



光导纤维

[日] 长尾和美 著
邮电532厂技术情报室 译

光 导 纤 维

〔日〕长尾和美著

邮电532厂技术情报室译

人 民 邮 电 出 版 社

光学ファイバー (1974年版)

〔日〕长尾和美著

内 容 提 要

光导纤维是近代技术光学的一个重要分支，目前在光通信的实用方面发展很快。

本书在理论上，比较系统地分析光导纤维的传光、传象性能和物理、化学性质等基本知识。介绍了光导纤维的制造工艺及其制品在各个生产领域里的实际应用。它可供光导纤维研究、制造、使用部门的工人、技术人员及一般科技工作者参考。

光 导 纤 维

〔日〕长尾和美著

邮电532厂技术情报室译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 1980年8月第一版

印张：6 12/32 页数：102 1980年8月天津第一次印刷

字数：144 千字 印数：1—5,400册

统一书号：15045·总2403-有5170

定价：0.52元

出 版 说 明

光导纤维是近代技术光学的一个重要分支。光导纤维在本世纪六十年代的前五年属于研制发展阶段，后五年属于应用推广阶段。目前，它正处在实用光通信的第三阶段。

本书对光导纤维作了比较系统的介绍。其中，第一章综述光导纤维的发展过程与现状；第二章从理论上分析光导纤维的传光、传象性能和物理、化学性质，并介绍了各种特殊光导纤维；第三章概述光导纤维的制造工艺；第四章介绍各种光导纤维制品及其在光学仪器、电子光学、通信设备、医疗器械、科学实验和工业生产等各个方面的实际应用。

本书可供光导纤维研究、制造、使用部门的工人和技术人员、其它有关工作人员以及一般科技工作者参考。

本书是由邮电五三二厂技术情报室翻译，先后由中国科学院西安光学精密机械研究所戴学让，邮电部科学技术情报研究所刘凤珍及邮电部北京设计所杨震中等同志审校。

一九七九年十一月

目 录

第一章 光导纤维的历史背景及其现状	1
一、发展过程	1
二、现状	2
第二章 光导纤维的理论分析	5
一、光学性质	5
1. 传光性能	5
a. 全反射与菲涅耳反射 (5) b. 子午光线的分析 (8) c. 斜光线的分析 (20) d. 纤维的出射光特性 (23) e. 波动光学的应用 (29)	
2. 传象性能	33
a. 分辨率 (34) b. ISA与EMA (37) c. 静态扫描法与动态扫描法 (39) d. 光斑 (47) e. 测试装置 (48) f. 组合件的分辨率 (50) g. 数值孔径 (50) h. 其它 (51)	
3. 特殊纤维	52
a. 波导 (52) b. 有源纤维 (56) c. 自聚焦纤维 (59) d. 紫外线纤维与红外线纤维 (62)	
二、物理性质	65
1. 机械性能	65
a. 弯曲性 (65) b. 抗张强度 (67) c. 硬度 (68)	
2. 热性能	69
a. 耐热性 (69) b. 热膨胀系数 (69) c. 封装 (71)	
3. 其它性能	73
a. 耐电压性 (73) b. 真空气密性 (74)	
三、化学性质	75
1. 耐水性	75
2. 耐酸性	76

3.其它性能	77
--------------	----

第三章 光导纤维的制造原理79

一、玻璃纤维79

1.进料方法79

a.坩锅法 (79) b.棒管法 (82) c.复丝法 (84)

2.拉丝方法86

a.鼓轮卷绕法 (86) b.双轮牵压法及其它 (87)

3.纤维元件的制造方法87

a.传光束 (87) b.导光缆 (88) c.套料导光棒 (88)
 d.传象束 (89) e.纤维板与传象管 (92) f.微通道板 (95)
 g.其它 (95)

4.原料96

a.芯料 (96) b.涂层料 (100) c.吸收体 (101)

二、其它材料的光导纤维102

1.塑料纤维102

a.丙烯系列的塑料纤维 (102) b.苯乙烯系列的塑料纤维 (103)

2.紫外线光导纤维104

3.红外线光导纤维105

4.其它纤维107

a.自聚焦纤维 (107) b.波导纤维 (108) c.天然纤维 (108)

第四章 光导纤维的制品及其应用110

一、传光束110

1.一般性能110

a.传光束的光学特性 (112) b.耐热性与耐寒性 (115) c.耐药性 (115)
 d.最小曲率半径 (116) e.用途 (116)

2.传光束的应用117

a.穿孔卡读出装置 (117) b.符号读出器 (119) c.医用光导纤维 (122)
 d.汽车用导光缆 (124) e.装饰性光导纤维 (128)
 f.外形变换器 (129) g.复印机 (130) h.声电变换器 (131)
 i.测距探头 (132) j.心内压测量探针 (133) k.导光笔 (134)

- l.在高压电气设备上的应用 (134) m.显示装置 (135) n.售货机 (136)

二、传象束.....136

- 1.一般性能.....136
 - a.传象束 (136) b.纤维镜的结构 (145)
- 2.医用内窥镜.....148
 - a.胃用内窥镜 (148) b.其它医用内窥镜 (151)
- 3.工业用内窥镜.....155
 - a.一般用途 (155) b.眼控照相机及其它 (157) c.广播用纤维镜 (160)

三、纤维板.....162

- 1.一般性能.....162
 - a.纤维直径 (162) b.数值孔径 ($N \cdot A$) (163) c.透过率 (164) d.吸收体 (165) e.真空气密性 (166) f.纤维板尺寸 (166) g.荧光物质与光电物质 (167) h.热膨胀系数 (168) i.缺陷 (168)
- 2.在阴极射线管上的应用.....170
 - a.线扫描型记录管 (172) b.发信用阴极射线管 (174) c.平面扫描型记录管 (175) d.其它记录方式中的应用 (177)
- 3.在摄像管上的应用.....178
 - a.象加强器 (179) b.在摄像管其它方面的应用 (182)
- 4.在其它方面的应用.....184
- 5.传象器.....186

四、微通道板.....187

- 1.通道式光电倍增器.....188
- 2.微通道板.....189

第一章 光导纤维的历史背景及其现状

一、发展过程

“光可在透明体内传导”这种日常现象,究竟是在什么时候发现的,现在已难查考。早在公元前一世纪,巴勒斯坦人就用小块色玻璃拼凑人像,后来,在意大利等地发展成为一种镶嵌工艺,作为花瓶之类的表面装饰¹⁾。十九世纪前后发展起来的精致玻璃镇纸也属于同一技术系统。这些可以看作是复合光导纤维的萌芽。

最早的相关文献是英国人丁达尔 (J·Tyndall) 于1854年在英国皇家研究所发表了光沿着从水管喷射出来的水柱折射前进的情况。

二十世纪以来,英国人拜尔德 (J·L·Baird) 和美国人汉瑟尔 (C·W·Hansell) 分别于1926年和1927年申请有关可挠透明纤维束的专利²⁾。1930年,德国人拉姆 (H·Lamm) 提出为观察胃部进行图象传输的设想。

直到本世纪五十年代,光导纤维才开始具有一定的形态。首先是荷兰人范希尔 (Van Heel) 于1953年在荷兰的杂志和自然杂志 (《Nature》) 上发表文章,论述涂层纤维的用途。第二年,美国的欧勃兰 (O'Brien) 申请有关这方面的专利³⁾。同时美国人霍普金斯 (H·H·Hopkins) 与卡帕尼 (N·S·Kapany) 发表了利用传象束传送图象的报告⁴⁾。1955年,范希尔与勃劳伟 (W·Brouwer) 发表了利用纤维束分解和再现文字的报告⁵⁾。

这些创造性的工作几乎都是在美国进行的。到1958年，美国至少有五个研究组织从事光导纤维的研究，而其它国家基本上没有开展实质性的活动。

进入六十年代以后，美国发现光导纤维具有军事应用价值，于是，在军方的支持下，逐步奠定了工业生产的基础。英国、德国、苏联、日本等国家也随后相继开展这方面的研制工作。日本在医用内窥镜方面达到了世界性商品的生产水平，但有些产品仍需购买美国专利。

二、现 状

1. 制造光导纤维的工厂

美国发展光导纤维最早，目前专业工厂有46家。其中，可挠性细传光束可应用于电子计算机，适合于小型企业生产，1965年以后发展很快，厂家最多。

除少数工厂用塑料生产光导纤维外，其它绝大部分工厂都在生产玻璃光导纤维及其组合制品。

2. 光导纤维的分类

目前，光导纤维制品的种类繁多，而且新产品不断涌现。但就光导纤维本身分类，品种并不太多。例如：从材料性质分类，有玻璃纤维及塑料纤维两大类；从形状分类，有可挠性纤维与不可挠性纤维两大类；从性能分类，有传光纤维与传象纤维两大类。当然也可按制造加工工艺的不同来分类。本书按过去惯用的产品分类方法，归纳为如表1·1所示的几种。

表1·1

光导纤维的种类

分 类	细 目	特 征	材 料	外 型 尺 寸			技术 难度	应 用 领 域
				纤维直径 (μ)	最大断面 (mm)	长度 (m)		
传光束		可挠 传光	玻璃	20~75	(15 ϕ)	6	易	照明、装饰
			塑料	100~1500	(15 ϕ)	6		
导光缆		可挠 传光 价格低	玻璃	40, 50	< 3 ϕ	∞	中	照明、车辆
			塑料	100~1500	< 3 ϕ	∞		
光导纤维制品		传光 分路等	玻璃 (塑料)	20~100	—	—	中	穿孔卡、符号读出器、传真收、发信机
套料导 光棒		传光、 刚体	玻璃 (塑料)	1000~ 10000	20	3	易	传光
传象束	积层型	可挠、 传象	玻璃	9~20	11 $\times$ 11 (25 $\times$ 25)	4	难	医用及工业 用内窥镜、廉 价内窥镜
	溶出型		玻璃	($\leq$ 20)	(10 $\times$ 10) ($<$ 2)		中	
纤维板		块状、 传象	玻璃	3~50	150 $\times$ 150 或450 $\times$ 20	25×10^{-3}	难	摄象管、印刷管
传象管		传象、 刚体	玻璃	5~60	10 $\times$ 10	3	中	画面的翻 转、放大和缩 小
其它	自聚焦 纤维 波导	折射率 连续分 布、 高透过 率	玻璃	100~5000	$\leq$ 10	∞	难	光通信、传 象光通信
			石英、 玻璃	100~200		∞	难	

参 考 文 献

- 1) A.C. Revi : The Glass Ind. 328~330, 344 (1957)
- 2) U.S. P. 1751584
- 3) U.S. P. 2825260
- 4) H.H. Hopkins, Kapany : Nature 173, 39~41 (1954)
- 5) W. Brouwer & A.C.S. Van Heel : Optica Acta 2, 49~50 (1955)

第二章 光导纤维的理论分析

一、光 学 性 质

1. 传 光 性 能

分析光导纤维的光学性质时，可按下述两种情况进行说明：

(1) 纤维直径远远大于波长；

(2) 纤维直径与波长相接近。

第一种情况，射入光导纤维的光线大体上可用几何光学原理进行分析。而第二种情况则不然。除了要用几何光学原理分析外，还得应用波动光学原理。这里主要分析第一种情况的子午光线(meridional ray)和斜光线(skew ray)，并论及一些特殊形状的光导纤维。

a. 全反射与非涅耳反射^{1、2)}

研究光导纤维的基础是全反射。这可以用从电磁学理论引申出来的斯乃尔法则(Snell's law)进行说明。

光线射入两种均匀的各向同性的媒质时，通过两种媒质的界面（如界面为光学平面时）而发生的折射，符合下列公式。

$$n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sin \phi_1 \quad (2 \cdot 1)$$

假如界面两侧媒质的折射率分别为 n_0 和 n_1 ，且 $n_0 > n_1$ ，则光线折射的形态如图2·1所示。

图2·1(a)中，光线的入射角 ϕ_0 较小，由媒质 n_0 到媒质 n_1 的

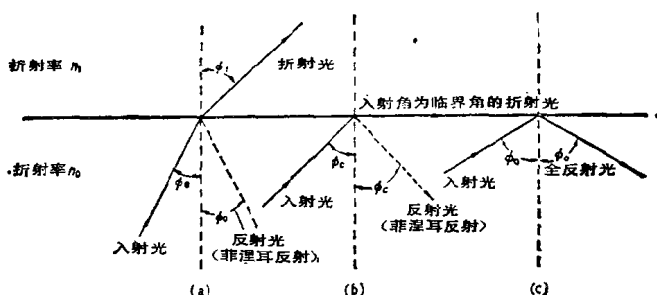


图 2.1 光线折射的形态

折射角 ϕ_1 满足斯乃尔法则。如逐步加大入射角 ϕ_0 ，到某个数值 ϕ_c 时，折射光就会沿着界面传播，如图2.1(b)所示。这时的入射角 $\phi_0 = \phi_c$ ，称为临界角。按照斯乃尔法则， $\sin \phi_1 = 1$ 。如再继续增大入射角 ϕ_0 ，按照斯乃尔法则， $\sin \phi_1$ 就应大于1，而这样的 ϕ_1 是不存在的。这就是说，在 $\phi_0 > \phi_c$ 时，没有折射，只有反射，如图2.1(c)所示。这种反射称为全反射。

从几何光学的角度分析，严格讲，全反射之后光的总能量应和入射时光的总能量相等。入射光的入射角大于临界角时，不应当有能量散失到折射率低的媒质中去。

但是，实际上，如在媒质 n_1 内设置吸收体，再实测全反射后的能量的话，就能发现，全反射的反射率是达不到100%的。这说明有折射至低折射率媒质的光波瞬间流散。这种光波流散与光的传播方向及界面距离有关，并随之有所增减。这种现象不能用几何光学解释清楚。所流散的光波称为流散波(evanescent wave)。这个问题，以后再进行说明。

图2.1(c)为全反射。不过，在图2.1(a)，(b)两种情况下，除折射外，也会产生少量的反射。在折射率不同的两种媒质的界面上产生的反射，称为菲涅耳反射(Fresnell reflecti-

on)。

现在要分析一下入射面(由入射光与界面法线组成的平面)和垂直于入射面的平面,并且要研究一下这两个平面内的偏光分量。对入射面内的偏光分量来说,当入射光、反射光和折射光的振幅分别为 E_P 、 R_P 和 D_P 时,应有下列关系式:

$$\frac{R_P}{E_P} = \frac{\tan(\phi_0 - \phi_1)}{\tan(\phi_0 + \phi_1)},$$
$$\frac{D_P}{E_P} = \frac{2\cos\phi_0\sin\phi_1}{\sin(\phi_0 + \phi_1)\cos(\phi_0 - \phi_1)} \quad (2.2)$$

式中, ϕ_0 为入射角, ϕ_1 为折射角。

对于垂直于入射面的平面内的偏光分量来说,应有下列关系式:

$$\frac{R_S}{E_S} = \frac{\sin(\phi_0 - \phi_1)}{\sin(\phi_0 + \phi_1)},$$
$$\frac{D_S}{E_S} = \frac{2\cos\phi_0\sin\phi_1}{\sin(\phi_0 + \phi_1)} \quad (2.3)$$

R_S 和 R_P 称为菲涅耳反射量。

如果是垂直入射($\phi_0 = \phi_1 = 0$), 上述两式就没有任何差别。当两种媒质的折射率分别为 n_1 和 n_0 时, 若入射光的强度为 1, 则反射光的强度可由下式给出:

$$\frac{R}{E} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2.4)$$

在 $n_0 = 1.5$ 和 $n_1 = 1.0$ 的情况下, 即光线从空气射入玻璃等媒质时, 菲涅耳反射率的计算值如图2.2所示。入射角为 0° 时①, 菲涅耳反射率约为4%。

注①: 原著为 90° , 似有错, 现已改正。——校注

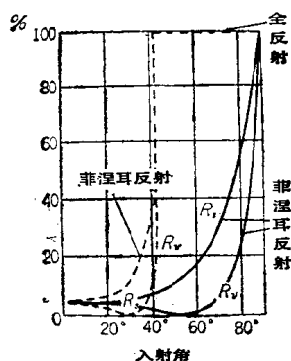


图 2.2 反射率 (实线为从空气射入玻璃时的菲涅耳反射率, 虚线为从玻璃射入空气时的菲涅耳反射率)

b. 子午光线的分析³⁻⁵⁾

(1) 圆柱形纤维

光导纤维, 大多数是属于圆柱形的。现在分析一下从光源射入圆柱形纤维的光线在纤维内部是怎样传播和衰减的。图 2.3 所示, 为一条笔直的圆柱形涂层纤维, 它的两个端面均为平面。当光线射入纤维的一个端面并与圆柱的轴线成 θ 角时, 根据斯乃尔法则, 在纤维内部折射成 θ_0 角, 然后再以 ϕ_0 角入射至芯料折射率为 n_0 的侧壁。这时应有 $\phi_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0$ 。

若涂层料的折射率为 n_1 , 而且, ϕ_0 大于芯料和涂层料的临界角 ϕ_c , 即:

$$\phi_0 \geq \phi_c = \sin^{-1} \frac{n_1}{n_0} \quad (2.5)$$

这时, 射入的光线在界面上应产生全反射, 并在纤维内部以同样角度 (与圆柱轴线的夹角) 反复逐次反射, 向前传播到圆柱的另一端面, 以等于入射角的同样角度发射出去。

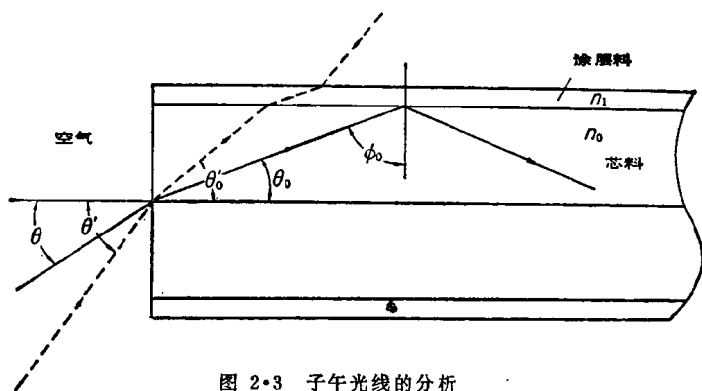


图 2·3 子午光线的分析

图2·3的虚线部分表示光的入射角 θ' 过大，不能满足临界角 ϕ_0 的要求。这时，光会穿透圆柱的侧壁而逸出。即使有少量的菲涅耳反射能使少量的光返回纤维内部，但经多次菲涅耳反射后，能量已大致接近于零，不会有通过纤维传播出去的光。因此，射入圆柱形纤维的光，只能在一定的角度范围以内，才能传输至另一端面。超过这个角度，入射的光就会穿透纤维的侧壁而散失。这个容许的最大入射角可由下列各式求出。根据临界角的定义，有：

$$\sin \phi_c = \frac{n_1}{n_0} \quad (2 \cdot 6)$$

再按照斯乃尔法则，有：

$$n \sin \theta = n_0 \sin \theta_0$$

式中， n 为纤维所处环境的外部折射率。一般为空气折射率 ($n = 1.0$)。

通过上述两式的变换，可得：

$$n \sin \theta = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = N \cdot A \cdot \quad (2 \cdot 7)$$

式中， θ 为纤维的受光角。这时的 $n \sin \theta$ 称为纤维的数值孔径 ($N \cdot A \cdot$) (Numerical Aperture)。

(2·7)式是根据子午光线从理论上推算出来的,并不适应于

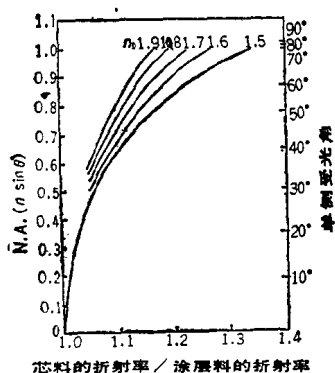


图 2·4 $N \cdot A$ 值与折射率比值的关系

斜光线。这个数值是一般产品说明书上常用的受光角指标。从(2·7)式可知, $N \cdot A$ 值全是由芯料和涂层料的折射率之差决定的。这个差值越大, 纤维的 $N \cdot A$ 值就越大, 即: 纤维的受光角就越大。当 $N \cdot A \geq 1$ 时, 如将此纤维置于空气中, 即使受光角超过 90° , 所有能射到纤维端面的光线也都能经由纤维内部传播到另一端面。

图2·4显示出采用折射率不同的芯料时, 改变芯料与涂层料的折射率比值(n_0/n_1), 而引起的受光角的相应变化。一般的纤维, 两侧的受光角大都在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间。在选用玻璃和塑料芯料和涂层料时, $N \cdot A$ 值是一个重要的根据。

当子午光线沿着空气中的直圆柱形纤维传播时, 光路长度可用下式算出:

$$P(\theta) = \frac{L}{[1 - (\sin\theta/n_0)^2]^{\frac{1}{2}}} = L \sec\theta_0 \quad (2 \cdot 8)$$

式中, $P(\theta)$ 是受光角为 θ 时的光路长度, L 是纤维长度。从(2·8)式可知, 光路长度与纤维直径无关, 只取决于纤维的入射角、芯料的折射率和纤维长度。

光在纤维内部传播时, 因材料的吸收作用而产生的衰减, 要考虑到上述的光路长度, 并可用下式给出:

$$\tau(\theta, \alpha) = \exp \left\{ \frac{-\alpha L}{[1 - (\sin\theta/n_0)^2]^{1/2}} \right\}$$