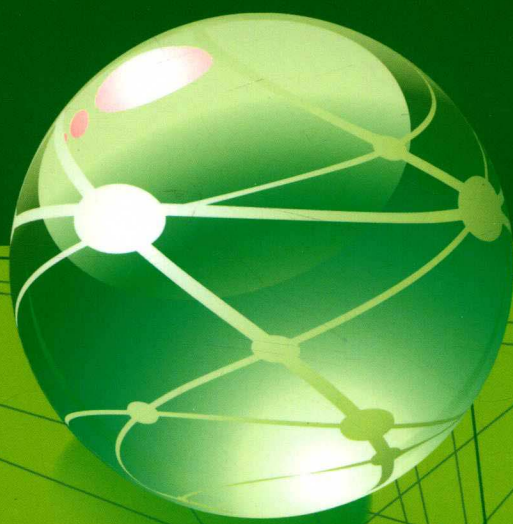


高等学校电子信息类系列教材

光波技术基础

延凤平 任国斌 王目光 王春灿 编著
裴 丽 宁提纲 谭中伟 李唐军



清华大学出版社

北京交通大学出版社



同寺子校电子信心关系列教材

光波技术基础

延凤平 任国斌 王目光 王春灿 编著
裴 丽 宁提纲 谭中伟 李唐军

清华大学出版社
北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据现代光通信和光传感技术的需求,较深入和系统地论述了光纤和光电子器件的有关理论和技术。本书由10章组成,内容涵盖了光通信技术的发展,若干基础技术手段和器件,光纤的基本理论、传输特性及制造工艺,无源光器件,光纤光栅,激光器,电光调制器,光探测器,光纤放大器和光纤测量等知识。本书在内容上强调系统性、可读性、先进性和实用性,深入浅出进行启发式阐述,注重物理概念与实际应用相结合。

本书可作为高等院校通信工程及相关专业本科生、研究生的教材,也可作为从事光纤技术的科研工作者和工程技术人员的参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

光波技术基础/延凤平等编著. —北京:北京交通大学出版社:清华大学出版社,2019.1
(高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-5121-3758-5

I. ①光… II. ①延… III. ①光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第247402号

光波技术基础

GUANGBO JISHU JICHU

策划编辑:韩乐 责任编辑:付丽婷

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>
北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

印刷者:艺堂印刷(天津)有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm×260 mm 印张:24 字数:599千字

版 次:2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3758-5/TN·119

印 数:1~3 000册 定价:56.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

自 20 世纪 70 年代第一根低损耗光纤和可在室温下连续工作的半导体激光器问世以来, 光纤通信以其损耗小, 传输容量大, 质量小等特点迅速取代同轴电缆在全世界通信领域得到应用和普及, 形成了高速、大容量且具有自愈功能的光纤网络, 并在此基础上进一步建立了支持固定点通信和移动通信的可容纳各种速率数据和话音业务的现代信息网。正因为如此, 光纤通信被认为是 20 世纪人类最伟大的技术发明之一。

近 50 年的发展历程中, 光纤通信不仅在支持自身的技术上取得了巨大进步, 而且形成了遍布全球的支持各种信息业务传输的功能强大的光网络, 发挥出了极其巨大的经济效益和社会效益。光纤通信技术的进步是在激光器技术、光纤技术和光放大技术等不断取得突破的条件下实现的。在分布反馈激光器、量子阱激光器、掺铒光纤放大器、掺铋光纤放大器、拉曼光纤放大器、密集波分复用、光时分复用、色散管理、色散补偿、高阶多维调制及前向纠错、偏振复用和相干检测等技术的支持下, 实验室两根光纤可支持的数据速率已经达到 $100\sim 200\text{ Tbit/s}$, 商用的数据传输速率最高也可达到 Tbit/s 量级, 无电中继传输距离可达到上万 km , 从而为当今社会的信息传输提供了一个无限宽广的管道。但是光层交换技术没有取得突破, 在很大程度上限制了光纤网数据传输速率优势的发挥, 是目前阻碍光纤到户发展进程的主要原因之一。

现在, 光交换研究的热潮已经兴起, 并在某些方面(如基于可变波长激光器和可选波长光探测器的粗粒度光路交换、细粒度的光分组交换及介于两者之间作为过渡技术的光突发交换等)已经取得一定的进展。如果光交换技术获得突破和商用, 将会带来光信息网络的又一次革命, 克服电子瓶颈限制, 实现光通信网络高速交换, 促进光纤网络向深度和广度进一步发展, 为光纤到户、虚拟现实、高清电视、物联网和人工智能等应用提供技术支撑和保证。

本书是编者在多年从事本科生和研究生光波技术基础、光纤通信系统、光纤传感技术、光纤测量等课程教学和科研实践基础上形成的, 同时也参阅了大量有价值的参考文献。编写目的是力求教给学生一套较为完整的光通信技术方面的基础知识体系, 使学生既具备成熟的光通信基本理论, 又掌握当今光纤通信的新技术, 并了解其发展趋势。

本书分为 10 章, 第 1 章为绪论, 从光通信器件的发展及光纤通信系统的演进两个方面回顾了光通信技术的历史, 介绍了光通信系统的基础知识, 准同步数字体系和同步数字体系的特点, 以及数字光纤传输系统的构成及其性能, 简述了光通信技术的特点和展望。第 2 章为光纤波导理论基础, 从光波导的一般理论出发给出了模式的一般概念; 通过对阶跃折射率光纤矢量模和标量模的分析, 揭示了光纤中模式的特性、场分布规律及单模光纤的基本性质和模场特征参数。第 3 章为光纤传输特性, 对光纤中损耗的形成原因及表示方法, 光纤中色散分类、表示方法, 色散补偿和色散管理措施, 光纤中的非线性效应及抑制方法等进行了阐述。第 4 章为光纤制造技术与特种光纤, 分析和讨论了光纤的制作工艺、光缆结构及其特性, 并介绍了保偏光纤、稀土掺杂光纤、色散补偿光纤、光子晶体光纤、大模场面积光纤、多芯光纤与少模光纤等新型特种光纤。第 5 章为无源光器件, 包括连接器、衰减器、隔离器、光

环行器等基本器件，以及光纤耦合器、PLC 光耦合器、阵列波导光栅、光开关。第 6 章为光纤光栅的研究与应用，根据光纤光栅的工作原理，分别讨论了短周期光纤光栅和长周期光纤光栅的特性，并介绍了光纤光栅的制作方法及应用发展前景。第 7 章为激光器，对激光产生的条件及特性，半导体材料中的能带特性，PN 结形成，F-P 腔半导体激光器，动态单纵模激光器和发光二极管的特性进行了分析；对光纤激光器的构成、工作原理及特性进行了讨论。第 8 章为电光调制器和光探测器，探讨了单晶铌酸锂的线性电光特性及几种常用的铌酸锂调制器，介绍了光电二极管的典型结构，并进一步给出了三种高速光探测器和石墨烯光探测器。第 9 章为光放大器及其应用，分析了光放大的基本原理，介绍了半导体光放大器的构成及特性，分析了掺铒光纤放大器和拉曼光纤放大器的原理、构成及特性，并对光放大器技术进行总结和展望。第 10 章为光纤测量，主要介绍了损耗、色散、截止波长、模场直径和偏振模色散等光纤特性参数及光纤折射率分布的测量方法。

本书第 1 章由延凤平教授编写，第 2、3、4 章由任国斌教授编写，第 5 章由王春灿副教授编写，第 6 章由裴丽教授编写，第 7 章由王目光教授编写，第 8 章由宁提纲教授编写，第 9 章由谭中伟教授编写，第 10 章由李唐军教授编写。全书由延凤平教授统稿，并在内容上做了一定的增减和文字上做了一定的修饰加工。在编写过程中，得到了我国著名的光纤通信专家、中科院院士简水生教授多方面的精心指导和关怀，同时得到了北京交通大学光波技术研究所全体教师和学生的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，编者学识水平有限，书中一定还会存在不少缺点、错误和疏漏，恳请读者批评指正，以便于本书今后的修改和完善。

编 者

2018 年 10 月于北京交通大学光波技术研究所

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光通信技术的发展	1
1.1.1 光通信器件的发展	2
1.1.2 光纤通信系统的演进	3
1.2 光通信基础	5
1.2.1 复接与分插	5
1.2.2 准同步数字体系与同步数字体系	6
1.2.3 数字光纤通信系统	7
1.3 光通信技术优势和特点	9
1.4 光通信技术未来展望	10
习题	11
第 2 章 光纤波导理论基础	12
2.1 光纤的基本结构与分类	12
2.1.1 光纤的基本结构与导波原理	12
2.1.2 全反射相移、穿透深度和 Goos-Hänchen 位移	16
2.1.3 光纤折射率分布的类型	21
2.1.4 单模光纤与多模光纤	23
2.2 光波导的一般理论	24
2.2.1 光波导的一般理论与性质	24
2.2.2 模式	27
2.3 阶跃折射率光纤	32
2.3.1 概述	32
2.3.2 矢量模	34
2.3.3 标量法与线偏振模	37
2.3.4 阶跃折射率光纤的模式求解	40
2.4 单模光纤	63
2.4.1 概述	63
2.4.2 单模光纤的基本性质	64
2.4.3 功率限制因子、模场直径与有效面积	67
习题	72
第 3 章 光纤传输特性	75
3.1 光纤损耗	75
3.1.1 光纤损耗概述	75
3.1.2 光纤损耗的种类及特点	76

3.1.3	弯曲损耗	80
3.1.4	光纤损耗性能的改善技术	82
3.2	光纤色散	83
3.2.1	色散概述	83
3.2.2	光脉冲的色散展宽	89
3.2.3	单模光纤中的色散	97
3.2.4	光纤的分类与 ITU-T 建议	101
3.3	光纤中的非线性效应	105
3.3.1	非线性传输方程	106
3.3.2	自相位调制	113
3.3.3	交叉相位调制	117
3.3.4	四波混频	122
3.3.5	受激非弹性散射	127
3.3.6	光纤中的光学孤立子	130
	习题	133
第 4 章	光纤制造技术与特种光纤	135
4.1	光纤制造技术及光缆	135
4.1.1	光纤制造技术	135
4.1.2	光缆	139
4.2	特种光纤	141
4.2.1	特种光纤概述	141
4.2.2	保偏光纤	142
4.2.3	稀土掺杂光纤	144
4.2.4	色散补偿光纤	146
4.2.5	光子晶体光纤	147
4.2.6	大模场面积光纤	150
4.2.7	多芯光纤与少模光纤	152
	习题	157
第 5 章	无源光器件	158
5.1	概述	158
5.2	基本无源光器件	158
5.2.1	连接器	158
5.2.2	衰减器	161
5.2.3	隔离器	164
5.2.4	光环行器	167
5.2.5	波分复用器	168
5.3	光纤耦合器	170
5.3.1	X 型 (2×2) 光纤耦合器的基本工作原理	171
5.3.2	X 型 (2×2) 光纤耦合器制作方法	172

5.3.3	X 型 (2×2) 光纤耦合器的指标	172
5.3.4	光纤熔融拉锥耦合器的应用实例	173
5.3.5	光纤熔融拉锥耦合器用于波分复用	174
5.3.6	光纤熔融拉锥耦合器用于构成马赫-曾德尔干涉仪	176
5.4	PLC 光耦合器	177
5.4.1	PLC 光耦合器的分类	178
5.4.2	$1\times N$ PLC 光分路器的工作原理	178
5.4.3	PLC 光分路器的制作工艺	180
5.4.4	PLC 光分路器主要指标	181
5.5	阵列波导光栅	182
5.5.1	AWG 的发展现状	182
5.5.2	AWG 的基本工作原理	183
5.5.3	AWG 的性能指标	183
5.6	光开关	184
5.6.1	光开关的分类	185
5.6.2	光开关的特性参数	186
5.6.3	液晶光开关	187
5.6.4	MEMS 光开关	188
	习题	190
第 6 章	光纤光栅的研究与应用	191
6.1	引言	191
6.1.1	光纤光栅的发展历程	191
6.1.2	光纤光栅的主要应用	193
6.2	光纤光栅的分类和工作原理	194
6.2.1	光纤光栅的分类	194
6.2.2	光纤光栅的工作原理	197
6.3	光纤光栅的制作方法	198
6.3.1	光纤光栅制作的基本条件	198
6.3.2	短周期光纤光栅的制作方法	199
6.3.3	长周期光纤光栅的制作方法	202
6.3.4	逐点写入法制作光纤光栅的意义和进展	204
6.4	光纤光栅的特性	206
6.4.1	短周期光纤光栅的光谱特性	206
6.4.2	短周期光纤光栅的时延特性	210
6.4.3	长周期光纤光栅的光谱特性	212
6.5	光纤光栅的应用和展望	213
6.5.1	光纤光栅色散补偿	213
6.5.2	基于光纤光栅的各类器件	214
6.5.3	光纤光栅传感	214

6.5.4 光纤光栅主要新技术和发展前景	215
习题	216
第7章 激光器	217
7.1 激光的物理基础	217
7.1.1 光纤通信系统对光源的要求	217
7.1.2 激光	218
7.1.3 激光器的工作原理	219
7.1.4 激光器的基本组成	226
7.2 半导体激光器	228
7.2.1 半导体材料的光电子学特性	229
7.2.2 F-P腔半导体激光器	238
7.2.3 动态单纵模激光器	247
7.2.4 发光二极管	253
7.3 光纤激光器	256
7.3.1 光纤激光器的主要特点和分类	257
7.3.2 光纤激光器的工作原理和基本结构	261
7.3.3 稀土掺杂光纤激光器	264
7.3.4 光纤激光器的研究方向和应用前景	269
习题	274
第8章 电光调制器与光探测器	275
8.1 电光调制器	275
8.1.1 单晶铌酸锂线性电光特性	276
8.1.2 电光相位调制器	278
8.1.3 马赫-曾德尔调制器	279
8.1.4 高速电光调制器的设计	286
8.2 光探测器	288
8.2.1 概述	289
8.2.2 光探测器的基础理论	289
8.2.3 光探测器的材料体系	292
8.3 光电二极管的典型结构	292
8.3.1 PIN光电二极管	292
8.3.2 MSM光探测器	294
8.3.3 APD光电二极管	295
8.4 高速光探测器	296
8.4.1 单行载流子光电二极管	296
8.4.2 边入射及倏逝耦合波导光电二极管	297
8.4.3 行波光探测器	298
8.5 光探测器新材料	299
8.5.1 石墨烯光探测器	299

8.5.2 小结	303
习题	303
第 9 章 光纤放大器及其应用	305
9.1 使用光纤放大器的必要性	305
9.2 半导体光放大器	306
9.2.1 半导体光放大器的结构和特点	306
9.2.2 半导体光放大器的主要性能参数	309
9.2.3 半导体光放大器的应用	313
9.3 掺铒光纤放大器	317
9.3.1 掺铒光纤放大器的发明和历史意义	317
9.3.2 掺铒光纤放大器的基本理论基础	317
9.3.3 掺铒光纤放大器的基本结构	320
9.3.4 掺铒光纤放大器的主要特性参数	321
9.3.5 级联放大器	324
9.4 拉曼光纤放大器	327
9.4.1 拉曼光纤放大器的发明和特点	327
9.4.2 拉曼光纤放大器的原理	328
9.4.3 拉曼光纤放大器的主要特性	329
9.4.4 拉曼光纤放大器的现状	331
9.5 总结和展望	332
9.5.1 光放大器的问题与发展	332
9.5.2 全光再生的进展	333
习题	334
第 10 章 光纤测量	336
10.1 光纤损耗测量	336
10.1.1 剪断法	337
10.1.2 插入法	337
10.1.3 背向散射法	338
10.2 光纤色散测量	340
10.2.1 相移法	341
10.2.2 干涉法	342
10.2.3 脉冲时延法	343
10.3 光纤截止波长测量	344
10.3.1 传输功率法	344
10.3.2 模场直径法	345
10.4 光纤模场直径测量	345
10.4.1 远场扫描法	347
10.4.2 可变孔径法	348
10.4.3 近场扫描法	349

10.5 光纤偏振模色散测量.....350

10.5.1 斯托克斯参数评价法350

10.5.2 偏振态法351

10.5.3 干涉法352

10.5.4 固定分析法353

10.6 光纤折射率分布测量.....354

10.7 实验报告.....355

10.7.1 OTDR 测量光纤损耗实验报告355

10.7.2 光纤通信软件仿真实验报告355

习题356

附录 A 模式正交性的证明.....357

附录 B 正向模与反向模关系的证明.....359

附录 C 矢量模场求解过程360

附录 D 矢量模表达式.....363

参考文献.....366

第 1 章 绪 论

通信是将信息从源头传送到目的地的过程，它由发送端、传输通路和接收端三个部分组成。为了提高信息传输的有效性和可靠性，需要将被传送的信息调制到一个载波上进行传输。根据传输链路所采用媒质的特点，发送端和接收端对所需要传送的信息进行对应的编解码和校验处理。从电通信系统的研究中发现，被传送信号的带宽与载波频率成比例，通常可达载波频率的百分之几。若想将大容量的信息从源头高速传送到目的地，就必须提高载波的频率。图 1-0-1 为电磁波频谱图。从图 1-0-1 中可知，光波频率位于高频端，因此人们自然而然地想到通过将通信载波频率从射频、微波及毫米波波段转移到光波波段，可成数量级地提高单载波传输信号的能力。以光波为载波载运信息所实现的通信就是光通信。

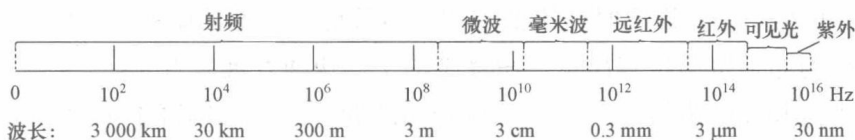


图 1-0-1 电磁波频谱

但是，采用什么媒质可有效传输光信号呢？这是科研人员必须解决的首要问题。人们自然而然想到了大气。但是，光信号在大气中传输时会发散，同时大气中尘埃粒子对光的散射也会使传输损耗剧增。因此，随着传输距离的增加，接收端光探测器接收到的光功率将会迅速降低，最终导致接收机工作异常。基于这个原因，以大气为传输媒质实现长距离的光信号传输是不可行的。能否制作一种波导，如同轴电缆一样将光信号约束在一定尺寸的范围内并可以有效地进行传输呢？在解决这个问题时，人们想到了石英玻璃。因为当时能够找到的由天然石英砂提纯后所制成的玻璃具有优异的透光能力，而且根据几何光学的基本原理，当光的入射角大于临界角时，光在两种折射率媒质的交界面上会发生全反射。对于利用两种折射率仅有微小差异的纯石英材料制成的圆柱形波导（其中内层媒质的折射率略高于外层媒质的折射率），注入到其内层媒质的光信号就可以在内外层媒质的交界面上不断地发生全反射并向前传输。这种媒质就是最早的光纤。以光波载运信息，用光纤作为传输媒质实现的通信就是光纤通信。

1.1 光通信技术的发展

从广义上说，凡是以光波载运信息所进行的通信都可称为光通信，光通信的历史可追溯到远古时代。有历史记载，在我国距今 2 000 多年前的周朝，就有周幽王烽火戏诸侯的故事。只不过那时人们仅仅是用燃灭篝火来传递有无敌情的信息（“1”“0”信号）。秦始皇修建的万里长城及其他边关要塞也以烽火台的形式将这种通信技术传承下来。到 18 世纪末，航海中普

遍采用灯语和旗语在可视距离内传递信息。1880年，贝尔发明了光电话，由此极大地丰富了光通信中能所传递的信息。但是，由于没有可供使用的有效的光源和传输媒质，几千年来光通信几乎没有取得进展。

19世纪30年代电报的出现开启了电信时代，利用新的代码技术（如莫尔斯码），传输速率提高到 $3\sim 10\text{ bit/s}$ ，利用中继站后可进行长距离（约 $1\,000\text{ km}$ ）的通信。电信号通过连续变化电流的模拟形式来传送，这种模拟电通信技术支配了通信系统长达100年左右。

20世纪初，随着人们生活和交往范围的急速扩展，对信息的需求也日益增长。此时，电话网在全球迅速建立，并使用同轴电缆代替双绞线极大地提高了系统容量和通话质量。第一代同轴电缆传输系统于1940年投入使用。但在当时的技术条件下，由于同轴电缆传输损耗随着载频的提高而迅速增加，因此其带宽也受到了很大的限制。这种限制促使微波通信系统出现并迅速发展。在微波通信系统中，利用频率为 $1\sim 10\text{ GHz}$ 的电磁载波及合适的调制技术传递信号，其理论上的带宽可达 100 MHz 量级。最早的微波通信系统载频为 4 GHz ，于1948年投入运营。此后，同轴和微波通信系统虽然都得到了较大的发展，但由于这种通信系统的带宽受载波频率的限制，允许同时使用的用户数量又受到带宽的限制，再加上系统成本极高，因此分摊到用户的通话费用极其昂贵，严重制约了其快速发展和普及。

工作于毫米波和亚毫米波通信频段的铜制圆波导一度被人们寄予希望，但由于这种波导对材料的纯度及制作工艺要求苛刻，而且要在野外长距离敷设，技术上实现极其困难。即使这种波导能够研制成功，系统也能够开通，但是由于造价昂贵，不可能被推广使用。基于上述原因，光通信再次受到人们的关注和期盼。

1.1.1 光通信器件的发展

1.1.1.1 低损耗光纤

20世纪60年代初期，基于天然石英砂提纯石英制作的光纤最低传输损耗为 $1\,000\text{ dB/km}$ 。也就是说，采用这种光纤每传输 1 km 的长度，光功率将降低为原来的 10^{-100} 。显然，这种光纤不可能作为光传输媒质使用。正当人们为解决这一问题苦苦寻找出路时，1966年7月，工作于英国标准电信研究所的英籍华人高锟博士与他的同事霍克曼博士在 *Proc. IEE.113* 上撰文指出，如果充分提纯制作光纤的材料，将光纤中的过渡金属离子和 OH^- 离子的含量降低到足够小，并采用弱导模式，光纤的传输损耗有望降低到 20 dB/km 。这是一个划时代的预言，在光纤通信史上具有里程碑的意义。在这一理论的指导下，1970年美国康宁玻璃公司在世界上首次研制成传输损耗为 20 dB/km 的光纤，即采用这种光纤每传输 1 km 的长度，光功率将下降到原来的 10^{-2} ，达到了当时最佳同轴电缆的传输损耗水平。此后，在研究人员的不断努力下，光纤的传输损耗逐步下降，1973年降低到 4 dB/km ，1979年在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段光纤的传输损耗降低到 0.2 dB/km ，几乎达到石英光纤损耗的理论极限。现在， $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段普通通信用单模光纤的传输损耗均小于 0.18 dB/km ，纯石英纤芯光纤的传输损耗小于 0.15 dB/km 。这为光通信提供了可靠的低损耗传输媒质，为光纤通信的发展奠定了基础。

1.1.1.2 室温下可连续工作的半导体激光器

光源是光通信系统中的另一个关键器件。作为光通信系统中的光源,首先要求其不仅具有稳定的工作波长,而且还具有窄的谱线宽度,由此可支持高速调制和允许长距离传输;其次还必须具有体积小、寿命长、价格低、耗电低等特点。研究人员在设法降低光纤传输损耗的同时,相继开展了适合于光通信的光源——半导体激光器的探索工作。

1960年梅曼发明了红宝石(固体)激光器,这给予了探索光通信光源的研究人员以极大的鼓舞。1962年,可在低温(液氮)下脉冲工作的GaAs半导体激光器研制成功,其工作波长为 $0.87\mu\text{m}$ 。到了20世纪70年代,可在常温下连续工作的GaAsAl异质结半导体激光器研制成功,其工作波长为 $0.85\mu\text{m}$ 。此后,经过工艺上的不断改进,可室温下长时间连续工作的GaAsAl和InGaAsP异质结半导体激光器研制成功。到目前为止,半导体激光器的性能有了极大的提高,其寿命可达 10^8h ,输出光功率可达 10mW 量级,波长谐调范围可达 100GHz ,线宽可达 $0.1\sim 10\text{MHz}$ (外腔激光器可达几十kHz)。与此同时,光探测器技术也已成熟,从而为光通信走向实用化奠定了光源和光探测器方面的基础。

1.1.1.3 高速光调制器

光调制器是光通信系统中的关键器件之一,它的调制速率直接决定了整个光通信系统的传输速率。随着光调制器制作工艺水平的提高,调制速率显著提高,同时促进了光通信系统的更新换代。

20世纪60年代,随着单晶生长技术的进步,出现了具有极大电光转换效率和极低损耗的铌酸锂(LiNbO_3)晶体材料,基于 LiNbO_3 的直波导、Y波导和M-Z型波导的相位和强度调制器也随之出现,调制速率从几十Mbit/s提高到现在的几十Gbit/s。

电吸收(EA)调制器是一种在电脉冲信号控制下将激光器输出的连续光信号转化为高速脉冲光信号的外调制器,分为基于Franz-Keldysh效应的体材料型和基于量子约束Stark效应的多量子阱结构两种形式。电吸收调制器具有体积小、噪声低、驱动电压低和易于与其他器件集成等优点,目前商用电吸收调制器可支持的调制速率已达 $40\sim 100\text{Gbit/s}$ 。

1.1.2 光纤通信系统的演进

随着光纤、激光器、光探测器与光调制器走向成熟并逐步实用化,20世纪70年代诞生了光纤通信。第一代商用光纤通信系统于1975年敷设于美国亚特兰大,其工作波长为 $0.85\mu\text{m}$,传输速率为 45Mbit/s ,最大中继距离约 10km ,最大通信容量约 $500\text{Mbit}/(\text{s}\cdot\text{km})$ 。虽然是第一代的光纤通信系统,但与同时期的同轴通信系统相比,其中继距离长、容量大、投资及维护费用低,初步显示了光纤通信的优越性。

在对光纤损耗谱曲线的研究过程中人们发现,与 $0.85\mu\text{m}$ 的工作波段相比,在 $1.30\mu\text{m}$ 的工作波段石英光纤不仅同时具有传输损耗低和色散小的优点,而且具有较长的中继距离。由此推动了 $1.30\mu\text{m}$ 波段的InGaAs半导体激光器和光探测器的研究工作。至1977年,工作波长位于 $1.30\mu\text{m}$ 波段的InGaAs半导体激光器和光探测器被研制成功。到20世纪80年代初,工作波长位于 $1.30\mu\text{m}$ 波段,中继距离超过 20km 的第二代光纤通信系统问世,但由于其使

用多模光纤作为传输媒质，模间色散的影响使该系统的传输速率被限制在 100 Mbit/s 以下。

随着对光纤模式理论和色散特性研究的深入，人们逐渐认识到，单模光纤与多模光纤相比，由于没有模式色散，因此其色散值大幅度降低。而且在 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 附近，石英单模光纤具有零色散，于是人们自然想到采用单模光纤可以克服多模光纤由于模式色散而导致的对系统传输速率的限制。1981 年，实验室环境下实现了传输速率为 2 Gbit/s，传输距离为 44 km 的单模光纤传输系统，并很快推向商业应用。1987 年，工作波长为 $1.30\text{ }\mu\text{m}$ 的基于单模光纤的第二代光纤通信系统开始投入商业运营，其传输速率高达 1.7 Gbit/s，中继距离约 50 km。

由于石英单模光纤在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段具有更低的损耗值（低于 0.2 dB/km ），因此 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段的光纤通信系统自然引起了人们强烈的兴趣。但是由于 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段的石英单模光纤具有较高的色散，而且当时多纵模同时振荡的常规半导体激光器的谱展宽问题尚未解决，这两个因素推迟了第三代光纤通信系统的出现。至 1990 年，随着 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段单纵模激光器器件技术水平的提高和产品性能的完善，工作于 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段，传输速率为 2.5 Gbit/s 的第三代光纤通信系统已能提供商业业务。

与此同时，日本的研究人员经过长期的研究发现，通过特殊设计光纤的折射率剖面曲线，可以将单模光纤的零色散点由 $1.30\text{ }\mu\text{m}$ 移动到 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ，这就是色散位移光纤。利用这种光纤可以在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近同时获得零色散和低损耗。1985 年通过 DSF 的传输试验表明，其传输速率可达到 4 Gbit/s，中继距离超过 100 km。

随着掺铒光纤放大器（erbium-doped fiber amplifier, EDFA）和波分复用（wavelength division multiplexing, WDM）技术的逐步成熟并走向商用化，以 EDFA 作为中继器对光信号进行功率放大，由此既解决了光/电/光（O/E/O）中电子瓶颈对通信系统传输速率的限制问题，又降低了系统的成本。WDM 及密集波分复用（dense wavelength division multiplexing, DWDM）技术成百上千倍地提高了由两根光纤所组成的光纤通信系统的容量，实现了高速超长距离的光信号传输。这就是第四代的光纤通信系统。但是，随着单信道数据传输速率和信道数量的提高，光纤色散和非线性的问题显得越来越严重，各种色散补偿、色散管理技术相继出现。同时，对光时分复用（optical time-division multiplexing, OTDM）技术的研究也逐渐深入。在上述相关技术的支持下，加上已铺设的通信光缆中光纤对的数量又相当巨大，光纤通信系统潜在的容量已经达到海量级。2010 年，实验室采用两根光纤已经可以实现 10.92 Tbit/s 数字信号的双向传输。按每个数字话路为 64 kbit/s 来计算，则可开通 17 000 万数字话路。在实用化系统中，也已开通了 $160\times 10\text{ Gbit/s}$ 的 WDM 系统，相当于 1 920 万数字话路。可以说，20 世纪 90 年代初期 EDFA 的问世和 20 世纪 90 年代中期 WDM（DWDM）技术的应用引起了光纤通信领域的重大变革。

但是，迄今为止在光纤通信领域所产生的技术进步仅仅解决了光信号高速、大容量、长距离传输的问题，作为光纤通信系统的重要组成部分——光交换的问题仍然在研究过程中，虽然在某些技术细节上取得了突破，但是整体上来说目前还没有找到确实可靠的解决方案。如果这一问题得到完美的解决，则以全光交换为技术支撑的第五代光纤通信系统就会问世。届时光器件的价格将大幅度下降，无限宽广、畅通无阻的信息高速公路将会建成，目前困扰人们的网络安全问题也将会得到很好的解决，人们渴望已久的光纤到户将会成为现实。

光通信从诞生到现在 40 余年的时间内经过了如此迅速的发展历程，取得了辉煌的成就，产生了巨大的经济效益和社会效益，奠定了其信息社会基石的地位。

1.2 光通信基础

如前所述，光纤通信系统具有很宽的频带资源，可传输高速大容量的信息，而 1 个普通的音频数字话路仅占用 64 bit/s 的速率，由两根光纤组成的双向光纤通信系统仅仅传输 1 个音频数字话路显然极不经济。即使是以 1 个光载频承载 1 个音频数字话路也很不经济，这就需要研究并采用合理的复接（分插）技术和复用（解复用）技术，使得在确保通信可靠性的前提下提高其有效性。

在电的通信系统中通常采用时分复用（time division multiplexing, TDM）和频分复用（frequency division multiplexing, FDM）两种复用技术。这两种技术在光通信系统中同样适用，只不过由于光通信系统中所采用的光源可能工作于单一频率，因此以波分复用（wavelength division multiplexing, WDM）技术代替了电通信系统中的频分复用技术。通常的做法是先将低速电信号以一定的格式复接成为高速的电信号，并调制到一个光载频上。如果有可能，还需要将调制到同一个光载频上的光信号以一定的格式进行 OTDM，以形成更高速的光信号。然后，将更高速的光信号以一定的格式进行波分复用，形成大容量高速率的光信号，并耦合进入光纤中传输。在接收端采用相反的方式进行解复用和分插，将低速的电信号恢复出来。

1.2.1 复接与分插

TDM 的概念可以扩展到形成不同的群路等级，国际电报电话咨询委员会（CCITT，现名为国际电信联盟——ITU）曾作过规定，将多路编码数字话路按两种制式组成各种群路，群路分为基群、二次群、三次群等。在北美和日本，24 个音频话路复合为一个基群，其传输速率为 1.544 Mbit/s。在中国与欧洲，30 个音频话路复合为一个基群，其传输速率为 2.048 Mbit/s。为了便于在接收端将复合后的信号分开，在复合比特流中加入了额外的控制位，因此复合传输速率略大于 64 kbit/s 与复合话路数的乘积。将 4 个基群通过一定的格式复合成为 6.312 Mbit/s 和 8.44 Mbit/s 的二次群，继续这种步骤可获得更高的群路等级，这一过程被称为复接。在接收端需要实施相反的步骤对复接后的信号进行分解，并将低速支路信号恢复出来，这一过程被称为分插。表 1-2-1 所示为两种制式下 5 个不同群路的传输速率。

表 1-2-1 两种制式下 5 个不同群路的传输速率

群路级别	标准话路数			传输速率/（Mbit/s）		
	北美	欧洲	日本	北美	欧洲	日本
基群	24	30	24	1.544	2.048	1.544
二次群	96	120	96	6.312	8.448	6.312
三次群	672	480	480	44.736	34.368	32.046
四次群	1 334	1 920	1 440	90	139.246	97.728
五次群	4 032	7 680	5 760	274.176	565	396.200

1.2.2 准同步数字体系与同步数字体系

由表 1-2-1 可见, 同一等级的群路其数据传输速率不同, 在复用方法上, 除了低速率群路等级的信号, 其他等级的信号采用异步复用, 即通过插入一些额外比特使各路信号与复用设备同步并生成高速信号。这种复用系统称为准同步数字体系 (plesiochronous digital hierarchy, PDH)。PDH 早在 1972 年由 CCITT 提出初始建议, 1976 年和 1988 年两度被完善, 最终形成完整的体系。这种体系的缺点是: ① 缺乏统一的数字信号速率和结构标准, 设备间互不兼容; ② 缺乏标准的光接口规范, 各个厂家各自开发光接口, 导致设备间光接口无法互通, 从而限制了联网应用的灵活性, 并增加了其复杂性; ③ 复用与解复用结构复杂, 难以直接从高速信号中识别和提取出低速支路信号, 上下话路必须通过逐级分播、复用的方式实现, 如图 1-2-1 所示; ④ 网络的运行、管理和维护复杂, 设备的利用率低。

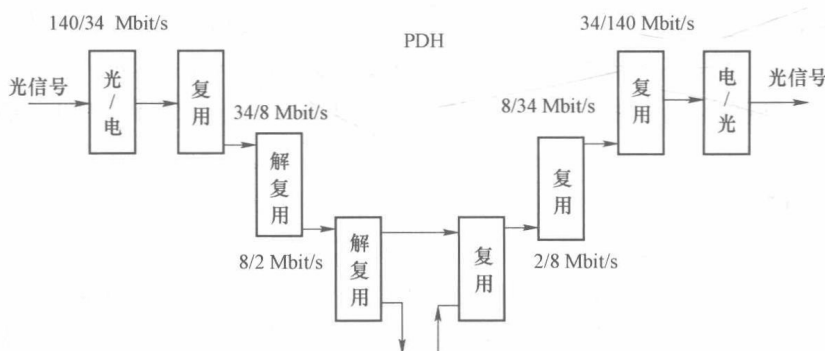


图 1-2-1 PDH 系统中上、下话路分插复用方式

为了克服上述 PDH 数字体系的缺点, 美国 Bell 实验室于 1984 年开始了同步信号光传输体系的研究, 1985 年美国国家标准研究研 (ANSI) 根据 Bell 实验室所提出的同步信号光传输体系构想委托 T1X1 委员会起草了同步信号光传输体系标准, 并命名为同步光网络 (synchronous optical network, SONET)。1986 年 CCITT 开始以 SONET 为基础制定同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH), 1988 年首次通过了 SDH 建议。

SDH 涉及传输速率网络结点接口、复用设备、网络管理、线路系统、光接口、信息模型、网络结构和抖动性能 8 方面的标准, 已成为不仅适于光纤也适于微波和卫星传输的通信技术体制。SONET 体系的基本模块传输速率为 51.84 Mbit/s, 相应的光信号称为 OC-1 (或 STS-1), 以 OC 代表光载频。SONET 体系的一个明显的特点是高等级群路信号的传输速率是基本 OC-1 传输速率 (51.84 Mbit/s) 的精确倍数, 因而 OC-12 为 622 Mbit/s, OC-48 为 2 488 Mbit/s, OC-192 为 9 953 Mbit/s。在 SDH 系统中, 最基本且最重要的模块信号是 STM-1, 其传输速率为 155.520 Mbit/s, 更高级的 STM-N 的信号是将基本模块信号 STM-1 按同步复用并经字节间插后的结果, 其中 N 为正整数。目前 SDH 只能支持 $N=1, 4, 16, 64$ 等几个等级。SDH 中上下话路通过分插复用 (add-drop Multiplex, ADM) 的方式实现, 如图 1-2-2 所示。