

重要的光电器件

——自聚焦微透镜及其应用

程科华

(中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710068)

程谦

(四川化工机械厂,成都 610301)

本文介绍了自聚焦概念及自聚焦微透镜的特性,还介绍了应用现况和前景。

自聚焦微透镜是60年代末出现的一种新型光学元件,由于它潜在的应用,已成为光学科学中的一个新热门。

自聚焦微透镜是截取一定长度的自聚焦材料两端磨平抛光而成,不需要加工成凸面或凹面;截取不同长度,可获得不同特性的透镜。它与普通透镜不同之处,在于它的折射率从其中心轴到周界按平方律逐渐地减小。光线在其内是按照“蛇形”的路径传播。

这种透镜已广泛用作微光元件和成像元件等,在光纤通信、复印机、内窥镜、传感器及光电技术中已获得应用,还可望在光计算机和激光打字机中应用。在未来的信息社会中将起重要作用。

在70年代初,我国就开展了研究,现已能小批量生产不同规格几种类型的自聚焦微透镜。

一、自聚焦概念及其特性

通常,这种透镜称为梯度折射率分布透镜或简称为梯折透镜。在商业上,称为自聚焦微透镜或自聚焦棒透镜。

“自聚焦”物理含义是什么?下面引用了几个有关的公式来阐明,详细推导读者可参考有关文献^[1]。

在圆柱坐标系中,求解子午近似下的光线方程,可得

$$Z = \int_c^r \frac{m_0 dr}{\left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 - m_0^2 \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中 n_0 为其中心轴折射率,

$$m_0 = \cos \phi_0 \approx \left. \frac{dZ}{dS} \right|_0,$$

r 是离中心轴距离, n 为 r 处的折射率, Z 为透镜的长度。

已知 n 的函数关系,或者说,已知折射率分布形式,由(1)式就可求出光线的传播规律。

令
$$n = n_0 \operatorname{sech}(\sqrt{A}r), \quad (2)$$

式中 A 为分布常数。将(2)式代入(1)式,可求得

$$\sin \sqrt{A}Z = \frac{m_0 \sinh \sqrt{A}r}{[\cosh^2 \sqrt{A}r - m_0^2]^{1/2}}. \quad (3)$$

(3)式表示,在这种介质中,光线是周期性传播,形象地说,似“蛇形”传播。容易看出,它的周期为 $2k\pi$, 最小正周期 $\sqrt{A}Z = 2\pi$, 所以周期与光线入射位置和角度无关。在 $Z=0$ 处,入射的各种光线经过这种介质后,具有相同周期。

图1(a)表示一束平行光入射,长度 Z 小于 $1/4$ 节距光线的传播。不同高度入射的光线经自聚焦微透镜后光线会聚一点,即具有聚焦现象。图1(b)表示普通球面透镜会聚光线。这种透镜通过两个(或多个)球面上光线的折射会聚光线,光线在其内外均是直线传播,而自聚焦微透镜则是由于其内部折射率变化使光线会聚,光线在其内部是曲线传播,其外部是直线传播。由此可知,所谓自聚焦是指由于其内部折射率变化使光线会聚的现象。

在实际制作的自聚焦材料中,并不是理想

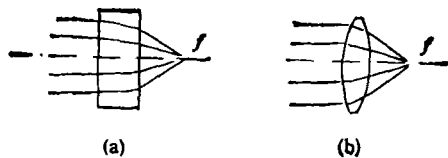


图 1

折射率分布,而是平方律型折射率分布,即

$$n = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} A r^2 \right). \quad (4)$$

(4)式是(2)式级数展开并取前两项的结果。可以证明,在近轴子午近似下,光线的传播方程为

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{A} Z & \frac{1}{\sqrt{A}} \sin \sqrt{A} Z \\ -\sqrt{A} \sin \sqrt{A} Z & \cos \sqrt{A} Z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_0 \\ r_0' \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 r_0' 和 r_0 分别表示入射光线在入射面的折射位置和斜率。

(5)式也是周期函数,周期为 $2k\pi$,最小正周期 $\sqrt{A} Z = 2\pi$ 。也就是说,在近轴子午近似下,这种折射率分布的介质也具有自聚焦作用。而且还可证明,这两种折射率分布代入(1)式获得的解,其误差较小,所以通常用平方律分布代表自聚焦材料的折射率分布。

总的说来,这两种分布都称为自聚焦作用,其区别是一种分布在子午近似下论述;而另一种分布则是在近轴子午近似下论述。

自聚焦微透镜的主要特性由下面公式给出:

1. 焦距 f :

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A} Z}. \quad (6)$$

式中 Z 为长度;

2. 主平面距离 h :

$$h_1 = h_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \operatorname{tg} \left(\frac{\sqrt{A} Z}{2} \right); \quad (7)$$

3. 焦点位置(或工作距离) S :

$$S_1 = S_2 = \frac{c \operatorname{tg} \sqrt{A} Z}{n_0 \sqrt{A}}; \quad (8)$$

4. 像的位置 L_2 :

$$L_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \frac{n_0 L_1 \sqrt{A} + \operatorname{tg}(\sqrt{A} Z)}{n_0 L_1 \sqrt{A} \operatorname{tg} \sqrt{A} Z - 1}; \quad (9)$$

5. 像放大倍数 M :

$$M = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} L_1 \sin(\sqrt{A} Z) - \cos(\sqrt{A} Z)}; \quad (10)$$

6. 物像关系:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{f}; \quad (11)$$

7. 周期长度 p :

$$p = \frac{2\pi}{\sqrt{A}}. \quad (12)$$

由上述公式可知,这种透镜的性能,除周期与透镜长度无关外,其它性能都随长度变化而变化,因此这种透镜的性能可以通过长度来控制。根据这种特性,可以制作弯曲的透镜,而且一端磨成斜面,就可制成观察侧面的透镜。

二、各种长度的光线传播和成像特性

为了应用,必须了解各种长度下光线传播和成像特性。我们就一个周期内的几种长度进行讨论。

1. $0 < Z \leq \frac{p}{4}$ (或者说 $Z \leq \frac{1}{4}$ 节距)

(1) 使平行光聚焦 [图 2(a) 光线 1] 或发散光变平行光 [图 2(a) 光线 2], 这类透镜广泛用于光的聚焦和准直。

(2) 成像特性: 自聚焦微透镜成像作图类似于普通透镜成像作图,选择一平行于光轴的光线 1,它在透镜内按余弦曲线传播,折射光线经过焦点 f 。选择另一通过中心轴光线 2,它在透镜内按正弦曲线传播,折射后与 1 光线的交点即为像的位置 [图 2(b)]。不同点则是这种透镜中的光线是余弦和正弦曲线传播。可以证明,这类透镜的成像,可获得放大倍数 $m < 1$ 或 $m > 1$ 两种类型的倒立实像。当 $Z = \frac{p}{4}$ 时,可使无限远的物体成像在端面,这和普通透镜相

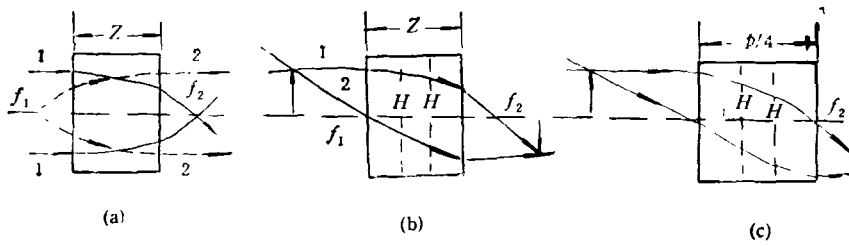


图 2

似,即物距 $L_1 = \infty$, 像距 $L_2 = f$, 成侧立实像。 $Z = \frac{p}{4}$ 时, 焦点 f 在端面[图 2(c)], 因此无限远物体成像在端面, 这是自聚焦微透镜的重要成像特征。

(3) 数值孔径 NA 变换[图 3(a)]: 通过自聚焦微透镜, 实现数值孔径 NA 变换, 这是自聚焦微透镜的又一个特性, 在光纤通信和光纤传感器中, 是常遇到的应用问题。

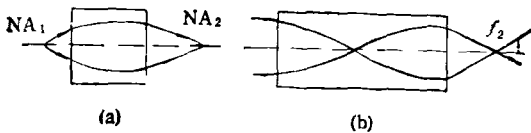


图 3

2. $\frac{p}{4} \leq Z < \frac{p}{2}$

(1) 发散光会聚: 这种透镜不但可将发散光会聚成光束, 而且还可以变换其发散光的数值孔径 NA。通常, 采用 0.29pF 使光源与光纤或光纤与光纤耦合。

(2) 成像特性: 与图 2(c) 类似, 也能在端面形成缩小倒立实像。 $\frac{1}{4}$ 节距是使无限远的物体成像在端面, 而这类长度是使近距离的物体成像在端面。因此, 这类透镜适用于内窥镜作物镜。

3. $Z = \frac{p}{2}$

(1) 平行光变换平行光: 使入射光线和出射光线上下位置变换。

(2) 成像特性: 使端面的物体在另一端面上形成等大倒立实像, 即 $m = -1$ 。

4. $\frac{p}{2} < Z < p$

(1) 平行光聚焦[图 3(b)]。

(2) 成像特性[图 3(b)]: 在端面外形成等大直立实像, 即 $m = 1$ 。这种长度成像还有一个特点, 即适当选择长度获得 1:1 成像, 排列成阵列代替复印机光学系统, 使复印机结构大大缩小, 实现了重大技术革新。

5. $Z = p$

(1) 平行光变换成平行光。

(2) 成像特性: 使端面的物体在另一端面上形成等大直立实像, 即 $m = 1$ 。

通过上述分析, 自聚焦微透镜的光线传播和成像具有许多新颖的特点。基于这些特点, 已开发出许多的应用。

三、应 用

自聚焦微透镜应用在国内受到人们广泛重视, 本文着重介绍一些典型应用。

1. 在光纤通信中的应用^[2]

(1) 光纤连接器^[2]: 它是将两个 $\frac{1}{4}$ 节距的自聚焦微透镜与光纤粘结而成, 第一个透镜将光准直, 第二个透镜聚焦, 其插入损耗约为 2dB。

(2) 光衰减器: 在光纤连接器中再加衰减板便组成光衰减器, 分连续可调和分级可调两种。

(3) 光定向连接器: 它是将一端镀有半透半反层的两只 $\frac{1}{4}$ 节距自聚焦微透镜相互接触

便成光定向连接器，通过一根光纤的两种波长的光分别与两根光纤耦合。

(4) 光开关：它是由自聚焦微透镜和棱镜组成，移动棱镜使光路转换。

(5) 分波复波器：图 4 是成都电子科技大学研制的一种二波段分波复波器的原理图，这种分波复波器能同时双方向传播信息，能降低光纤通信系统成本。

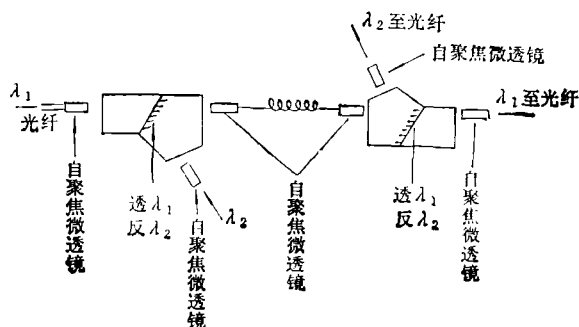


图 4 分波复波器

2. 在内窥镜中的应用

(1) 硬直内窥镜^[3]：它用自聚焦微透镜作物镜、自聚焦微透镜作中继透镜和包层传光束作照明组成的光学系统，如图 5 所示。现已制成长 300mm，插入针直径为 $\phi 1.7\text{mm}$ 的世界上最细的内窥镜。

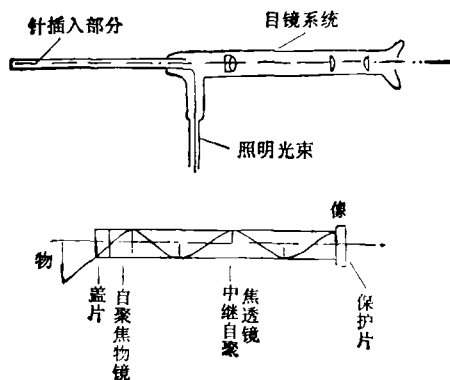


图 5 内窥镜

(2) 可弯曲的内窥镜：将中继透镜换成传像束，就可制成可弯曲的内窥镜。

3. 在光纤传感器中的应用

光纤传感器中应用，有许多情况与光纤通信中应用相似。中国科学院声学研究所采用自聚焦微透镜研制成光栅型光纤水听器。

4. 在复印机中的应用^[4]

将一定长度的自聚焦微透镜排列成两排组成光学系统，称为自聚焦微透镜阵列，分为 6° 、 9° 和 21° 三种；在日本已商品化。

5. 在光电器件中的应用

(1) 清华大学采用自聚焦透镜将 LD 逆光器发散光准直，并用平面镜使光沿路返回，研制成 $1.3\mu\text{m}$ 外腔粘接型窄线宽 InGaAsP 单模半导体激光器；该激光器注入电流后不需调节即可获得窄线宽单模输出。

(2) 像增强器系统中应用^[5](图 6)：采用一端为球面的自聚焦微透镜与透镜组合成光学系统，将屏上的像形成在像增强器阴极上，可减小聚焦误差。

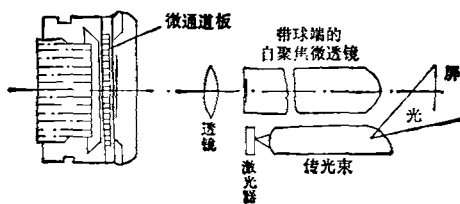


图 6

自聚焦微透镜的应用还在发展中，如光计算机和微型相机等的应用。目前，还发展了一种所谓平面微透镜，使单个透镜的制作变成集成化，即在一片玻璃基板上，一次制成多个透镜。因此，可展望自聚焦微透镜将在许多方面开发新的应用。

- [1] 叶培大等(编著),光波导技术基础理论,人民邮电出版社,(1981).
- [2] 程科华,光纤通信, No. 5(1982), 15.
- [3] D. C. Lemer et al., *Appl. Opt.*, 22-3(1983),383.
- [4] James D. Rees and William Lama, *Appl. Opt.*, 19-7(1980), 1068.
- [5] Illes P. Csocba, *Appl. Opt.*, 19-7(1980), 1137.