有包层,即为其半径), n_0 为透镜轴线处折射率, r 是距中心轴的径向距离。

由光线理论可推导出平方律分布光纤中近轴子午光线的轴向传播周期 P 为:

$$P = 2\pi / \sqrt{A} \quad (3)$$

这个参数在 GRIN 透镜中被称为节距; GRIN 透镜的光线传输矩阵由下式描述:

$$\begin{bmatrix} r \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}z) & \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \sin(\sqrt{A}z) \\ -n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}z) & \cos(\sqrt{A}z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ t_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

作者简介: 熊华平,男,1979 年 4 月出生。硕士研究生。主要从事光无源器件、光纤通信方面的研究。

收稿日期: 2002-11-18; **收到修改稿日期:** 2002-12-30

式中, $t = n(r) \sin \theta = n \tan \theta$ (5)

是透镜的局部数值孔径。对于一个 $1/4$ 节距 GRIN 透镜, 则有 $\sqrt{A}z = \pi/2$, 这样 $1/4$ 节距 GRIN 透镜光线传输矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} 0 & (n_0 \sqrt{A})^{-1} \\ -n_0 \sqrt{A} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

显然, 微透镜具有与 GRIN 透镜相同的节距和光线传输矩阵表达式。

图 1 所示为 SMF 输出光束经 $1/4$ 节距微透镜准直的传播轨迹, 利用矩阵光学的分析方法和均匀介质中高斯光束的传播规律, 可推导出微透镜的芯径 r 、数值孔径 NA 与其准直距离 L 、节距 P 的关系。

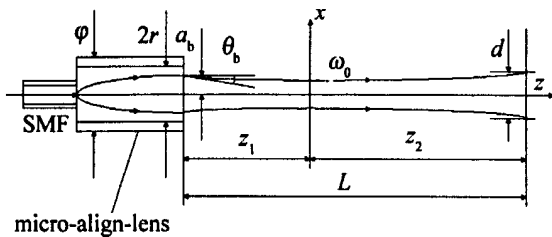


Fig. 1 The transmission path of the SMF output beam collimated by the micro-align-lens (the refractive index of the medium is n)

如图 1, 设 SMF 的纤芯半径为 a_f , 数值孔径为 NA_f , 将光纤置于 $1/4$ 节距微透镜的焦点处 (即端面中心), 由几何光学的知识, 可以认为 SMF 的输出是一个半径为 a_f 、局部数值孔径为 NA_f 的光斑。则由 (6) 式可得:

$$\begin{bmatrix} a_b \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (n_0 \sqrt{A})^{-1} \\ -n_0 \sqrt{A} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_f \\ NA_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, t 为输出光束在微透镜出射端面处与 a_b 相对应的局部数值孔径, 得:

$$a_b = NA_f / (n_0 \sqrt{A}) \quad (8)$$

$$t = -n_0 \sqrt{A} \cdot a_f \quad (9)$$

设透镜输出端面的光束发散角为 θ_b , 与输出端面相接触的均匀介质折射率为 n , 则根据折射定律有:

$$n \cdot \sin \theta_b = t \quad (10)$$

将 (9) 式代入上式得到:

$$\theta_b = \sin^{-1} \left(-\frac{1}{n} a_f n_0 \sqrt{A} \right) \quad (11)$$

SMF 中的基模场分布近似为高斯场分布, 可以认为从微透镜输出的光束是高斯光束, 其在透镜端面的光斑半径就是 a_b , 发散角为 θ_b 。建立如图 1 所示的直角坐标系, 坐标原点在输出高斯光束的束腰处, 设束腰距透镜端面距离为 z_1 , 则根据均匀介质中高斯

场的传播规律^[2], 可以写出以下方程:

$$a_b = \omega_0 \sqrt{1 + z_1^2 / z_0^2} \quad (12)$$

$$\tan \theta_b = \left. \frac{d\omega(z)}{dz} \right|_{z=z_1} = \omega_0 \frac{z_1}{z_0^2 \sqrt{1 + z_1^2 / z_0^2}} \quad (13)$$

式中, $z_0 = \pi \omega_0^2 n / \lambda$ 。解这个二元方程组得:

$$z_1 = \frac{a_b^3 \tan \theta_b}{(\lambda / n\pi)^2 + a_b^2 \tan^2 \theta_b} \quad (14)$$

$$\omega_0^2 = \frac{a_b^2 (\lambda / n\pi)^2}{(\lambda / n\pi)^2 + a_b^2 \tan^2 \theta_b} \quad (15)$$

在光纤准直技术中, 常取输出光斑半径扩大到微透镜芯径的 60%~70% 处的位置与输出端面之间的距离为准直距离 L , 这个定义与高斯光束的瑞利距离 z_R 的定义有所不同, 在文中, 以这个距离作为微透镜的准直距离。设微透镜芯径为 r , 光斑半径扩大到微透镜芯径的 60% 处的位置为 z_2 , 则有:

$$d/2 = \omega_0 \sqrt{1 + z_2^2 / z_0^2} \quad (16)$$

得:

$$z_2 = \frac{n\pi}{\lambda} \omega_0 \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \omega_0^2} \quad (17)$$

则准直距离为:

$$L = z_2 - z_1 = \frac{n\pi}{\lambda} \omega_0 \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \omega_0^2} - \frac{a_b^3 \tan \theta_b}{(\lambda / n\pi)^2 + a_b^2 \tan^2 \theta_b} \quad (18)$$

式中, $d/2 = 60\% r$ 。

节距 P 与折射率分布的关系较为简单。微透镜名义数值孔径 (或最大理论数值孔径) NA 为:

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_r^2} = n_0 \sqrt{2\Delta} \quad (19)$$

式中, n_r 为微透镜包层折射率。结合 (2) 式、(3) 式可得:

$$P = 2\pi n_0 r / NA \quad (20)$$

从上式可以看出 P 与芯径 r 成正比, 与数值孔径 NA 成反比。

2 微型准直透镜的设计与实验结果

由 (15) 式、(18) 式、(20) 式编计算机程序进行计算。设定 $n_0 = 1.5600$ (这是因为拉制微透镜的预制棒其轴线处折射率为 1.5600), $n = 1$, SMF 的参数为 $a_f = 4.5 \mu\text{m}$, $NA_f = 0.1$, 工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。图 2a 和图 2b 分别为 $r = 100 \mu\text{m}$ 时微透镜数值孔径 NA 与微透镜长度 $0.25P$ 及准直距离 L 的关系曲线; 图 3a 图 3b 分别为 $NA = 0.20$ 时微透镜芯径 r

与 $0.25P$ 及 L 的关系曲线。

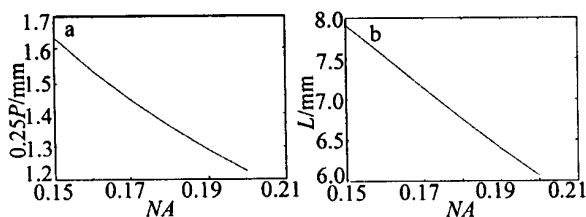


Fig. 2 Relationship between micro-align-lens numerical aperture (NA) and a—the length of $0.25P$ b—the collimating distance L ($r = 100\mu\text{m}$)

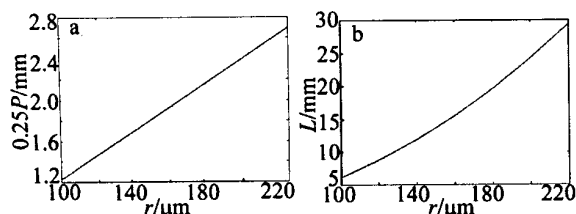


Fig. 3 Relationship between micro-align-lens core-radius r and a—the length of $0.25P$ b—the collimating distance L ($NA = 0.20$)

由图 2 和图 3 可以发现以下规律: (1) 微透镜芯径 r 一定, 随着数值孔径 NA 的增大, 节距 P 与准直距离 L 均减小; (2) 数值孔径 NA 一定, 随着芯径 r 的增大, 节距 P 与准直距离 L 均增大。因此, 要使设计出的微透镜具有适宜的节距长度、较长的准直距离, 应采用大 r 小 NA 的结构。考虑到实际的多模光纤生产工艺, 芯径不可能做的太大, 数值孔径也难以做小, 且小数值孔径的收光能力不如大数值

孔径结构强, 故确定的设计参数为: $r/\phi = 2/5$ (此参数即是拉制微透镜的预制棒外径与芯径之比), $\phi = 480\mu\text{m}$, $NA = 0.20$ 。此微透镜的长度 $0.25P = 2.352\text{mm}$, 准直距离 $L = 22\text{mm}$ 。

按以上设计参数制造微透镜样品, 加工出来的参数分别是: $r/\phi = 2/5$, $\phi = (480 \pm 3)\mu\text{m}$, $NA = 0.201$, $0.25P = (2.35 \pm 1)\text{mm}$ 。

对其准直性能进行实验测试, 结果显示, 在空气中, 工作波长 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时, 该微透镜的准直距离 $L \leq 21\text{mm}$, 这与理论计算值 $L = 22\text{mm}$ 基本吻合。

3 小 结

提出了用平方律分布多模光纤生产工艺拉制微型准直透镜的思想, 进行了理论研究与设计。设计出的微透镜在数值孔径、准直距离等指标上虽然较 GRIN 透镜有较大差距, 但已能满足 WDM 器件的要求, 且其尺寸要小于 GRIN 透镜, 使 WDM 器件结构更加小巧、紧凑; 更重要的是它能利用国内现有技术制造, 使其具有较大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘德明, 向 清, 黄德修. 光纤光学. 北京: 国防工业出版社, 1995: 144.
- [2] 周炳琨, 高以智, 陈家骅 *et al.* 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1983: 69~72.

简 讯

敬告读者

根据“美国工程信息公司 (Ei) 数据库”的要求, 请作者在投稿时注意:

1. 为了方便联系, 请提供确切的通信地址、单位名称、部门、电话、E-mail 等信息。
2. 应加强对摘要的撰写! 摘要是文章的真正概要, 应该全面、简要: 减少背景类的知识介绍; 不要用修饰辞语; 不要有实验数据; 不要出现方程、图、表、参考文献、特殊字符等。作者应组织好文章的主要概念并清楚、简要地表达出来, 才能实现摘要应有的作用, 传达重要的可检索信息。

一般的研究性论文其摘要必须包括被报道的研究项目的目的、使用方法、结果和结论, 不应太短; 也不要重复标题中已给出的内容; 不要使用多余的词语, 如“据报道……”, 或“大量的研究表明”; 摘要中不要写作者将来的打算。

对于文献综述, 只需简要说明文章的内容, 而不报道文章中使用的方法及得出的结果。

对于发展现状综述, 除了陈述文章的主题范围外, 还要给出文章得出的结论。

3. 英文摘要相当重要! 最好是中英文一致。原则是平铺直叙。

4. 英文版稿件中应有中文题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、中图分类号。

投稿时请注意“投稿”字样! 谢谢合作!

《激光技术》编辑部