

光纤通信系统

〔英〕C. P. 森特巴克 编著

科学普及出版社

73.4014
663

光纤通信系统

C·P·森特巴克 编著

梁振兴 译

肖笃埤 校



科学普及出版社

8710270

内 容 提 要

本书介绍了光纤通信系统的研究、设计和使用中可能遇到的各种问题。从基本原理开始,叙述了光纤的制造、光在光纤中的传播、光纤通信用半导体激光器和检测器等。特别对光纤的设计、连接、测试技术、系统设计等实用性较强的内容作了详细说明并且介绍了140兆比/秒的现场演示系统。

本书附有大量实验数据,可供通信系统的研究、制造和使用部门的技术人员和有关大专中技院校师生参考。

Optical Fibre Communication Systems

Edited by C.P.Sandbank

光 纤 通 信 系 统

梁振兴 译

肖笃埤 校

责任编辑:成全

封面设计:马明扬

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米^{1/32} 印张: $10\frac{3}{4}$ 字数: 241千字

1986年2月第1版 1986年2月第1次印刷

印数: 1—3,050册

定价: 1.40元

统一书号: 15051·1113

本社书号: 0851

0021/06

译者说明

光纤通信是利用光纤对光的导行作用来传递信息的，它具有生产成本低、传送质量高、耐腐蚀，防干扰，易维修，防窃听、用途广等优点。光学纤维不受电磁及震动干扰，不象普通电话那样安装很多中继器。光缆很轻，用8根光纤组成的光缆，每公里只有60公斤，而含有同样数量的电话线的普通电缆，每公里则有4吨重。因此，在铺设方面也比普通电缆省力。正因为如此，世界各工业先进国家，都大力发展光纤通信技术。目前，这一技术已从实验室研究逐步进入工业生产实用阶段。例如，在英国已经和正在铺设的光纤电缆有3450公里，计划在八十年代末期，英国全国通信电路的一半将由光纤电缆取代。如果说，光纤传输损耗的迅速下降孕育着光子时代的幼芽，那么光缆通信系统的实际应用就标志着光子时代的到来。

本书系统地介绍了光纤通信系统研究、设计和使用中可能会遇到的各种问题。第一、二章叙述光纤通信的基本原理（略去理论分析一段）和光在光纤波导中的传播；第三、四、五、六章讨论光纤波导的制造、光缆的设计和连接及测试技术；第七、八章介绍光纤通信用的半导体激光器和检测器；第九章研究光纤通信系统的设计；第十、十一章综述光纤通信系统的可能应用及140兆比/秒的现场演示系统。

本书的作者都是专家。自光纤通信系统提出之日起，他们就在一起工作，研究光纤通信系统的有关问题，积累了相当多的实际经验。编写本书时各自负责其最熟悉的一章，因此内容丰富，深入浅出，图文并茂，是一本中级科技读物。

在翻译过程中，段中同志经常给以帮助指导；龚继晏同志协助翻译了第五、七、八章；邵承泽同志协助翻译了第十、十一章。在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于光纤通信是一门新技术，再加译者水平有限，难免有不当和错误之处，敬请读者批评指正。

前 言

撰写这类图书有几种方法：一是由一位作者从头至尾写出全书，但是很难找到一位既有光纤通信丰富的经验又有充裕的写书时间的作者；二是邀请几位专家共同撰写，而每人只负责他最熟悉的章节。第二个方法的优点是可以做到内容丰富，但是作者来自不同单位，甚至不同国家，因此有可能出现各章联系不够紧凑，内容松散的缺点。本书的编写采用介于这两种方法之间的第三种方法，即汇集一个专家组的观点写的，这些专家大多数是从光纤通信概念提出之日起就在同一个单位工作，共同研究光纤通信的有关问题。

本书内容力求避免局限性，各位作者在论述自己的题目时，都考虑了与其它章节的联系。因此，全书层次清晰，联系紧密。为了帮助读者完成有关光纤实验的计算工作，书中给出了适当的例题；还给出大量的数据，作为典型光纤通信系统的设计基础。

本书在叙述光纤通信各种技术问题的过程中，始终以世界上最早的一条宽带光学电话通信干线为主线，介绍在它的研究、发展和在工程安装中遇到的各种问题。

我们衷心感谢标准电信研究所、卫星试验中心和国际电话电报公司董事会，他们支持、鼓励出版这本书，允许复制书中的插图。同样衷心感谢英国邮政总局和英国国防部的支持。我们特别赞赏我们公司和协会的主要成员，他们参与本书的讨论并提出了有益的意见。

最后，以我个人的名义感谢全体作者亲密无间的协作。同时感谢丽塔·克拉夫特夫人协助准备本书的原稿。

C.P.森特巴克

目 录

前 言

第一章	光纤通信的基本原理(作者: C.P.森特巴克)...	(1)
第二章	光在光纤波导中的传播(作者: M.M.拉姆塞, G.A.霍克哈姆)	(23)
第三章	光纤波导的制造(作者: P.W.勃拉克, J.厄文, J.铁契马希)	(34)
第四章	光缆(作者: S.G.福特)	(64)
第五章	光缆的连接(作者: J.S.李奇, M.A.马修斯, E.达尔高脱)	(81)
第六章	测试技术(作者: G.J.堪纳尔, R.华新顿, K.C.别隆)	(102)
第七章	光纤通信用的半导体激光源(作者: P.R.赛尔为, A.R.古得温, P.A.柯克别)	(151)
第八章	光纤通信系统用的检测器(作者: R.G.拔楞勃)	(179)
第九章	系统设计(作者: M.琼, A.W.戴维斯, R.E.埃拔华斯J.G.法林顿)	(201)
第十章	光纤通信系统的应用潜力(作者: A.W.霍斯莱, M.E.柯略)	(279)
第十一章	一个140兆比/秒的现场光纤实验系统(作者: D.R.希尔)	(300)
参考文献		(327)

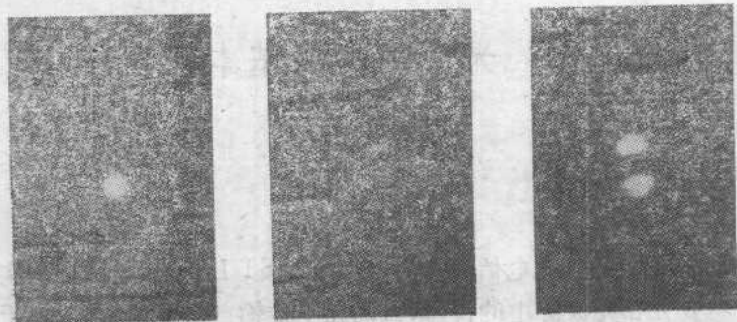
第一章 光纤通信的基本原理

引言

1964年英国标准电信研究所(简称为STL)曾做过一些实验,研究光在光波导中的传播,目的在于传输宽带电信信号。由于有历史性意义,现将当时拍摄的表明光在粗糙的光纤中传播的几张照片示于图1。标准电信研究所还分析了光在介质波导中的传播并公布了研究成果。虽然从理论上预测到光纤是一种很有前途的传输介质,但当时制成的光纤衰减很大,不能将光传输到有实用意义的距离,因而还不能实际使用。从1964年至今,十五年来光通信取得了重大进展,目前已经能够生产实用的光通信系统并已安装应用于电话干线,数据通信链、电视分配及军事通信等多种业务上。

光纤通信为什么引起电子工程师的密切注意呢?图2形地象说明了原因。图中给出英国邮政总局的 $3\frac{1}{2}$ 英寸标准管道中的信息容量近似相等的三种电缆。由图人们可以马上看出,由于光导纤维组成的光缆结构简单,原材料便宜,成本有可能比普通电缆低。普通电缆比光缆大得多而且要用大量的铜。由于尺寸小灵活性大,可以减少大量安装问题,特别是在管道内电缆过分拥挤,空间受到限制的那些城市内更为突出。因为在光波导中载运信息的光是电磁波,其频率约为 3×10^{14} 赫(即约等于传输电视的UHF频段的 10^5 倍),这种传输介质的信息载运潜力很高。由于光的波长比微波波长短得多,光波导可以很细,实际上直径只相当于头发丝粗细。这些精巧的玻璃丝不仅能传送带宽很宽的信息,如几路电视,而且

由于传输损耗小，信号沿光纤传输的距离可比沿铜电缆传输的距离大100倍，不需要中继增音机。



(a) HE_{11}

(b) EH_{11}

(c) $TE_{01} + HE_{21}$

(a) HE_{11}^*

(b) EH_{11}

(c) $TE_{01} + HE_{21}$

图 1 英国标准电信研究所1964年所摄纤维波导的光图案



图 2 光缆与金属电话电缆的比较

本章说明电子通信系统和光通信系统的不同点，给读者提供一些基础知识，以便更详细地论述后面的几章。

传 输 介 质

研究光沿光波导传输的最简单的方法，是把光在折射率分别为 n_1 和 n_2 ，而且 $n_1 > n_2$ 的两种介质的界面上的反射看成全反射。图3所示的光纤是典型的多模①光纤，多模光纤由圆形芯线和包层组成。设芯线的直径为 a ，均匀折射率为 n_1 ，其周围覆有折射率为 n_2 的包层。以角度 θ_1 投射到芯线上的光将在芯线内传播，传播方向与轴的夹角为 θ_2 。当光的投射角大于 θ_1 时（见图3中的虚线），光就不在芯线内反射，而将折射到包层中去。如果投射角足够大， n_1 和 n_2 又足够小，光甚至会在第二个界面逸出包层进入空气。最大投射角 θ_1 和传播角 θ_2 用数值孔径 NA 表示：

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \quad (1)$$

因为电磁波是在波导内传播，所以仅有几个模式可以传播，可以将这几个模看成是对应于 θ_2 的特殊的离散数值的光线。

对波长 λ 的光波，传输的模数 N 用下式计算

$$N \approx 0.5 \left(\frac{\pi d NA}{\lambda} \right)^2$$

式中， d 是芯线的直径。

在折射率的组合给定的情况下，随着芯线直径的减小能传播

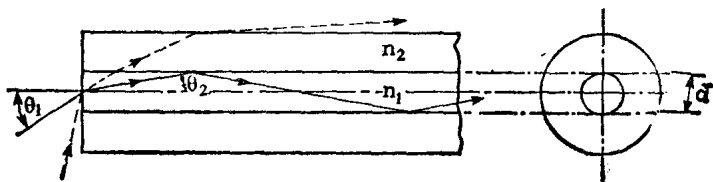


图 3 光波导中的光线图

① 译者注：模或模式是指传输线横截面和纵截面的电磁场的结构图形，即电磁波的分布情况。一般说来，不同的模有不同的场结构，每一种传输线有与其对应的一个基模。基模表示截止波长最长的模式，其它称为高次模。多模光纤即能传播多个模式的光纤。

的模也越来越少。最后,当芯线直径和光的波长为同一数量级时,就只能传播一个模。

这种简单的几何方法对多模波导的特性给出了较准确的描述。图4是发光二极管紧贴多模光纤情况下的典型光线图。这个图说明以下几个问题。第一,为了使二极管发射的光尽量多地耦合到光纤中,二极管有效面积的直径应小于光纤的直径。这是因为圆面积以外发射的光,大部分进入包层,不能增加传输信号的功率。即使光源紧贴芯线,并与光纤的面积完全匹配,也只能传播二极管发射的一部分光线,即投射角小于 θ_1 的光线。因而,数值孔径越大,耦合效率就越高。改善耦合的代价是沿光纤传播的最高次模和最低次模之间的路径差加大,并由此引起色散。考虑沿平行于光纤轴传播的光和沿最大角度 θ_2 传播的光的最大路径差,可以计算由于能量沿两个不同路径传播(见第六章公式16)的时差所产生的脉冲展宽,即色散。因而大数值孔径波导的带宽小于传播模较少的小数值孔径波导的带宽。光通过光纤时,大部分是斜向传播的,利用图4所示的子午面的极端情况,可以求出最大时延。根据定义,单模波导不存在由于上述过程产生的色散。

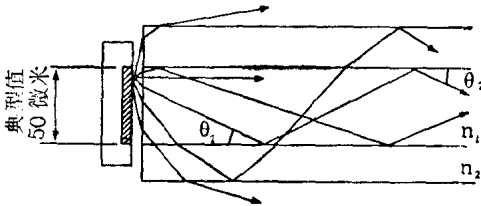


图 4 用发光二极管向多模光纤投射时简单的光线图

图5表示光通信系统最常用的三种光纤。第二章将详细讨论这三种光纤的传播原理。为了使读者对这几种介质波导的结构有一定的感性认识,这里介绍一些基本概念。图5右边的实线表示 HE_{11} 模的功率密度,而右边的虚线表示诸模的功率包络估值。

图5(a)所示的多模波导与图3所示的多模波导本质上是相

同的。由图可以看出，绝大部分能量在芯线中传播，但为了保证紧贴芯线的包层优质，从而减少总的传输损耗，有时就要在折射率为 n_1 的芯线上被覆一层很薄的折射率为 n_2 的包层。

为了充分兼顾多模光纤和单模光纤两方面的要求，设计出图5(b)这样一种结构。在此结构中，芯线的折射率从中心的最大 n_0 向外按下式渐减。式中， n_0 是芯线中心的折射率， α 是决定有效数值孔径的常数。

$$n_r = n_0 (1 - \alpha r^2)$$

图中用折线形象性地表示代表不同模式的光线可以看出，由于对应于大投射角 θ 的模在芯线内的传播路径长，但它们是在折射率小的区域内传播，速度比轴向模大，因此，这种结构可以补偿在阶梯折射率光纤中存在的模色散。由于这种光纤的模色散低于阶梯折射率光纤的模色散，因此不要求必须将光线投射到直径非常小的芯线上，从而避免了拼接小直径芯线的困难。通常渐变折射率光纤有一根芯线，其折射率渐变范围大约等于光纤直径的一半，其余部分的折射率保持恒定。这样能量就可限制在芯线内，通常还在芯线四周被覆一层优质光包层。

图5(c)是单模光纤，单模光纤的芯线直径只有几微米，可与光的波长相比拟。由功率分布可以看出，绝大部分能量在包层中传播，因此，包层材料与芯线材料应有同样良好的光学性能，这

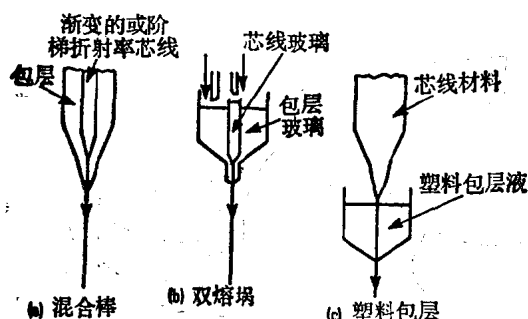
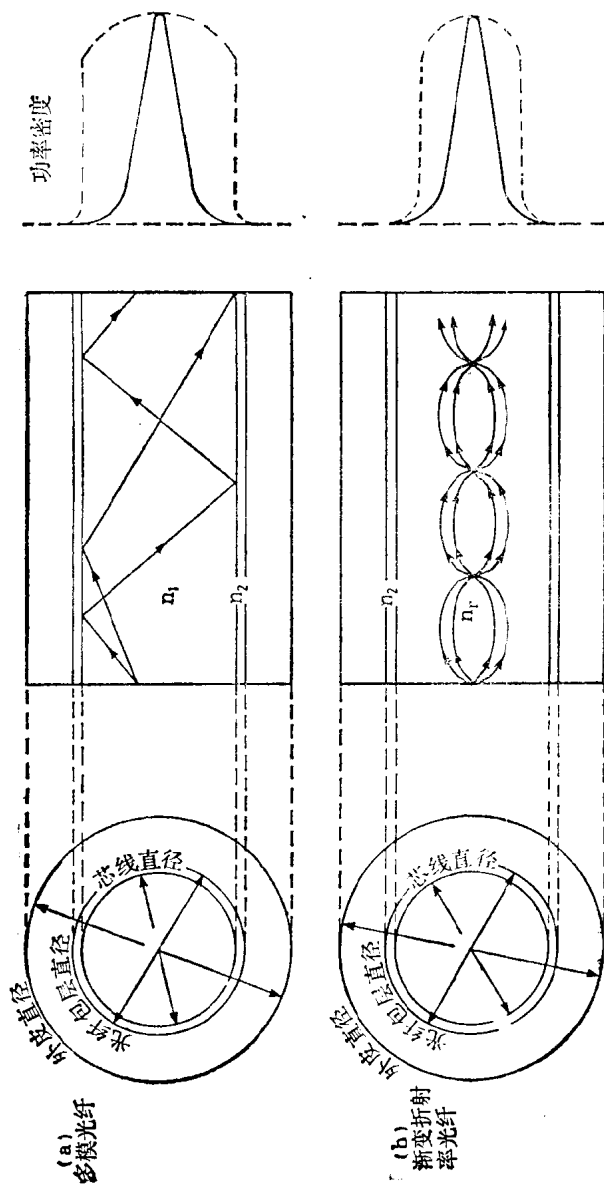


图 6 光纤的几种制造方法



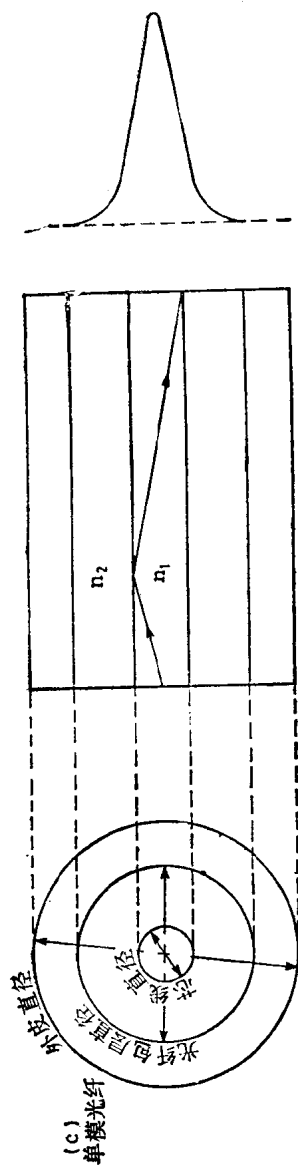


图 5 三种通用的光纤

点特别重要。在单模光纤中，只有因不同颜色的光的传播速度不同而产生的色散。单模光纤的主要缺点是，完全对准这些细小的芯线，要比对准其它类型的光纤更加困难。这些问题将在第五章讨论。图6描述了三种最常用的光纤制造方法。

第一种方法是单根混合棒法。其芯线可以是阶梯折射率的，也可以是渐变折射率的。棒的直径为几毫米，长为几米。这种棒是用淀积纯硅并掺杂不同数量的杂质制成的。例如为使折射率高可以掺杂氧化锗、三氧化二铝、氧化钛或五氧化二磷；而为使折射率低可以掺杂氧化硼。用气态硅和掺杂剂淀积，得到透明的原材料棒。然后控制拉纤速度将透明的混合棒拉成光纤。第二种方法是双熔锅法，将装在双熔锅内的芯线材料和包层材料拉成光纤。为了得到渐变折射率光纤，采用离子交换法。第三种方法仅用于阶梯折射率光纤，先将均匀低损的原材料棒拉成光纤，然后被覆塑料包层，如硅树脂薄层。包层的折射率小于芯线的折射率，因而将光限制在光纤里面。由于在包层内传播的能量极少，在某些情况下可以用损耗并不很小的塑料作包层，也能得到衰减很小的光纤。用以上三种方法可制成衰减小于10分贝/公里的光纤。但是，第一种方法有可能制成衰减最小的光纤。第三章将仔细讨论这三种方法并将引证一些性能数据。

表1列出前面讨论过的这几种典型光纤的参数。由表1可以看出，三种阶梯折射率光纤的主要差别是接收角度 θ_1 不同。用铅玻璃芯线做成的光纤能够获得最大的数值孔径，为此而付出的代价是模色散很大（顺便说明，用铅玻璃制成的光纤其衰减也稍大）。表中援引的含氧化锗/氧化磷掺杂的多模硅光纤的模色散是按第六章式（27）计算出来的理论上最坏的情况。实际色散值仅是理论值的三分之一，其原因是能量主要分布在低次模上并非均匀地分布在每个可能传输的模上。

上面说的这种情况在塑料包层硅光纤里更为显著。在塑料包层硅光纤中，高次模被贴近芯线的高损耗塑料包层衰减。表1所列塑料包层光纤的模色散从理论值165减到实际上的30左右。为

此而付出的代价是它的衰减比其它硅芯线光纤大得多（见第三章）。

几种光纤的特性

表 1

光纤种类	芯线折射率 n_1 波长为850毫微米	包层折射率 n_2 波长为850毫微米	芯线直径(微米)	包层直径(微米)	光纤外径(微米)	数值孔径的最大理论值	θ_1 (度)	模色散 Δt 毫微秒/公里
多模阶梯光纤, 芯线掺杂 $\text{GeO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ 色层掺杂 SiO_2 或 $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$	1.469	1.452	50	55~60	125	0.22	13	57
塑料数层硅阶梯折射率光纤	1.452	1.405	150	230	230	0.37	22	165.0
玻璃芯线硼硅数层折射率阶梯光纤	1.62	1.55	80	100	100	0.47	28	249.0
多模渐变折射率光纤, 芯线掺杂 $\text{GeO}/\text{P}_2\text{O}_5$, 包层掺杂 $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$	1.475	1.452	50	55	125	0.26	15	<0.5
单模光纤, 芯线掺杂 GeO_2 , 包层为 SiO_2	1.462	1.452	3.3	45	125	0.17	10	0

由表1可以看到,多模渐变折射率光纤的 n_1 比用类似材料制成的阶梯折射率光纤的 n_1 大。对多模渐变折射率光纤来说,折射率系指中心的最大折射率。数值孔径0.26和投射角 θ_1 等于 15° 也仅适用于芯线中心附近。

虽然渐变折射率结构并没有完全消除色散,但是,由表1所列的典型试验结果可以看出,其色散值比类似的阶梯折射率光纤小得多。应注意,投射到表1所列单模光纤中的光量比投射到多模光纤的光量小很多倍,这不仅是因为单模光纤的接收角较小,而且单模光纤的芯线截面积非常小。当然单模光纤没有模色散,但是由于光源不是单色的,单模光纤仍有材料色散,其大小取决于所

用光源的型号。

计算表1所列诸参数时，所用波长都是850毫微米，在此波长上光源的波谱每展宽一毫微米将产生大约90微微秒/公里的材料色散。当用谱宽为20毫微米的发光二极管时，由于材料色散产生的脉冲展宽为1.8毫微秒/公里。材料色散如此之大，就使单模光纤没有模色散的优点黯然失色。事实上已超过渐变折射率光纤的0.5毫微秒/公里的模色散。对宽带光纤必须用辐射光谱很窄的光源，如镓砷激光源。举例来说，中心波长为850毫微米，谱宽为3毫微米的激光源，由于材料色散产生的脉冲展宽等于0.27毫微秒/公里，但就是这样一个并不很大的脉冲展宽数也使渐变折射率光纤的模色散大为增加。在较长的波长上，表1所列各种光纤的材料色散可以小到能够忽略的最小值。由后面几章的内容可以知道，当工作波长为1.3微米时，光纤的传播衰减非常小，色散可以忽略。

半 导 体 光 源

大多数光通信系统都用半导体光源将电信号转变成光信号，再投射到光纤上。

给直接带隙半导体二极管的p-n结加正偏压时，由于电子-空穴对复合效应引起自发光子发射。光子的能量及其波长由半导体的价带和导带间的能隙决定。在镓铝砷半导体器件中，能隙对应的波长约为850毫微米，改变含铝的百分数可以稍稍改变工作波长。从第三章的图38可以看到，850毫微米位于光纤的低衰减区。

图7给出光通信系统中常用的四种光源。图7(a)所示的发光二极管的结构与可见光显示器二极管的结构基本相同，但发光二极管工作在红外波长。虽然发光二极管可与总直径达1毫米的多股光纤束相连，但它不宜与单股光纤系统（例如本书所述的）相连。

图7(b)所示高辐射率发光二极管⁶是专为将强光束高效率

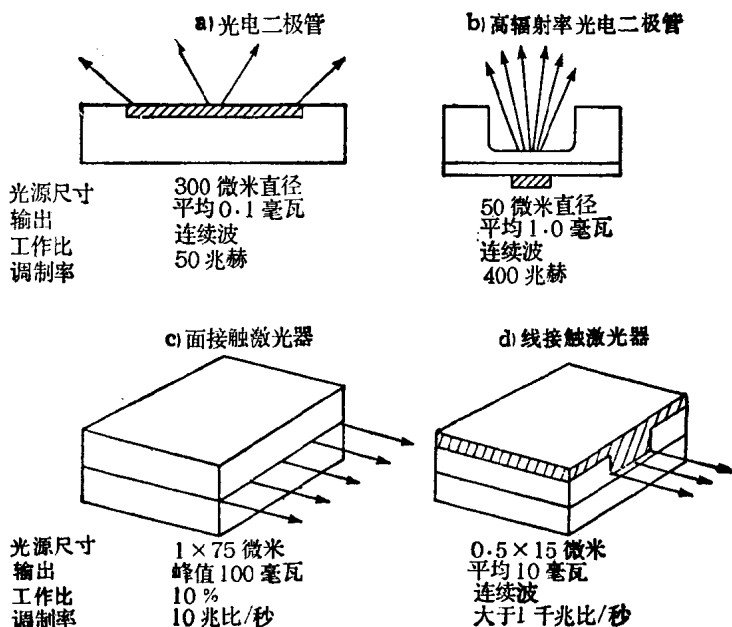


图 7 激光器和发光二极管的特性

地投射到直径约50微米的单股多模光纤而设计的。

激光器可以把最多的光功率投射到光纤的芯线中。半导体激光器是由切开端面淀积的镜面封闭p-n结内发射的光子而形成的。在p-n结上加正偏压，在导带内就会产生高密度的电子群。当然，能量为 $h\nu$ 的自发光子被某一镜面反射而碰到电子时，将立即发射一个能量也为 $h\nu$ 的新光子，发生第二个光子的受激辐射。这两个光子在粒子稠密的导带内碰到能级合适的电子时，就会激发更多的光子。因此一旦超过门限电流，而形成足够高的电子密度时，激光器的放大作用就能维持。因为光子激发的波长相同，所以放大机理将使光谱变窄，宽度小于1毫微米，但类似的发光二