

现象作了精密的测量,发现各种临界指数确实与平均场理论的预言一致。

远离平衡的突变现象与平衡态相变之间如此深刻的类比决不是偶然的。虽然失稳现象中没有平衡分布的概念,但只要有细致平衡,就可以在相当普遍的前提下证明存在定态分布,引入相应的势函数,其作用与自由能类似。换言之,细致平衡是共性的原因。

上面主要讲了与平衡相变相似的一面。其实,矛盾的特殊性才使我们事物有更深刻的认识。远离平衡的突变现象必然伴随着耗散,与体系的尺寸和历史有密切关系。这些都与平衡态相变完全不同。尺寸效应可能使远离平衡的现象中不会有真正的“连续相变”。

平衡态附近的相变研究已经初具轮廓,远离平衡突变现象的研究方兴未艾,不同的流派从各自的角度进行探索,取了各种名称。有的叫“耗散结构”<sup>[24]</sup>,有的叫“协同学”<sup>[25]</sup>,有的叫“突变论”<sup>[26]</sup>,实际研究的都是同类现象(还可参阅文献[27])。

## 十二、结束语

连续相变研究的进展是理论与实验相互促进的过程。统计模型的严格解证明了理论的潜力,在平均场理论的天地里打开了缺口,大量使用计算机的级数展开揭示了更多的矛盾,但决定性的因素还是精密的实验测量。它充分暴露了平均场理论的弱点,把尖锐的矛盾提到理论面前。标度律和普适性的概念在促成现代相变理论的过程中起了很重要的作用。建立了正确的物理图象,形成了反映客观的概念,豁然贯通的最后一击来自统计物理与量子场论在概念和方法上的相互交流。

五十年代末期,量子场论方法在统计物理中的广泛应用带来过一批丰硕成果。最初在铁磁,后来在超导理论中形成的对称破缺概念,经过量子场论的锤炼,又回到统计物理中,对平衡和非平衡相变的研究起了促进作用。重正化群方法和相变物理图象的结合,促成了临界现象理论的突破。当前,不少作者又试图借助相变的概念来解释夸克禁闭和量子场论中的一些根本问题。理论形式的一致,反映了客观世界的统一。统计物理和量子场论都是研究无穷多自由度的体系,统计涨落和量子涨落有深刻的类似之处。涨落场论和量子场论这对“孪生兄弟”将会继续并肩前进,在相变和临界现象的研究中揭示更深刻的物理内容。

## 参 考 文 献

- [18] 陈春先、郝柏林,科学通报,10(1961),30.
- [19] J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless, in *Progress in Low Temperature Physics*, ed. by D. F. Brewer, North-Holland, VIIB(1978), 341—433
- [20] D. J. Bishop, J. D. Reppy, *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978), 1727.
- [21] B. B. Mandelbrot, *Fractals, Form, Chance and Dimension*, W. H. Freeman, San Francisco, 1977.
- [22] P. C. Hohenberg, B. I. Halperin, *Revs. Mod. Phys.*, **49**(1977), 435.
- [23] C. Normand, Y. Pomeau, M. G. Velarde, *Revs. Mod. Phys.*, **49**(1977), 581.
- [24] G. Nicolis, I. Prigogine, *Self-organization in Non-equilibrium systems*, Wiley-Interscience, (1977).
- [25] H. Haken, *Synergetics*, Springer-Verlag, (1977)
- [26] R. Thom, *Stabilité Structurelle et Morphogénèse*, Benjamin, (1972).
- [27] *Proceedings, of the XVII International Solvay Conference on Physics, November 20—23, 1978, Wiley-Interscience.*

# 一种聚焦的光学纤维透镜

殷宗敏 祝颂来 陈尧生

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

在本世纪六十年代末期,国际上出现了一种聚焦的光学纤维<sup>[1,2]</sup>,命名为自聚焦纤维(Selfoc),它和普通的光学纤维结构不同,没有外套层,它的折射率分布自轴沿半径方向逐渐变小,所以它的传光原理也不是光的全反射。这种纤维的传光效率高,能够聚光、成像,类似于光学系统的透镜。透镜是用改变厚度的方法来改变光程,使传播的光线曲折,而自聚焦纤维则是用改变折射率的方法来改变光程,同样使传播的光线曲折(图1),这两种结构不同的光学元件都能使物象之

间的对应点达到等光程,所以它们的作用是基本相同的。

## 一、光线在纤维中的轨迹

自聚焦纤维的折射率分布遵从如下关系:

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

式中  $n_0$  是轴上折射率,  $A$  是折射率分布常数,  $r$  是纤

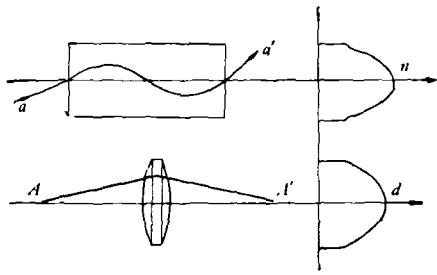


图1 自聚焦纤维和透镜

维上某点至轴的距离。

设轴向为  $z$ ,  $r$  向为  $x$ , 则在  $x-z$  平面内光线方程为

$$n \frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\partial n}{\partial z} \cdot \frac{dx}{dz} \quad (2)$$

假设  $n$  和  $z$  无关, 而  $1/2 Ax^2 \ll 1$ , 故得  $x-z$  平面内的近轴光线方程为

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = -Ax \quad (3)$$

该方程的通解为

$$x = B \cos \sqrt{A}z + C \sin \sqrt{A}z \quad (4)$$

$$p = dx/dz = -B\sqrt{A} \sin \sqrt{A}z + C\sqrt{A} \cos \sqrt{A}z \quad (5)$$

设入射光线在纤维端面 ( $z=0$  处) 相对于轴上的入射位置为  $x=x_0$ , 而它折射至纤维内的斜率为  $dx/dz=p_0$ , 则得系数  $B=x_0$ ,  $C=p_0/\sqrt{A}$ , 故(4)和(5)式可写为

$$x = x_0 \cos \sqrt{A}z + p_0/\sqrt{A} \sin \sqrt{A}z \quad (6)$$

$$p = -x_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A}z + p_0 \cos \sqrt{A}z \quad (7)$$

轨迹方程(6)也可写为

$$x = D \sin(\sqrt{A}z + \phi) \quad (8)$$

式中  $D = (x_0^2 + p_0^2/A)^{1/2}$ ,  $\tan \phi = x_0 \sqrt{A}/p_0$ , 所以在自聚焦纤维中, 光线轨迹通常是一个初相不为零的正弦曲线(图2)。

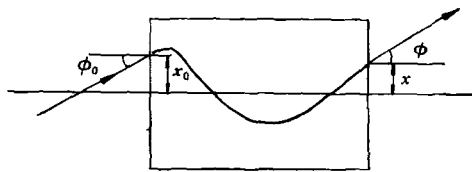


图2 子午光线在纤维中的轨迹

根据方程(6)和(7), 可以写成矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} x \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{A}z & \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \sin \sqrt{A}z \\ -n_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A}z & \cos \sqrt{A}z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ p_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

这就是光线的轨迹表达式, 表示当入射光线的位置  $x_0$

和斜率  $p_0$  已知时, 就能通过计算而求得出射光线的位置  $x$  和斜率  $p$ 。

设自聚焦纤维最大半径为  $R$ , 轴上和边缘折射率之差为  $\Delta n$ , 则由(1)式可得

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0 A R^2 \quad (10)$$

当光线在轴上入射, 且又是最大的人射角时, 振幅必定为  $R$ , 则由公式(6)可知

$$r = p_0/\sqrt{A} \sin \sqrt{A}z = R \sin \sqrt{A}z \quad (11)$$

故有  $p_0 = \sqrt{A}R = \tan \theta = \sqrt{\frac{2\Delta n}{n_0}}$  (12)

即为  $\sin \theta = \sqrt{\frac{2\Delta n}{n_0 + 2\Delta n}}$

所以  $\sin \phi = n_0 \sqrt{\frac{2\Delta n}{n_0 + 2\Delta n}} = \sqrt{2n_0 \Delta n}$  (13)

故光线轨迹的周期长度  $l$  可写为

$$l = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} = \sqrt{2} \pi R \sqrt{\frac{n_0}{\Delta n}} \quad (14)$$

对于空间光线, 它在纤维中的轨迹不在一个平面内, 所以不是正弦曲线, 而是一条空间的螺旋曲线, 如图3所示。

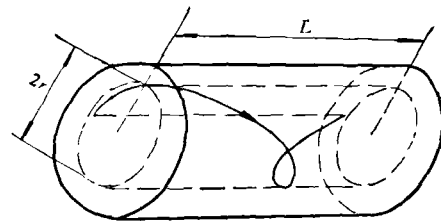


图3 空间光线在纤维中的轨迹

自聚焦纤维的两端直径不一样, 如图4所示。有关系式

$$r = r_1 - kz \quad (15)$$

式中

$$k = \frac{r_1 - r_2}{z_0}$$

$r$  是垂直于轴的任一横截面的半径,  $r_1$  和  $r_2$  分别为粗端和细端的半径,  $z_0$  为纤维的长度。这种纤维称为锥形自聚焦纤维<sup>[3]</sup>。由于它的半径各处不一样, 所以它的折射率变化为

$$n = n_0 \left[ 1 - \frac{1}{2} A \frac{r^2}{\left(1 - k \frac{z}{r_1}\right)^2} \right] \quad (16)$$

同样, 我们可以求解光线方程而得到光线在锥形自聚焦纤维中的轨迹为

$$x = x_0 \sqrt{1 - kz/r_1} \cos \left[ \sqrt{A} \frac{r_1}{k} \ln \left( 1 - k \frac{z}{r_1} \right) \right] - \frac{p_0}{\sqrt{A}} \sqrt{1 - kz/r_1} \sin \left[ \sqrt{A} \frac{r_1}{k} \ln \left( 1 - k \frac{z}{r_1} \right) \right], \quad (17)$$

$$p = \frac{dx}{dz} = \frac{x_0 \sqrt{A}}{\sqrt{1 - kz/r_1}} \sin \left[ \sqrt{A} \frac{r_1}{k} \ln \left( 1 - k \frac{z}{r_1} \right) \right] + \frac{p_0}{\sqrt{1 - kz/r_1}} \cos \left[ \sqrt{A} \frac{r_1}{k} \ln \left( 1 - k \frac{z}{r_1} \right) \right]. \quad (18)$$

显然,在上式中,若令  $k \rightarrow 0$ , 即  $r_1 = r_2$  时,利用关系式  $\frac{1}{k} \ln \left( 1 - k \frac{z}{r_1} \right) \rightarrow -\frac{z}{r_1}$ , 仍可得到柱形自聚焦纤维的轨迹方程(6)和(7)。

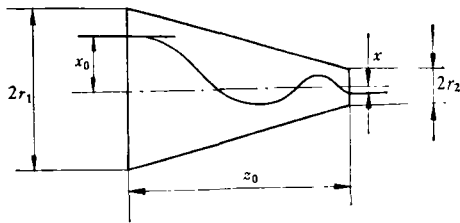


图4 锥形自聚焦纤维

## 二、成像特性

已知  $n_0$ ,  $z$ ,  $A$  三个参数,完全可以求出高斯象面的各基点位置。设目标位于纤维入射端前  $L_0$  处,其高为  $x_0$ , 如图5所示。为了简便起见,目标一端位于纤维轴上。考虑三条光线入射,一条沿纤维轴进入纤维后方向不变,一直沿轴出射,第二条  $a$  光线平行于纤维轴,其入射位置为  $x_0$ , 斜率为 0, 第三条  $b$  光线和轴成一定角度,入射位置  $x_0 = 0$ , 斜率为  $\text{tg}\theta_0 = -x_0/L_0$ , 而进入纤维后  $\text{tg}\theta_0 = -x_0/n_0 L_0$ 。如求得  $a, b$  光线出射处的斜率和位移,则就能得到光线  $a, b$  在象方的交点,确定像的位置。

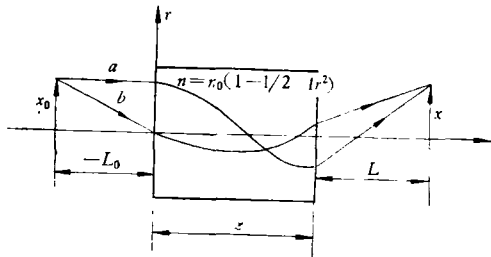


图5 自聚焦透镜的成像原理

根据光线的轨迹方程,  $a$  光线出射后的直线方程为

$$(n_0 x_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A} z) l + x = x_0 \cos \sqrt{A} z. \quad (19)$$

物理

同样  $b$  光线出射后的直线方程为

$$\left( \frac{x_0}{L_0} \cos \sqrt{A} z \right) l + x = -\frac{x_0}{n_0 L_0 \sqrt{A}} \sin \sqrt{A} z, \quad (20)$$

式中  $L$  和  $x$  即为象距和像高。联立方程(15)和(16)可得

$$L = \frac{l}{n_0 \sqrt{A}} \left( \frac{n_0 L_0 \sqrt{A} \cos \sqrt{A} z + \sin \sqrt{A} z}{n_0 L_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A} z - \cos \sqrt{A} z} \right), \quad (21)$$

$$x = -\frac{x_0}{n_0 \sqrt{A} L_0 \sin \sqrt{A} z - \cos \sqrt{A} z}. \quad (22)$$

由此可得像的横向放大率  $m$  为

$$m = \frac{x}{x_0} = \frac{(-1)}{n_0 \sqrt{A} L_0 \sin \sqrt{A} z - \cos \sqrt{A} z}. \quad (23)$$

在物象公式中所用的正负号和普通透镜系统相同,  $L > 0$  为实象,  $L < 0$  为虚像,  $m > 0$  为正立象,  $m < 0$  为倒立象,  $|m| > 1$  为放大象,  $|m| < 1$  为缩小象。这样我们就能从这些基本公式讨论在各种长度  $z$  的情况下的成象特性。

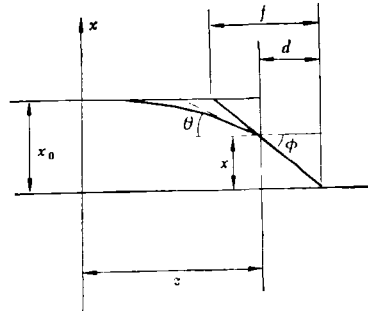


图6 焦点位置的确定

同样,焦点位置可以求出。设自聚焦纤维长度为  $z$ , 当光线平行于轴入射时,位置为  $x_0$ , 斜率为 0, 见图6。当光线经过纤维传递后,其出射光线与轴线交于一点,该点即为焦点。同样我们把焦点到主点的距离称为焦距。考虑近轴光线,并设纤维置于空气中,这时

$$\text{tg}\phi = n_0 \text{tg}\theta,$$

$$\text{即有} \quad \text{tg}\phi = n_0 x_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A} z. \quad (24)$$

这样就求得焦点到出射端面的距离  $d$ , 这就是焦点位置,

$$d = \frac{x}{\text{tg}\phi} = \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \text{ctg} \sqrt{A} z. \quad (25)$$

同样可求得焦距  $f(f_1 = -f_2$ , 符号 1, 2 分别代表前、后焦距):

$$f = \frac{x_0}{\text{tg}\phi} = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \sin \sqrt{A} z}. \quad (26)$$

如果把物距  $L_0$  和象距  $L$  均化成以主点为基准的  $L'_0$  和  $L'$  的表达式,则可得到和透镜相同的物象关系式(即高斯公式),

$$\frac{1}{L'} - \frac{1}{L'_0} = \frac{1}{f_1} \quad (27)$$

如果设前焦点  $f_1$  到物的距离为  $S_1$ , 后焦点  $f_2$  到象的距离为  $S_2$ , 则同样可得到以焦点为基准的物象关系式(即牛顿公式),

$$S_1 \cdot S_2 = f_1 \cdot f_2 \quad (28)$$

### 三、纤维透镜的应用

聚焦的光学纤维透镜有玻璃的和塑料的两种类型。用聚合扩散技术制作的塑料聚焦纤维发展也较快<sup>[4]</sup>, 但目前应用较多的还是玻璃聚焦纤维, 它通常由含铈玻璃纤维在硝酸钾盐池中进行离子交换而制得。

聚焦的光学纤维在光通信中有着重要的应用, 它不仅是光波传输的一种理想介质, 而且也是光波耦合的有用元件, 光通信中的应用我们不作赘述, 这里我们讨论聚焦纤维在光学系统中的应用。普通的光学纤维只能传光, 当把它们排列组合成集合体(束或面板)时, 这样组成的元件才能够传递图象, 而不能成像。但是聚焦的光学纤维单根就能成像, 这是它的一个显著特点。

自聚焦纤维透镜和普通球面透镜比较起来也有着许多独特的优点<sup>[5]</sup>, 它的直径可以做得很小, 焦距又很短, 比同类的球面透镜制作工艺简单, 对一定直径的细的自聚焦纤维透镜还是柔软可弯的。由于这种自聚焦纤维提供了小型的微透镜, 故而又为集成光路创造了一种良好的元件。

下面看几个应用的例子。

小直径的医用硬式探针: 它是用细直径(如1毫米左右)和大视角(如60度)的自聚焦纤维作为物镜, 用自聚焦纤维棒来传输, 这种探针的直径可以很细, 可以用作观察关节、皮下组织等等。

可弯曲的小型内窥镜: 它同样是用自聚焦纤维作物镜, 直径可大可小, 按需要配合。传输是用纤维传象束, 所以可弯曲使用。

如果把自聚焦纤维切短排列制作成纤维面板, 也就成一种聚焦的网格板。通过网格板后一个物体目标可以成多个图象, 即每根纤维成一个象, 如图7<sup>1)</sup>所示。我国光学专家龚祖同先生提出用锥形自聚焦纤维来做网格板<sup>[6]</sup>, 以此来制作网格高速摄影机, 可获得510亿次/秒( $5.1 \times 10^{10}$  幅/秒)的拍摄频率。此外, 自聚焦

纤维在微型相机和仿生学的复眼研究中也有重要的作用。

随着自聚焦纤维透镜用途的不断增加, 对它的要求也越来越高, 所以进一步提高纤维的质量是很有意义的。

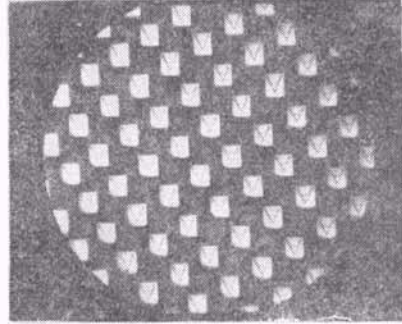


图7 聚焦纤维网格板的成象

1. 制取大直径的自聚焦纤维棒(如10毫米), 这样不仅可以作大的纤维透镜, 而且主要可以用这种棒直接来控制较长的自聚焦纤维。

2. 制作具有不同视角的自聚焦纤维透镜, 以适合各种不同的需要。通常用改变玻璃成份和化学侵蚀纤维表面的办法来达到这个要求。

3. 为了提高纤维透镜的光学性质一致性, 要求材料高度均匀, 并且有严格的工艺流程。

4. 为了减小目前含铈玻璃纤维透镜的色差, 要选取其它合适的材料, 如氧化铯( $\text{Cs}_2\text{O}$ )玻璃和塑料等等。

总之, 聚焦光学纤维的出现为光学上增添了新的一页。

### 参 考 文 献

- [1] T. Uchida et al., *IEEE J.*, **QE-5-6**(1969), 331.
- [2] A. D. Pearson et al., *Appl. Phys. Lett.*, **15-2**(1969), 76.
- [3] Hideo Kita et al., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **54-7**(1971), 321.
- [4] Y. Ohtsuka, *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 247.
- [5] T. Uchida et al., *IEEE J.*, **QE-6-10**(1970), 606.
- [6] 龚祖同等, 全国高速摄影会议论文集, 科学出版社, 1978.

1) 相片为董新意同志所摄。