

## 纤维光学导论

殷宗敏

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

纤维光学是一门新兴的学科,是近代光学领域中的一个重要分支,它是研究在透明的光学纤维中光线和图象传输的科学。光学纤维通常是一种带套层的圆柱形透明细丝,可由玻璃、石英、塑料等材料在高温下拉制而成。光学纤维的出现,给人们提供了一种类似于电缆线一样的柔软的光导管,而光线和图象就沿着这种弯曲的导管从一端传送到另一端。

利用这种细长纤维导管来传送光线和图象,实际上并不是新的概念。早先,希腊的吹玻璃工人在工作中就看到光线在弯道中透过的现象,并且他们还利用这种现象制作成装饰用的玻璃器具。在1854年,英国的廷德尔(J. Tyndall)在皇家学会的一次讲演中说,光线能够沿着盛水的弯曲管道进行全反射而传播<sup>[1]</sup>。以后,他又用实验观察并证实了这个想法。实验装置如图1所示。当一个炭弧光源发光时,就能清楚地看到光沿着器皿侧边小孔流出的弯曲水柱而传播,光是在水和空气的界面上进行全反射。由于条件的限制,当时没有进行深入的研究。直到1927年英国的贝尔德(J. L. Baird)首先

提出,利用光的全反射现象制成的石英纤维可以解析图象,并且发表了两次专利<sup>[2]</sup>。1929年美国的豪塞尔(C. W. Hausell)进一步进行试验,想把石英纤维用在电视上来剖析图象<sup>[3]</sup>。1930年德国的拉姆(H. Lamm)提出,把能弯曲的纤维集合成束,以此来传送光学图象<sup>[4]</sup>。他把 $40\mu\text{m}$ 直径的石英纤维有规则的排列起来,想利用这种元件做肠胃检查镜。由于材料质量低,工艺水平不高,所以效果不理想。尽管如此,但他们还是在一定距离内初步观察到了所传送的光线和图象。同期在英、美等国也有类似的试验,但进展都不大。因此,在这以后的二十年间,用纤维来传输光线和图象的设想和实验结果没有得到实际应用。

有关光学纤维大量的研究工作开始于1951年,荷兰的范赫尔(A. C. S. Van Hell)和英国的霍普金斯(H. H. Hopkins),卡帕尼(N. S. Kapany)在两处分别进行独立的工作,主要的精力都放在制作柔软的纤维镜上。他们曾经采用 $10\mu\text{m}$ 的细纤维捆扎成束,想以此来得到清晰的图象,但由于漏光和排列问题没有解决,所以试验没有达到预期的效果。到1953年,范赫尔用一种折射率为1.47的塑料涂在玻璃纤维上,组成比玻璃纤维芯折射率低的套层<sup>[5]</sup>,这种套层不仅形成光的全反射条件,而且还起了保护纤维芯的作用。这样就制得了光学绝缘的单根纤维,推动了工作的进展。但是由于塑料套层不够均匀,每次在内界面全反射时,由吸收和散射引起的光损失很大,所以效果还是不够理想,应用受到了限制。1955年美国的希斯威威

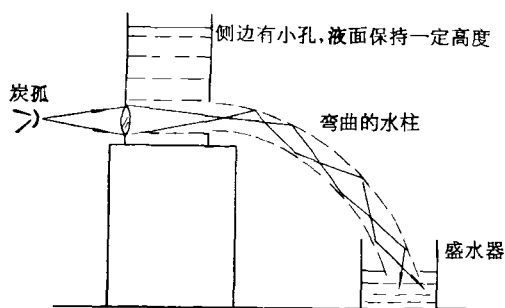


图1 廷德尔实验示意装置

策(B. I. Hisschowitz)提出用玻璃套层代替塑料套层<sup>[6]</sup>。他把高折射率的玻璃棒插在低折射率的玻璃管中,放在高温炉中拉制成套层玻璃纤维,这样就得到了较完美的光学绝缘的纤维,为用棒管法拉制光学纤维的工艺打下了一个良好的基础。

在1954年,美国的考特尼普拉特(J. S. Courtney-pratt)提出用截短的光学纤维制成熔融面板,可以作为电子束管的屏板使用,但由于当时不能制造这种高分辨率的光学纤维元件,故这仅是一个设想。1958年由当时已经在美国的卡帕尼提出了复合纤维的工艺<sup>[7]</sup>,也就是先拉出粗纤维,把它们排列成纤维棒,然后再拉制一次,就得到这种复合纤维。由于复合纤维中的单纤维直径小,所以可制得高分辨率的面板,以后他们改进工艺,在纤维上再涂加吸收套层,减少杂散光的影响,提高象质,使纤维面板达到了实际使用的水平。因此,在1960年国际市场上就出现了应用光学纤维面板的产品。

在1954年,卡帕尼也曾用 $50\mu\text{m}$ 的纤维排列起来,以此来制作可弯曲的纤维传象束。这是在以前实验基础上的改进,结果分辨率达到 $4\text{lp/mm}$ 。以后几年,提高不大,分辨率总是在 $5\text{lp/mm}$ 左右。一方面是由于没有高质量的光学绝缘纤维,另一方面是因为要使细而长的纤维有规则地排列起来,确实是件十分困难的事。直到1960年美国首先从排列等工艺技术上解决了这个问题,制出了可弯曲的分辨率较高的传象束,并且应用于医疗仪器中<sup>[8]</sup>,同时开始进入商品阶段。在此期间,日本、苏联、英国、法国、西德等国也相继开展了这方面的工作。1957年制成闪烁发光纤维<sup>[9]</sup>,1961年用含钹玻璃制成了激光纤维<sup>[10]</sup>,1961—1962年出现了红外和紫外纤维的各种元件<sup>[11]</sup>等,这样由卡帕尼在1956年命名的纤维光学这一门新学科形成了。

随着纤维光学理论的建立、材料的逐步解决和制作纤维的工艺水平的逐步完善,在六十年代纤维光学元件得到了很大的发展,并在各方面有着很大的应用<sup>[12]</sup>。重要的一种是用于潜望镜和内窥镜系统。这种纤维光学潜望或内窥

镜在工业上可以深入人眼所观察不到或有损于人体健康的地方,深入危险和黑暗的区域。系统的结构简单,由探头(物镜)、纤维传象束和观察器(目镜)组成,有的还附加于照明观察区域的纤维传光束。在国防上可以制成各种坦克、飞机和舰艇上的潜望镜,安装使用比较方便。在医学上可以制作用于胃肠、食道、子宫等内腔部位进行检查和诊断的各类医用内窥镜。如果记有大功率激光传输的光学纤维,还能进行内腔激光治疗。

另一种是利用纤维弯曲的特性制成的各种图象变换器。光学纤维元件的两端可做成各种形状,如圆形、环形和矩形等,还可以一股分成多股。这种元件可以改变图形或光源的形状,可以解决光源到接收器之间复杂通道的传输问题。在光电自动控制和记录等方面用处很大,国际上这种元件的使用较为广泛。

还有一种是硬式的纤维光学面板。它是用热熔方法把排列起来的复合纤维压制而成。它有传递图象、移动象面的特性,并耐真空,可作为电子束管的端窗和极间耦合元件。它对于改进器件的性能和简化器件的结构十分有效。因此在象增器、变象管和微光摄像上纤维面板得到了较为广泛的应用,促进了夜视仪的发展。

在六十年代初期,正当国际上纤维光学开始发展的时候,我国光学专家龚祖同先生及时抓住了这一学科的动向,在他的建议和具体指导下,中国科学院、建筑材料研究院和北京地区等有关单位开始了这一研究工作。多年来在党的领导下,我国的纤维光学事业从无到有,由简到繁,发展较快,取得了不少的成绩。纤维光学元件已经从实验室走向工厂,一批采用纤维光学技术革新成果也已取得,在自动轧钢定标、光电验布、传真、空压机气阀试验等方面受到了各级部门的表扬。各种医用内窥镜也相继试制成功,特别是纤维胃镜和纤维子宫镜已经进行小批量生产。还有用于电子束管的耐真空的纤维面板也试制成功,等等。这些都说明了纤维光学已经在我国的国民经济中越来越发挥了作用。

随着激光技术的发展,激光通信得到了足够的重视。由于激光大气通信的局限性和光学内腔镜管道通信系统的复杂,就促使人们设想用一种理想的介质来传输激光而有效的进行通信。1966年英国标准电信公司的华人高锟博士明确地提出用光学纤维来完成这个任务<sup>[3]</sup>。虽然当时光学纤维的损耗高达1000dB/km以上,但他们认为只要能改进制作纤维的原材料和工艺,使纯度提高,这是大有可能的(为此,以后高锟获得了国际伊利申通信奖奖金,1979年5月由瑞典国王颁发)。这个问题的提出引起了当时国际上有关方面的密切注意,相继在美国、日本、英国、西德等国都开展了这方面的研究,这样纤维光学就进入了通信纤维的研究阶段。

在光学纤维中通常是用几何光学的全反射原理来解释光的传播现象。只要满足全反射条件的光线,也就是在纤维内壁上 $90^\circ$ 至临界角范围内的入射光线都认为可以传播的,因为普通光学纤维的直径比波长大得多,光波中由于大量的各种类型振动的叠加,所以单个振动的性质就不突出,用几何光学方法处理也就足够了。当纤维的直径变细到和光的波长相当时,则光的波动性质就明显了。这样在纤维内壁上能够传播的不是 $90^\circ$ 到临界角范围内的所有角度,而只是某些特征角。这些特征角的每一个相对应于一种能够传导的光波,也就是一种模。因为只有这些完全确定电磁场的空间和时间分布的模才能在纤维中存在,这些模才满足光波传播的波动方程和纤维的边界条件。从能量角度来看,一种模表示一种特定的光强分布,如纤维出射端面的光斑图案。我们可以想象,这些模是由均匀的平面波构成,该平面波的波法线(即光线)和纤维内壁构成这些特征角。这个概念可以这样来说明,如果光波要在纤维中传播,则根据波动的性质应具有如下条件(图2):

$$\cos \alpha = \frac{\lambda}{2dn_1} \cdot m, \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 必须满足纤维内壁的全反射公式,即有

$$\sin \alpha \geq \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

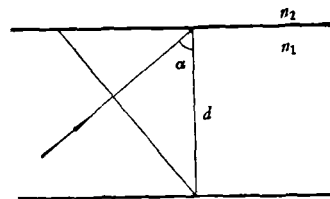


图2 特征角的表示

式中 $d$ 为纤维的直径, $n_1$ 和 $n_2$ 分别为纤维芯和纤维套层的折射率, $\lambda$ 为光波波长, $m$ 为零或正整数。由(1)式和(2)式合并后化简可得

$$m \leq \frac{2d(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}}{\lambda}. \quad (3)$$

从这个公式可看出,当纤维的直径 $d \gg \lambda$ 时, $m$ 值可以有多个,这样可传播的特征角也有很多。随着 $d$ 的变小, $m$ 的取值也将减小,当 $n_1$ 和 $n_2$ 的差值很小时,而 $d$ 和 $\lambda$ 相当时,则 $m$ 有可能只取一个值,这也就是单模传播的条件。

由于不同的 $m$ 值对应着不同的 $\alpha$ 角,所以相邻的两个 $\alpha$ 角的关系就是 $m$ 值改变1时的两角余弦之差,即

$$\cos \alpha_{m+1} - \cos \alpha_m = \frac{\lambda}{2dn_1}, \quad (4)$$

说明每两个相邻 $\alpha$ 角之间的余弦值是一定的。当 $d \gg \lambda$ 时,由(4)式可知 $\cos \alpha$ 值变化很小,所以可认为 $\alpha$ 角是连续变化,只要满足全反射条件的光线均能传播;当 $d \sim \lambda$ 时,从公式显然可看出 $\cos \alpha$ 值变化很大,而应为一系列分立的值,所以 $\alpha$ 角不连续,而是某些特征角,也就是说沿纤维传播的只是具有某些模的光波。

光学纤维中光波模的概念开始只是理论问题的研究,但是由于通信纤维的发展却使这个概念变得十分重要起来。因为通信纤维有多模纤维和单模纤维之分,而普通的光学纤维实际上就是一种套层多模纤维。多模纤维直径大,注入能量多,但是多模纤维的群延迟大,致使通过纤维的光脉冲信号展宽,降低了传输的速率,直接影响信息容量。单模纤维的直径小,芯和套层的折射率也小,没有模之间的延时差,只有单模的色散,所以信息容量大。但由于纤维直径很小,不仅制作工艺比较复杂,而且光能量的注

人和耦合也困难。因此多数的研究先开始于多模纤维。

关于光波模的延迟问题，我们同样可以用上述的特征角来说明。光波单色波的相速度为

$$v_{\text{相}} = \omega/k = \frac{c \sin \alpha}{n_1},$$

光波的群速度  $v_{\text{群}} = d\omega/dk$ ，考虑到光学纤维的色散存在，用微分法可求得

$$\frac{1}{v_{\text{群}}} = \frac{1}{c \sin \alpha} \left[ n_1 + \omega \frac{\partial n_1}{\partial \omega} \right], \quad (5)$$

式中  $\omega$  为光波频率， $k$  为波矢。当光通过长度为  $L$  的纤维时，其特征角为  $\alpha$  的模的传播时间  $t$  为

$$t = \frac{Ln_1}{c \sin \alpha} \left[ 1 + \frac{\omega}{n_1} \frac{\partial n_1}{\partial \omega} \right], \quad (6)$$

因而特征角为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  模的群延迟为

$$\begin{aligned} \Delta t = & \frac{Ln_1}{c} \left( \frac{1}{\sin \alpha_1} - \frac{1}{\sin \alpha_2} \right) \\ & + \frac{Ln_1}{c} \left[ \frac{\partial n_1}{\partial \omega} \cdot \frac{1}{n_1} \left( \frac{\omega_1}{\sin \alpha_1} - \frac{\omega_2}{\sin \alpha_2} \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

上式中右边第一项是模间延迟，其值为几十个 ns。第二项是模的色散延迟，其值为几十个 ps。从公式中显然可看出，在单模纤维时 ( $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 90^\circ$ )，第一项为零，只需考虑第二项，因此得到前面所分析的结论。

通信纤维的发展是相当迅速的。在 1968 年日本的两家公司联合宣布制成了一种新型的无套层的纤维<sup>[14]</sup>，能够聚光和成象，称为聚焦纤维 (selfoc)。光线在纤维中不是全反射传播，没有全反射的光损失，所以透过率高。同时这种纤维由于特定的折射率分布致使模间延迟小，所以信息容量也高于套层的多模纤维。但要作为长距离通信使用，要在纤维剖面处处保持一定的折射率分布，损耗降得很低，不仅工艺复杂，实际上也是相当困难的。同期在英国制得了一种液体纤维<sup>[15]</sup>，它是利用石英毛细管充以高透明的液体(如四氯化硅等)组成。由于液体容易提纯，因此光损耗可以降低。但毛细管充液困难，尤其是长距离的通信纤维，所以实际应用不

多。尽管这样，但从事这两种纤维的研究工作者都致力于解决这些困难。美国这几年是在材料上下功夫，美国的康宁公司在 1970 年用高纯石英首次制得了损耗为 20dB/km 的套层多模纤维<sup>[16]</sup>，使纤维用于光通信的研究工作前进了一大步。

关于光学纤维的损耗来源有多种，如材料的吸收损耗，由纤维尺寸变化引起的波导损耗，还有瑞利散射和受激拉曼散射等引起的损耗，但最主要的还是吸收损耗。因此降低它的一个有效途径就是提高制作纤维材料的纯度，减少和去除材料中的吸光物质和一些杂质元素，如 OH 根离子，Fe, Co, Cu, Mn 等元素。从提高材料纯度这个角度看，单组分材料比多组分的材料有利，因此目前用纯石英材料来制作通信纤维较为普遍。国际上利用化学的气相沉积方法 (C. V. D.) 制取纯石英预制棒，然后再拉制成所需要的纤维，这是十分有效的。

光学纤维的损耗并不是在所有波长处都相同，而是有着显著的差别。硅系材料制作的纤维损耗如图 3 所示。在某些波长处损耗较低，称为光波窗口。通常光学通信也正是在这些光学窗口进行，这是利用光学纤维在此处低损耗的特性。

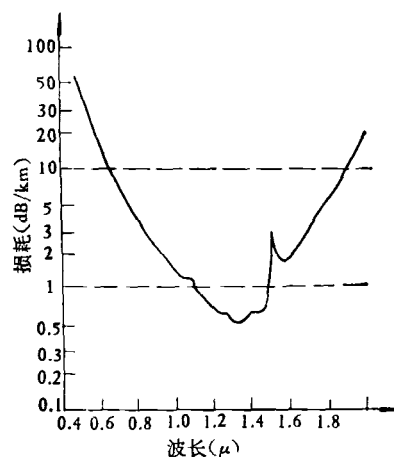


图 3 硅系玻璃纤维的损耗曲线

这里提一下表示纤维光损耗的质量指标分贝，它是用 dB 来表示，是个负值，定义为

$10 \log \frac{I}{I_0}$ , 式中  $I$  和  $I_0$  分别为纤维的出射端和入射端的光通量, 通常纤维的长度计量取为 km.

在 1970 年以后的几年时间, 通信纤维不但

在光能损耗机理、模传输的特性以及脉冲展宽等理论问题取得了很大的进展, 而且在制作纤维的工艺技术上也是突飞猛进. 光学纤维类型增多(图4), 损耗直线下降, 已经到了理论的极限值附近. 1976 年日本首先制得了波长在  $1.2 \mu\text{m}$  处

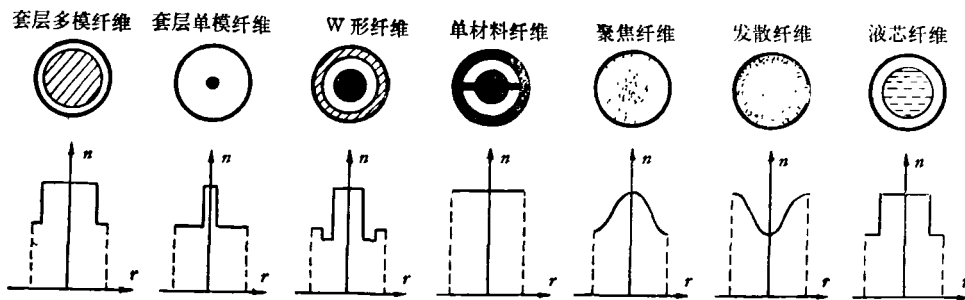


图 4 光学纤维的种类及其折射率分布

损耗为  $0.47 \text{ dB/km}$  的套层多模纤维. 他们用化学气相沉积法制得的石英纤维, 在最佳波长处损耗一般均可低于  $2 \text{ dB/km}$ , 而聚焦型的纤维损耗也是在  $10 \text{ dB/km}$  左右<sup>[17]</sup>. 相应的在美国、英国、法国、西德等国也均已制得了损耗低于  $1 \text{ dB/km}$  的光学纤维, 一般的水平也都在  $5 \sim 10 \text{ dB/km}$  之间<sup>[18]</sup>. 美国还研究了一种用于传输红外波长激光的纤维, 用溴化铊初步得到这种卤化物纤维在波长  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  处的损耗只有  $0.01 \text{ dB/km}$ <sup>[19]</sup>.

通信纤维另一个重要的参数指标是传输速率, 也就是信息容量问题, 是纤维传输光波群延迟的具体表现. 从理论上说, 光学纤维通信的容量是高于任何的无线电通信的容量. 但目前通信纤维多数是多模的, 由于受到模间时间延迟的限制, 传输速率一般还不太高, 其值为几十个 Mb/s 至近百个 Mb/s. 西德的一家公司已制成  $1200 \text{ Mb/s}$  的光学纤维传输网试验系统, 用来传输电视图象、电话和数据信号等, 这个装置的信息容量已经超过同轴电缆载波通信容量, 目前达到了较高的水平. 同期间, 日本还制造了一种 W 形纤维<sup>[27]</sup>, 它是为了兼顾纤维的低损耗、频带宽度和制作工艺几方面而设计的. 这种 W 形纤维是双套层结构, 是在套层纤维的芯和套层之间加进一个折射率比套层还低的中间层而组成. 光损耗只有  $5 \text{ dB/km}$  左右, 而对传

输速率, 多模的可达  $500 \text{ Mb/s}$ , 单模的则为几千个 Mb/s.

由于光学纤维通信容量大, 不易受电磁干扰, 保密性好, 可靠, 设备重量轻, 作为制取纤维的原材料  $\text{SiO}_2$  资源十分丰富, 所以光学纤维通信目前已成为国际上一个“热门”的课题. 近年来已有一百多条光学纤维通信系统在世界各地进行试验或正式运行开通, 以美国和日本为最多. 1977 年美国在两个电话局间架设  $2.4 \text{ km}$  的现场试验系统, 1978 年日本在两地电话局间架设长达  $20 \text{ km}$  的现场试验系统, 开通使用都是很好的. 更长距离的通信试验, 各种军用通信装置, 电子计算机网络系统以及城市光学纤维通信化的设想正在逐步实现. 发展的趋向正是用光缆逐步代替电缆. 这些都说明了纤维传输激光实现通信已经成为事实.

我国在通信纤维方面的发展也是十分迅速的, 在短短的几年中, 低损耗的套层多模纤维在上海、武汉、北京等地都已制得, 特别是在 1979 年的 5 月, 武汉邮电科学研究院在有关单位的支持帮助下, 首次取得了距离为  $4.7 \text{ km}$  光学纤维通信联试系统的成功. 该系统能开通 120 路电话, 传送电视、图片, 书写电话、文字数据, 用于传真电报, 效果良好, 误码率极低. 上海和北京等地也相继建立了类似的光学纤维通信系统, 有的已经交付邮电部门使用. 这不仅表明

我国在通信技术方面有了重大进展,同时也显示了我国的纤维光学发展到了一个新阶段。

从国际上看,今后通信纤维的发展趋向是环绕着提高信息容量方面的有关理论和技术问题进行深入研究,对单模纤维和能够进行连续性生产的多组分纤维以及传输近红外波段的纤维进行研究,使光学通信真正发挥它的巨大信息容量的特点而付于实用。

纤维光学发展中的另一个重要课题是变折射率光学纤维的研究。它除了在光通信中的一些特殊应用外(如用聚焦型纤维作传输和耦合光波等),而主要在光学成象方面显示了它的强大生命力。所谓变折射率光学纤维,就是在垂直于纤维轴的横截面上折射率自轴沿半径方向有一定规律的分布,有的在轴向也有变化规律。其中最典型的是聚焦纤维和发散纤维,其折射率分布分别为

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

和

$$n = n_0 \left( 1 + \frac{1}{2} A r^2 \right),$$

式中 $n_0$ 是轴上折射率, $A$ 是特性常数, $r$ 是纤维上某点至轴的距离。这两种纤维折射率在轴向没有变化,聚焦纤维就是前面所提到的,光线在纤维中的轨迹是正弦函数形式,而发散纤维中光线的轨迹则是双曲函数形式。这两种纤维和光学系统中的透镜相比较,对光线的作用有着相似之处。透镜是用改变透镜厚度的方法来改变光程,使光线曲折,而这类纤维则是用改变纤维折射率大小的方法来改变光程,使光线曲折。所以这两种纤维能够和透镜一样聚光或散光,能够成象,同样具有焦点、物象关系、线放大率等一系列的计算公式,因而我们把这种能成象的纤维称为变折射率纤维透镜。

变折射率纤维采用的材料,除了用含铈、铉等光学玻璃外,在普通透光塑料纤维的基础上还发展了塑料变折射率纤维<sup>[20]</sup>。这种纤维在很多方面都具有独特的优点,如不易破裂、重量

轻、容易调节特性常数和色散等。在一定程度上,它的制作工艺颇为简单。

变折射率光学纤维可以根据具体需要象光学设计一样来进行折射率分布的设计,从而减小象差以适合使用。目前国内外变折射率纤维大多采用离子交换的方法来制作。这种纤维代替了普通透镜的玻璃冷加工,对微型元件可以说是一个革命,有着很广阔的前途。它不仅可作各种针形窥镜、微型光学仪器和相机,同时又为集成光学上提供了一种良好的元件。它还可以在一些需要弯曲传象的场合下使用,以配合其它的光学元件。如果把这种纤维排列起来制成网格蝇眼板,使一个目标呈现多个图象,对光的成象和仿生学等研究都有很大的促进作用,在信息处理等方面也有很大的用途。

可以预计,随着科学事业的不断发展,纤维光学将在八十年代到达它的全盛时期。

### 参 考 文 献

- [1] J. Tyndall, *Proc. Roy. Inst.*, 1(1854), 446.
- [2] J. L. Baird, *Brit. Appl.*, 20969/27, *Brit. Pat.*, 285738, (1927).
- [3] C. W. Hansell, *U.S. Pat.*, 175/584, (1930).
- [4] H. Lamm, *Z. Instrumentenk.*, 50(1930), 579.
- [5] A. C. S. Van Heel, *Nature*, 173(1954), 39.
- [6] B. I. Hirschowitz et al., *Gastroenterology*, 35(1958), 50.
- [7] N. S. Карану, *J. O. S. A.*, 49-7 (1959), 779.
- [8] J. H. Hett, L. E. Curtiss, *J. O. S. A.*, 51-5 (1961), 581.
- [9] О. В. Савченко, *Приборы и Техника Эксперимента*, 4 (1959), 142.
- [10] E. Snitzer, *J. Appl. Phys.*, 32-1 (1961), 36.
- [11] R. R. Standel, R. E. Hendrickson, *Infrared Phys.*, 3-4 (1963), 223.
- [12] М. П. Лисица и др., *Волоконная Оптика*, Издательство Техника, Киев, 1968.
- [13] A. G. Chynoweth, *Physics Today*, 29-5 (1976), 28.
- [14] T. Uchida et al, *IEEE J.*, QE-5-6 (1969), 331.
- [15] *National Electro. Rev.*, 8-3 (1972), 73.
- [16] J. N. Kessier, *Electronics*, 44-14 (1971), 46.
- [17] T. Nakahara, H. Yanai, *Fiber and Integ. Opt.*, 1-1 (1977), 3.
- [18] L. L. Campbell, *Fiber and Integ. Opt.*, 1-1 (1977), 21.
- [19] *Electronics*, 50-19 (1977), 43.
- [20] Y. Ohtsuka, *Appl. Phys. Lett.*, 23(1973), 247.