

光纤通信技术

OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS
TECHNOLOGY

原荣 编著

便于自学 内容全而新，由浅入深，通俗易懂，是一本理想的入门读物

便于应用 汇集了系统设计和工程计算所需要的数据、图表和公式，方便设计时查阅

便于教学 配有立体化教学资源，是一本很好的普及教材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

光纤通信技术

OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS
TECHNOLOGY

原 荣 编著



机械工业出版社

本书是在作者编著的《光纤通信》(第3版)和《宽带光接入技术》的基础上,根据读者的需要和光纤通信技术的最新研究进展,删繁就简、归纳合并,重新编写而成。

全书共分10章,第1章讲解了光纤通信的发展史和基础知识,包括光的传播特性和平板介质波导;第2~6章介绍了光纤光缆、光无源/有源器件、光接收/发射和放大;第7、8章阐述了调制/编码、复用/解复用,光纤传输系统及其系统设计;第9章介绍了无源光网络接入技术;第10章简述了常用的光纤通信测量仪器,以及光纤特性、通信器件和系统指标的测试技术。

本书作为有志于从事光纤通信器件制造和系统研发工作的读者的入门读物和普及教材,不仅在行文表述中力求做到概念清晰、文字通俗,而且还针对电子教学和培训的需要,为读者提供两项服务:一是免费提供全套电子教学课件(Power Point文件),覆盖各章主要文字内容和全部插图;二是为每章设计了相应的复习思考题和习题,并对填写了“教师情况调查表”的注册教师用户免费提供全部复习思考题和习题的详细题解。

本书既可作为各类大专院校相关专业的教材,也可供相关企事业单位员工进阶培训使用,还对从事光纤通信系统和网络的研究教学、规划设计、管理和维护的有关人员有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/原荣编著. —北京:机械工业出版社,2011.6
ISBN 978-7-111-34919-8

I. ①光… II. ①原… III. ①光纤通信 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第103740号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李馨馨

责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·22.75印张·558千字

0001-3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-34919-8

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

1966年,英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文,指出利用玻璃纤维进行信息传输的可能性和技术途径,从而奠定了光纤通信的基础。在此后短短的40多年中,光纤损耗已经由当时的3 000 dB/km降低到目前的0.151 dB/km。在光纤损耗降低的同时,光纤通信所使用的光源、探测器和无源/有源器件,无论是分立元件,还是集成器件都取得了突破性的进展。自20世纪70年代中期以来,光纤通信的发展速度之快令人震惊,可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟,光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

目前,无论是电信骨干网还是用户接入网,无论是陆地通信网还是海底光缆网,无论是看电视还是打电话,光纤无处不在,无时不用,光纤传输技术随时随地都能碰到。所以,对于从事信息技术的人员来讲,了解光纤通信技术是至关重要的。

与其他同类书籍相比,本书增加了光纤通信近年来的最新进展,主要有阵列波导光栅(AWG)的工作原理和器件,包括AWG复用/解复用器、滤波器、可重构光分插复用器(ROADM)、波长可调激光器、光子集成(PIC)多频激光器和光发射机/接收机等。本书还增加了已在高速光纤通信系统中得到广泛使用的高速光探测器件,如单向载流子探测器(UTC-PD)、波导探测器(WD-PD)和行波探测器(TW-PD),以及由它们构成的PIC光接收机。此外,还增加了已实用化的可提升系统性能的先进光调制技术,如光双二进制编码(ODB)、差分相移键控(DPSK)、差分正交相移键控(DQPSK)和偏振复用差分正交相移键控(PM-DQPSK)等技术。最后,还介绍了能减少比特误码率、增大传输距离的超强FEC纠错技术,补充了近年来在高速光纤传输系统色散补偿中越来越受到重视的电子色散补偿技术,本书还介绍了高阶色散和光信噪比(OSNR)的概念。

本书将光纤 V 参数定义为归一化纤芯直径,并在系统设计中,首次引入系统等效增益的概念,将激光器输出功率和探测器要求的最小光功率合并考虑为系统等效增益,以便于系统功率预算。

为了适合不同层次读者的使用,本书特地在介绍一个现象或器件的原理之前,尽量把一些通俗易懂、日常生活中经常会碰到的现象,辅以插图,简单明了地加以说明。例如,对光纤通信发展史以图说明;对光的反射/折射、衍射/干涉和双折射,都从直观明了、通俗易懂的角度通过插图进行说明;特别是高速光纤通信将要用到的双折射及其器件的内容,也采用了图示的方式加以说明;在解释光的干涉现象时,先用看得见、摸得着的两列水波的干涉和一根被夹紧弦线的振动来说明,然后再引出与此类似但抽象的光波干涉;在介绍光纤的各种损耗和受激发射导致光放大时,也增加相应的插图来形象地说明;对于边入射探测器,如果已经知道光纤传输的原理,那么看了本书后,也一定会很容易理解,入射光为什么在分支波导探测器中总是向外偏转被吸收的道理;对分布式光纤拉曼放大器的工作原理,本书中给出了各种光调制方式图、信道复用图,从而使读者更容易理解;对于大家都熟悉,但不易讲清楚的棱镜分光的原理,在本书的第3章以图文并茂的形式进行了的解释。

本书内容既浅显易懂,又有一定的深度、先进性和实用性。本书内容前后连贯,原理上

一脉相通。例如，在第1章中，介绍了平面电磁波，提到“光波在给定时间内被一定的距离分开的两点间存在的相位差”，这一概念很重要，因为以后经常会用到。在后面介绍马赫-曾德尔（MZ）干涉仪构成的滤波器、复用/解复用器和调制器，由AWG构成的诸多器件（如滤波器、波分复用/解复用器、光分插复用器和波长可调/多频激光器等），以及由电光效应制成的外调制器等的工作原理时，均用到这一相位差的概念。

此外，本书在阐述了光纤通信系统构成各部分的原理、性能指标并给出计算公式后，不但介绍了目前的进展情况，而且还汇总给出了目前国内外商用系统和器件的参数指标，以使读者有一个定量的概念，也便于工程技术人员设计系统时参考、比较和选用。本书最后给出了详尽的名词术语索引，在阅读和实际工作中，可以根据需要从关键字查找到系统设计和工程计算所需要的内容、数据、图表和公式。另外，本书还在附录中规范了系统设计参数，从某种意义上说，本书也像一本光纤通信手册。

对于一般的读者，即使以前没有无线电和通信的背景知识，只要从头读起，也会理解本书的内容，并对光纤通信有所了解，因为本书从概念和基础以通俗化的方式讲起，前后又有连贯性和条理性。对于已具有光纤通信背景知识的读者，根据各自的情况可以通读，也可以根据实际需要，选读其中一些内容。

因作者水平所限，书中可能会有遗漏及错误之处，敬请读者指出。作者会将本书可能出现的错误的改正发布在博客上（<http://blog.sina.com.cn/guilinyuanrong>），并对读者提出的问题答复。作者联系方式 giocyr@163.com。

为了满足教学需要，本书免费提供了电子课件，包括书中主要的内容、所有插图和对插图的简要说明。本书还提供了各章所有的复习思考题和习题的详细题解，有需要的读者可注册并登录机械工业出版社门户网站（www.cmpbook.com）免费下载使用（需填写“教师情况调查表”）。

作者

目 录

前言

第 1 章 光纤通信概述	1
1.1 光纤通信技术发展	2
1.1.1 光通信发展史	2
1.1.2 光纤通信的优点	6
1.1.3 光纤通信系统的组成	7
1.2 光波基础	8
1.2.1 光的本质——波动性和粒子性	8
1.2.2 均匀介质中的光波——光是电磁波	10
1.3 光的传播特性	11
1.3.1 光的反射、折射和全反射——光纤波导传输光的基础	11
1.3.2 光的干涉和衍射——激光器和滤波器	13
1.3.3 光的偏振	20
1.3.4 光的双折射	21
1.4 平板介质波导	23
1.4.1 光波在波导中传输的条件——全反射和相长干涉	23
1.4.2 单模和多模波导—— V 参数	25
1.4.3 TE 模、TM 模和 HE 模	26
1.5 复习思考题	27
1.6 习题	27
第 2 章 光纤和光缆	29
2.1 光纤的结构和类型	30
2.1.1 多模光纤	30
2.1.2 单模光纤	33
2.1.3 光纤制造工艺	34
2.2 光纤传输原理	34
2.2.1 光线理论分析传输条件——全反射和相干	35
2.2.2 光线理论/导波理论分析光纤模式	36
2.2.3 单模光纤的基本特性	41
2.3 光纤传输特性	42
2.3.1 衰减	43
2.3.2 色散	44
2.3.3 光纤比特率	50

2.3.4	光纤带宽	51
2.3.5	非线性光学效应	52
2.4	单模光纤的进展和应用	52
2.4.1	G. 652 标准单模光纤	52
2.4.2	G. 653 色散移位光纤	53
2.4.3	G. 654 衰减最小光纤	54
2.4.4	G. 655 非零色散光纤	54
2.4.5	G. 656 宽带全波光纤	55
2.4.6	G. 657 接入网用光纤	56
2.4.7	色散补偿光纤	57
2.5	光纤的选择	58
2.6	光缆	59
2.6.1	对光缆的基本要求	59
2.6.2	光缆的结构和类型	60
	复习思考题	61
	习题	61
第3章	光纤通信无源器件	63
3.1	连接器	64
3.1.1	活动连接器结构和特性	64
3.1.2	连接损耗	65
3.1.3	接头	66
3.2	耦合器	66
3.2.1	方向耦合器	67
3.2.2	熔拉双锥星形耦合器	68
3.2.3	阵列波导光栅星形耦合器	69
3.2.4	单纤双向光耦合器	70
3.3	可调谐光滤波器	70
3.3.1	法布里-珀罗滤波器	71
3.3.2	马赫-曾德尔滤波器	73
3.3.3	布拉格光栅滤波器	74
3.3.4	阵列波导光栅滤波器	76
3.4	波分复用/解复用器	78
3.4.1	棱镜复用/解复用器	78
3.4.2	衍射光栅解复用器	79
3.4.3	阵列波导光栅复用/解复用器	80
3.4.4	马赫-曾德尔干涉滤波复用/解复用器	81
3.4.5	介质薄膜干涉滤波解复用器	82
3.5	调制器	84
3.5.1	电光调制器	84

3.5.2	电吸收波导调制器	88
3.6	光开关	90
3.6.1	微机电系统光开关	90
3.6.2	电光开关	91
3.6.3	热光开关	92
3.7	光隔离器	93
3.7.1	法拉第磁光效应	93
3.7.2	磁光块状光隔离器	94
3.7.3	磁光波导光隔离器	95
3.8	光环行器	95
3.9	光分插复用器	96
3.9.1	一般概念	96
3.9.2	阵列波导光栅光分插复用器	96
3.9.3	可重构光分插复用器	98
3.9.4	波长选择交换可重构光分插复用器	99
3.10	波长转换器	99
3.11	双折射器件	100
3.11.1	相位延迟片和相位补偿器	100
3.11.2	起偏器、检偏器和马吕斯定律	101
3.11.3	尼科尔棱镜——一种起偏器	102
3.11.4	渥拉斯顿棱镜——一种偏振分束器	103
3.11.5	偏振控制器	103
3.12	复习思考题	104
3.13	习题	104
第4章	光源和光发射机	106
4.1	概述	107
4.2	发光机理	108
4.2.1	发光机理概述	108
4.2.2	激光器起振的阈值条件	111
4.2.3	激光器起振的相位条件	112
4.3	半导体激光器结构	114
4.3.1	异质结半导体激光器	114
4.3.2	量子限制激光器	115
4.3.3	分布反馈激光器	116
4.4	波长可调半导体激光器	119
4.4.1	耦合腔波长可调半导体激光器	119
4.4.2	衍射光栅波长可调激光器	121
4.4.3	阵列波导光栅波长可调激光器	123
4.5	垂直腔表面发射激光器	125

4.6	半导体激光器的特性	126
4.6.1	半导体激光器的基本特性	126
4.6.2	模式特性	128
4.6.3	调制响应	129
4.6.4	半导体激光器噪声	129
4.7	高速光发射机	131
4.8	复习思考题	132
4.9	习题	132
第5章	光探测和光接收机	134
5.1	光探测原理	135
5.1.1	响应度和量子效率	135
5.1.2	响应带宽	136
5.2	光探测器	137
5.2.1	PIN 光敏二极管	137
5.2.2	雪崩光敏二极管	139
5.2.3	金属-半导体-金属光探测器	140
5.2.4	单行载流子光探测器	141
5.2.5	波导光探测器	142
5.2.6	行波光探测器	144
5.3	数字光接收机的构成	147
5.3.1	光电转换和前置放大器	147
5.3.2	线性放大器	148
5.3.3	数据恢复	149
5.4	接收机信噪比	149
5.4.1	噪声机理	150
5.4.2	PIN 光接收机的信噪比	150
5.4.3	APD 接收机的信噪比	152
5.4.4	光信噪比和信噪比的关系	153
5.5	接收机误码率和灵敏度	153
5.5.1	比特误码率	153
5.5.2	最小平均接收光功率	155
5.5.3	灵敏度下降机理	156
5.6	光接收机	157
5.6.1	光接收机性能	157
5.6.2	电子载流子光接收机	158
5.6.3	阵列波导光栅多信道光接收机	158
5.6.4	107 Gbit/s WG-PIN 行波放大光接收机	159
5.7	复习思考题	160
5.8	习题	160

第 6 章 光放大器	162
6.1 光放大器基础	163
6.1.1 增益频谱和带宽	163
6.1.2 增益饱和	164
6.1.3 光放大器噪声	165
6.1.4 光放大器应用	166
6.2 半导体光放大器	166
6.2.1 半导体光放大器设计	167
6.2.2 半导体光放大器特性	169
6.2.3 半导体光放大器的应用	170
6.3 掺铒光纤放大器	170
6.3.1 掺铒光纤结构和掺铒光纤放大器的构成	171
6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理及其特性	172
6.3.3 掺铒光纤放大器的优点	175
6.3.4 掺铒光纤放大器的应用	176
6.3.5 掺铒光纤放大器在系统中的级联	176
6.4 光纤拉曼放大器	178
6.4.1 分布式光纤拉曼放大器的工作原理	179
6.4.2 拉曼增益和带宽	179
6.4.3 多波长泵浦增益带宽	180
6.4.4 光纤拉曼放大技术的应用	181
6.5 复习思考题	182
6.6 习 题	183
第 7 章 光纤传输系统	184
7.1 光纤通信系统基础	185
7.1.1 脉冲编码——将模拟信号变为数字信号	185
7.1.2 信道编码——减少误码方便时钟提取	187
7.1.3 信道复用——提高信道容量,充分利用光纤带宽	190
7.1.4 光调制——让光携带声音和数字信号	190
7.2 电复用光纤传输系统	193
7.2.1 频分复用光纤传输系统	193
7.2.2 微波副载波复用光纤传输系统	195
7.2.3 光纤/电缆混合网——典型的 FDM 光纤通信系统	200
7.2.4 SDH 光纤传输系统——典型的 TDM 光纤通信系统	203
7.3 光复用光纤传输系统	207
7.3.1 波分复用光纤传输系统	208
7.3.2 光时分复用光纤传输系统	209
7.3.3 光码分复用光纤传输系统	212
7.4 相干光波通信系统	214

7.4.1	相干检测原理	214
7.4.2	相干解调方式	217
7.4.3	相干系统光调制	219
7.4.4	相干系统接收	219
7.4.5	相干实验系统	222
7.5	光孤子通信实验系统	223
7.5.1	基本概念	223
7.5.2	光孤子通信实验系统	223
7.6	高速光纤传输系统	224
7.6.1	先进光调制制式	225
7.6.2	超强 FEC 纠错	230
7.6.3	高速光纤传输系统	231
7.7	光纤传输系统色散补偿和管理	232
7.7.1	负色散光纤补偿	233
7.7.2	光滤波器补偿	234
7.7.3	啁啾光纤色散补偿	235
7.7.4	电子色散补偿	237
7.7.5	波分复用系统色散补偿	237
7.7.6	色散管理	238
7.8	复习思考题	240
7.9	习题	240
第8章	光纤传输系统设计	242
8.1	系统设计的总体原则	243
8.1.1	系统结构	243
8.1.2	光纤损耗限制系统	247
8.1.3	光纤色散限制系统	248
8.2	功率预算	249
8.2.1	陆地系统功率预算	249
8.2.2	海底光缆系统功率预算	250
8.2.3	功率代价因素	252
8.3	带宽设计	254
8.4	单信道光纤通信系统设计	256
8.4.1	模拟系统设计	257
8.4.2	数字系统设计	259
8.5	DWDM 系统工程设计	261
8.5.1	中心频率、信道间隔和带宽	261
8.5.2	光收发模块和复用/解复用器规范	262
8.5.3	光放大器系统设计	263
8.5.4	光功率预算及其代价	266

8.5.5	网络管理	268
8.5.6	网络保护、生存和互连	269
8.6	复习思考题	270
8.7	习题	270
第9章	无源光网络接入技术	273
9.1	接入网在网络建设中的作用及发展趋势	274
9.1.1	接入网在网络建设中的作用	274
9.1.2	光接入网技术演进	274
9.1.3	三网融合——接入网的发展趋势	276
9.2	网络结构	277
9.2.1	网络结构	277
9.2.2	光线路终端	278
9.2.3	光网络单元	280
9.2.4	光分配网络	281
9.3	无源光网络基础	284
9.3.1	分光比	284
9.3.2	结构和要求	284
9.3.3	下行复用技术	285
9.3.4	上行接入技术	285
9.3.5	安全性和私密性	287
9.4	PON 接入系统	288
9.4.1	EPON 系统	288
9.4.2	GPON 系统	290
9.4.3	WDM-PON 系统	295
9.4.4	WDM/TDM 混合无源光网络	299
9.4.5	WDM-PON 与 PS-PON 的技术比较	300
9.5	复习思考题	300
9.6	习题	301
第10章	光纤通信仪器及指标测试	303
10.1	光纤通信测量仪器	304
10.1.1	光功率计	304
10.1.2	光纤熔接机	305
10.1.3	光时域反射仪	306
10.1.4	误码测试仪	307
10.1.5	PCM 综合测试仪	307
10.1.6	SDH 测试仪	308
10.1.7	光谱分析仪	308
10.1.8	多波长光源	309
10.1.9	光衰减器	310

10.1.10	综合测试仪	310
10.2	光纤传输特性测量	311
10.2.1	损耗测量	311
10.2.2	带宽测量	312
10.2.3	色散测量	312
10.2.4	偏振模色散测量	313
10.3	光器件参数测量	314
10.3.1	光源参数测量	314
10.3.2	探测器参数测量	315
10.3.3	无源光器件参数测量	317
10.4	光纤通信系统的指标测试	319
10.4.1	平均发射光功率和消光比测试	319
10.4.2	光接收机灵敏度和动态范围测试	320
10.4.3	光纤通信系统误码性能测试	322
10.5	复习思考题	323
附录	324
附录 A	电磁波频率与波长的换算	324
附录 B	dBm 与 mW、 μ W 的换算	324
附录 C	dB 值和功率比	325
附录 D	百分损耗与分贝损耗的换算	325
附录 E	PDH 与 SDH 速率等级	326
附录 F	WDM 信道 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\nu$ 的关系	326
附录 G	物理常数	327
附录 H	系统设计参数	327
附录 I	名词术语索引	328
参考文献	349

第 1 章

光纤通信概述

- 1.1 光纤通信技术发展
- 1.2 光波基础
- 1.3 光的传播特性
- 1.4 平板介质波导
- 1.5 复习思考题
- 1.6 习 题

1.1 光纤通信技术发展

1.1.1 光通信发展史

1. 周幽王烽火戏诸侯——古老的光通信

什么叫光通信？光通信是利用光波作为载体来传递信息的通信。

广义地说，用光传递信息并不是什么新鲜事。早在公元前两千多年以前，我们的祖先就在都城和边境堆起一些高高的土丘，遇到敌人入侵，就在这些土丘上燃起烟火传递受到入侵的信息，各地诸侯看见烟火就立刻领兵来救援，这种土丘叫做烽火台，它就是一种古老的光通信设备。其中“周幽王烽火戏诸侯”的故事流传甚广（见图 1.1.1），昏君周幽王为了让自己的爱妃开怀一笑，在无敌情的情况下，点燃烽火令各路诸侯派兵救援。然而当真正有敌人入侵时，再一次点燃烽火时，却没人理会。

另外，夜间的信号灯、水面上的航标灯也是古老光通信的实例。



1.1.1 古老的光通信设备——烽火台（周幽王烽火戏诸侯）

2. 中华民族对世界光学事业的贡献

谈到中华民族对世界光学事业的贡献，我们还可以追溯到公元前 3 世纪，我国周代就会用凹透镜向日取火，可以说是奥林匹克向日取火的鼻祖，而西方国家直到公元 13 世纪才相传有人用了 3 年时间，用金属磨成一个凹面镜，在太阳光下取火，这比我国至少落后了十几个世纪。还有公元前 400 年，我国先秦时代伟大的学者墨翟在他的《墨经》里就对光的几何性质在理论上作了比较完整的论述，它比欧几里得著的《光学》也早了 100 多年。

3. 谁发明了光电话

1876 年，美国人贝尔（Bell）发明了光电话，他用太阳光作光源，通过透镜把光束聚焦在送话器前的振动镜片上。人的嘴对准橡胶管前面的送话口，一发出声音，振动镜就振动而发生变形，引起光的反射系数发生变化，使发光强度随语音的强弱变化，实现语音对发光强度的调制。这种已调制的反射光通过透镜 2 变成平行光束向右边传送。在接收端，用抛物面反射镜把从大气传送来的光束反射到处于焦点的硒管上，硒的电阻随光的强弱变化，使光信

号变换为电流，传送到受话器，使受话器再生出声音。在这种光波系统中，光源是太阳光，接收器是硒管，传输介质是大气，如图 1.1.2 所示。1880 年使用这种光电话传输距离最远仅 213 m，很显然这种系统没有实用价值。

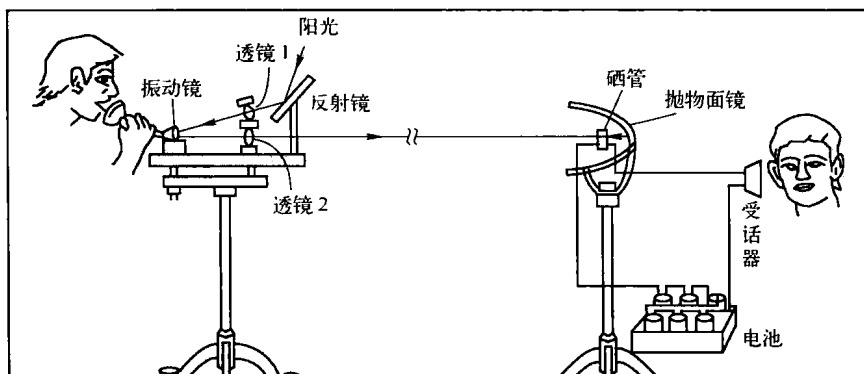


图 1.1.2 1876 年贝尔 (Bell) 光电话实验装置

4. 谁发明了激光器

用灯泡作光源时，调制速度非常有限，只能载运一路音频信号。

1960 年，美国人梅曼 (Maiman) 发明了第一台红宝石激光器，之后氦 - 氖 (He - Ne) 气体激光器、二氧化碳 (CO₂) 激光器也先后出现，并投入实际应用，给光通信带来了新的希望。激光 (LASER) 是取英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一个字母组成的缩写词，其意思是受激发射的光放大。这种光与燃烧木材和钨丝灯发出的光不一样，它是由物质原子结构的本质决定的光，它的频率很高，超过微波频率一万倍，也就是说它的通信容量要比微波大一万倍，如果每个话路频带宽度为 4 kHz，则可容纳 100 亿个话路。而且，激光的频率成分单纯，方向性好，光束发散角小，几乎是一束平行的光束，所以光通信很有吸引力。

5. 最早的光通信系统

自贝尔发明光电话后，有人又用弧光灯代替日光作为光源延长了通信距离，但还是只限于几千米。在第一次世界大战期间，曾使用弧光灯作发射机，通过声生电流对其光强进行调制；使用硅光电池作接收器，当调制后的光信号照射到硅光电池的 PN 结上时，通过光伏效应就在外电路产生变化的光电流，在晴好天气通信距离可达 8 km，如图 1.1.3a 所示。当光电管出现后，人们又用它作为接收器，将调制后的光信号还原成电信号，如图 1.1.3b 所示。光电倍增管中有电压逐级提高的多级阳极，其工作原理就是利用电子多级加速发射使外电路的光生电流放大而工作的。

实验表明，用光波承载信息的大气传输进行点对点通信是可行的，但是通话的性能受空气的质量和气候的影响十分严重，不能实现全天候通信。

为了克服气候对激光通信的影响，人们把激光束限制在特定的空间内传输，因而在 1960 年提出了透镜波导和反射镜波导的光波传输系统，如图 1.1.3b 和 c 所示。这两种波导从理论上说是可行的，但是实现起来却非常困难，地面上人为的活动会使地下的透镜波导变形和振动，为此必须把波导深埋或选择在人车稀少的地区使用。

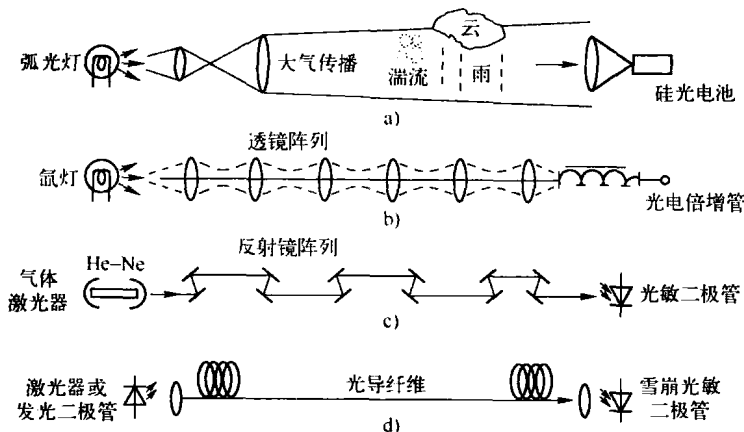


图 1.1.3 光通信发展历史

a) 大气传输光通信 b) 透镜波导 c) 反射镜波导 d) 现代光纤通信

6. 光纤是怎样传光的

大气传输容易受到天气的影响，透镜波导传输又容易受外界影响产生变形和振动，由于没有找到稳定可靠和低损耗的传输介质，所以光通信的研究曾一度走入低谷。

那么能不能找到一种介质，就像电线电缆导电那样来传光呢？

古代希腊的一位吹玻璃工匠观察到，光可以从玻璃棒的一端传输到另一端。1930年，有人拉出了石英细丝，人们就把它称为光导纤维，简称光纤或光波导，并论述了它传光的原理。接着，这种玻璃丝在一些光学机械设备和医疗设备（如胃镜）中得到应用。

现在，为了保护光纤，在它外面包上一层塑料外衣，所以它就可以在一定程度上弯曲，而不会轻易折断。那么，光能不能沿着弯曲的光纤波导传输呢？答案是肯定的。

光纤由纤芯和包皮两层组成，它们都是玻璃，只是材料成分稍有不同。一种光纤的芯径只有 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ，包皮直径约为 $120 \sim 140 \mu\text{m}$ ，所以光纤很细，比头发丝还细。假定光线对着纤维以一定入射角射入光纤，如图 1.1.4 所示，当光线传输到芯和皮的交界面上时，会发生类似于镜子反射光的现象，当碰到对面的交界面时，又一次反射回来。当光线传输到光纤的拐弯处时，来回反射的次数就会增多，只要弯曲不是太厉害，光线就不会跑出光纤。光线就是这样在光纤内往返曲折地向前传输的。

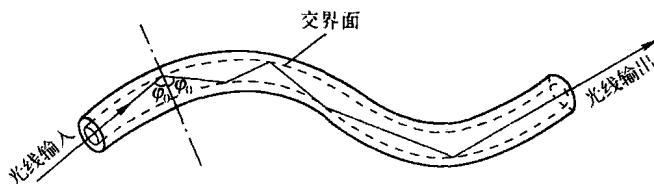


图 1.1.4 光线在光纤里传输的示意图

7. 光纤通信的鼻祖——高锟

看来，用光纤来导光进行光通信的问题似乎已解决了。其实问题并没有那么简单，因为用普通玻璃制成的光纤损耗很大，每公里就有 3000 dB ，记做 3000 dB/km 。这样的光纤，当光通过 100 m 后，它的能量就只剩下了百亿分之一了。所以，用光纤进行通信的关键问题是如何降低光纤的损耗。