

# 第 1 章



## 光纤结构与基本表征

伴随着激光技术和光电子技术在应用领域的突破,光纤光学与光纤技术迅速发展起来,成为了高新技术领域的一个重要分支。光纤全称光导纤维,光纤及光纤技术在光纤传像、光纤照明与能量传输、光信号控制,特别是光纤通信、光纤传感、激光光源等民用与军用重要领域得到广泛应用,在信息科学和光子光学技术领域展现出强大的生命力以及广阔的应用前景。

本章通过介绍光纤光学的发展历史以及光纤技术的典型应用,展现光纤光学丰富的内涵,以及光纤技术对国民经济和人民生活的深刻影响。同时,通过介绍光纤的基本结构、光纤特征参数和光纤制备方法,建立学习光纤光学的基本概念,为后续章节的学习打下基础。

**本章重点内容:**

- (1) 了解光纤光学发展史。
- (2) 了解光纤通信、光纤传感和光纤激光光源的发展趋势及在国民经济中的作用。
- (3) 掌握光纤的结构和分类。
- (4) 理解并掌握光纤特征参数的概念。
- (5) 了解光纤的制备过程。

### 1.1 引言

光纤光学是以光纤为研究基础的一门科学。光纤光学是光子学中“信息光子学”的重要分支,也是一门覆盖面很广的学科:从光子源到传输链路,从信号放大到逻辑控制,从单元器件(无源或有源)到整个网络(骨干网或接入网),从通信应用到传感检测,几乎与光相关的领域都可以找到光纤的影子。

#### 1.1.1 光纤光学发展史

光纤光学的起源最早可以追溯到 19 世纪 70 年代,英国物理学家 Joan Tyndall 用实验验证了光可以在弯曲的水流中传播。该发现证明了光波的全内反射现象的存在,为光纤的发明奠定了理论基础。

1951 年,研究人员设计出第一个光导纤维镜,它可以用于传输人体内部器官的图像。1953 年,在伦敦皇家科学技术学院工作的 Narinder S. Kapany 开发出了用不同光学玻璃作芯和包层的光导纤维,这也就诞生了今天所用光纤的结构,“光纤”这个名词就是 Kapany 给

出的。但是,如果光纤要成为光导设备,必须能实现长距离传输,就有一个新的问题需要解决,即光衰减(随着光的传输,光的能量减小的现象)。

1966年,高锟博士在他的著名论文《光频率介质纤维表面波导》中首次明确提出,通过改进制备工艺,减少原材料杂质,可使石英光纤的损耗大幅下降,并有可能拉制出损耗低于20dB/km的光纤,从而使光纤可用于通信。1970年,康宁公司的 Rober Maurer、Donald Keck 和 Peter Schult 根据高锟博士的理论,首次采用化学气相沉积(chemical vapor deposition,CVD)工艺拉制出损耗小于20dB/km的光纤。1973年,美国贝尔实验室拉制的光纤的损耗降低到2.5dB/km。1974年,贝尔实验室将光纤损耗进一步降低到1.1dB/km。1990年,光纤的损耗已下降到0.14dB/km,这时的低损光纤的损耗已经接近石英光纤的理论衰减极限值0.1dB/km。

在应用方面,1978年,加拿大的 K. Hill 博士首次将光学反射镜以及滤波器写入光纤,开拓了光纤光栅的研究与应用。1980年,贝尔实验室首次在光纤中观察到了脉宽为7ps的光孤子,并提出将光纤中的光孤子用作传递信息的载体,构建一种新的光纤通信系统方案,该方案称为光孤子通信。20世纪80年代末期,波长为1.55 $\mu\text{m}$ 的掺铒光纤放大器被研制成功并投入使用,将光纤通信的波段移到光纤最低的损耗窗口,成为光纤通信发展史上另一个重要的里程碑。到20世纪90年代初,光纤通信容量扩大了50倍,速率达到2.5Gb/s。至2019年,全球铺设的海底光缆的总长度已经超过140万km,全部连起来可以绕地球35圈。到2021年,国际带宽使用量超过2500Tb/s。

光纤通信技术从最初的低速传输发展到现在的高速传输,已成为支撑信息社会的骨干技术之一,并形成了一个庞大的学科与社会领域。今后,随着社会对信息传递需求的不断增加,光纤通信系统及网络技术将向超大容量、智能化、集成化的方向演变,在提升传输性能的同时不断降低成本,为服务民生、助力构建信息社会发挥重要作用。

根据CRU(英国国家大气科学中心)披露的数据,2010—2018年,全球光纤产量增长显著,2017年,全球光纤产量为5.34亿芯千米,同比增长13.38%。2023年,全年全球光纤光缆需求量将达到6.5亿芯千米,同比增长7.8%。受益于光纤光缆需求的迅速增长,全球光棒行业发展同样迅猛,目前光纤预制棒在全球范围内供不应求,这推动了光纤预制棒扩产项目的进行。2012年,全世界光纤预制棒产量约9000t,2020年,受到疫情影响,产量略有下降。2021年,增长到约2万t,其中约1.5万t来源于亚洲和大洋洲。

中国光纤预制棒产量如图1.1.1所示,中国光棒行业产能从2014年的4271t增长到了2021年的13373t,2022年,我国光纤预制棒产量为13500t,同比增长0.95%;2023年产量约为13710t。随着5G网络建设的加快,光纤预制棒的需求将继续上升,预计2024年产量将达到13860t。

由于实际应用需求的牵引以及光纤技术的快速发展,光纤光学发展非常迅速,形成了众多研究领域和发展方向,按照不同的分类方法,可以归纳为:

(1) 从光纤波导来分,光纤可以分为普通光纤、特种光纤、光子晶体光纤和微纳光纤。近些年的研究热点也逐步深入到微纳尺度,以及与光子动力学有关的领域。

(2) 从技术层次上分,光纤技术可以分为光纤光缆、光纤器件、功能模块、光纤系统和光纤网络等。光纤网络包括了全光纤光子集成系统的研究,即基于全光纤化完成多路超高速光信息的发生、发射、传输、中继与分插接收等全部通信功能。

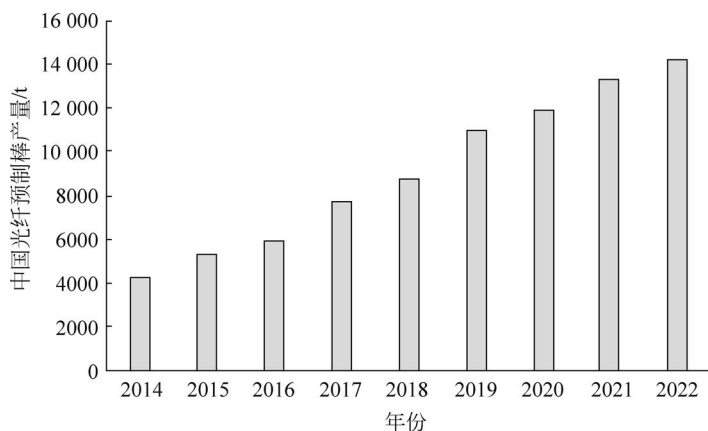


图 1.1.1 2014—2022 年中国光纤预制棒产量

(3) 从应用上分,光纤系统可以分为光纤光子源、光信息处理、光纤通信、光纤传感、微波光子学和光纤医学(或生物光子学)等。

### 1.1.2 光纤技术的应用

光纤技术已经渗透到国民经济和日常生活的各个方面,特别是在光纤通信、光纤传感和光纤光源三大领域取得了突破性的成就,深刻影响着社会的进步和人民生活质量的提高。光纤通信是用激光作为信息的载体,以光纤作为传输介质的一种高速实时通信方式。光纤传感以光纤作为信息传感和导光元件或二者兼备,以激光作为信息的载体,利用外界物理量变化直接或间接地改变光纤中光场振幅、相位、频率、偏振态或波长等参量的方式,实现对外界物理信息的精确快速感知。而光纤光源一般是指利用掺杂光纤作为增益介质实现的耐用高性能激光光源。接下来将分别介绍光纤通信、光纤传感和光纤激光光源系统,并重点阐述光纤光学原理和技术在其中的核心作用以及这些重要光纤系统的发展情况。

#### 1. 光纤通信

光纤通信是利用光波在光纤中传递信息的一种通信方式,属于有线通信的一种。光波经过调制(modulation)后便能携带信息。

光纤通信具有传输容量大、保密性好、抗干扰等许多优点。光纤通信现已成为最主要的有线通信方式。光纤通信系统的工作过程为:在发送端将需发送的信息输入发送机,将信息叠加或调制到作为信号载体的载波上,然后将已调制的载波通过光纤发送到远处的接收端,由接收机解调出原来的信息。根据信号调制方式的不同,光纤通信可以分为数字光纤通信和模拟光纤通信。

在过去的 30 年,互联网上每秒传送的比特量每 16 个月翻一番,骨干网光纤的传输带宽每 9~12 个月翻一番,连接带宽呈现出  $\text{Gb/s} \rightarrow \text{Tb/s} \rightarrow \text{Pb/s} \rightarrow \text{Eb/s} \rightarrow \text{Zb/s}$  的指数型增长趋势。作为网络信息传输基石的光纤通信网络,承载了全球 90% 以上的数据传输任务。其传输容量从  $8\text{Mb/s}$  到  $96\,100\text{Gb/s}$ ,提升了约 1200 万倍;传输距离从  $10\text{km}$  到  $3000\text{km}$ ,扩展了 300 倍;电交叉容量从  $64\text{Mb}$  到  $64\text{Tb}$ ,提高了 100 万倍;在器件成本方面, $1550\text{nm}$  光模块的成本从 2 万元降到 100 元,降低为原来的  $1/200$ 。《科学美国人》杂志曾评价:光

纤通信是第二次世界大战以来最有意义的四大发明之一,如果没有光纤通信,就不会有今天的互联网和通信网络。

当前各类信息技术都需要依靠通信网络来传递信息,光纤通信技术可以连接至各类通信网络,构成信息传输过程中的“大动脉”,并在信息传输中发挥重要作用。现代通信网络架构主要包括核心网、城域网、接入网、蜂窝网、局域网、数据中心网络与卫星网络等,不同网络之间的连接都可由光纤通信技术完成。如在移动蜂窝网中,基站连接到城域网、核心网的部分都是由光纤通信构成的。而在数据中心网络中,光互连是当前应用最广泛的一种方式,即采用光纤通信的方式实现数据中心内与数据中心间的信息传递。由此可见,光纤通信技术在现在的通信网络系统中不仅发挥着主干道的作用,还充当了诸多关键的支线道路的作用。可以说,由光纤通信技术构筑的光纤传送网是其他业务网络的基础承载网络。

#### 1) 光纤通信的演变历程

从 1960 年美国科学家希奥多·哈罗德·梅曼(Theodore Harold Maiman)发明第一台红宝石激光器解决了光源问题开始,人类逐步揭开了光纤通信的神秘面纱;1966 年,华裔科学家高锟提出了光导纤维作为信息传输介质的可行性;1970 年,美国康宁公司(Corning Incorporated)拉制出了第一根衰减为 20dB/km 的低损耗石英光纤;与此同时,美国贝尔实验室(Alcatel-Lucent Bell Labs)成功研制出室温下连续工作的双异质结半导体激光器。光纤和激光器的结合促使光纤通信技术从实验室研究进入到实用化工程应用,开启了人类通信史的新篇章。此后 50 年中,不断引入的新技术推动着光纤通信系统传输容量的持续提升,传输容量呈现每 10 年 1000 倍的爆炸式增长,发展速度前所未有的,其历程可大致分为 4 个主要时代,相关技术发展历程如图 1.1.2 所示。

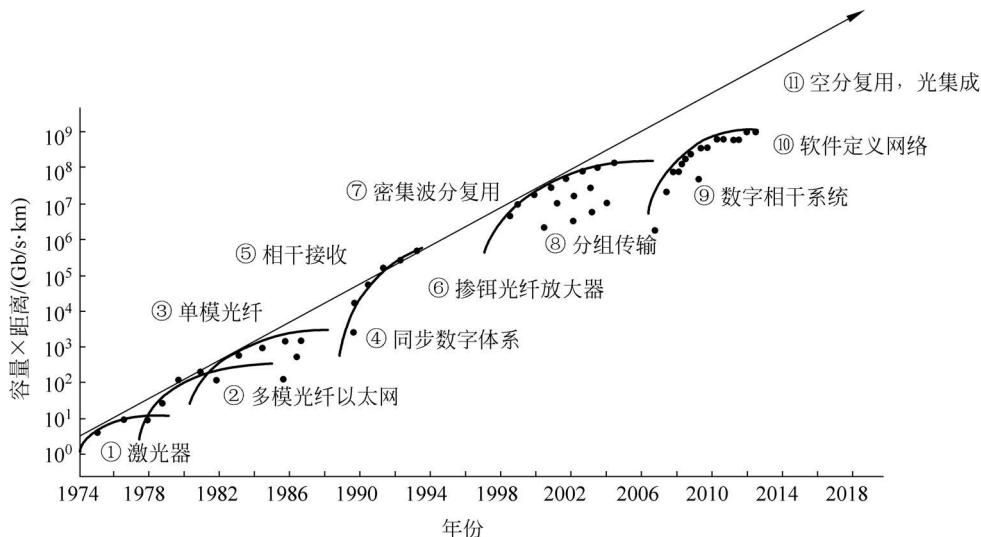


图 1.1.2 关键技术推动传输容量与距离的持续提升

第 1 个时代是逐段光电再生系统(1977—1995)。早期跨段式光电再生传输系统的容量取决于收发器的接口速率,无论是在商用系统还是实验研究中,接口速率的增长都非常缓慢。图 1.1.3(a)显示了商用系统中的接口速率大约每年提升 20%,而实验研究中的接口速率增长更慢,每年约为 14%。在这期间,主要采用时分复用(TDM)技术推动传输容量的提升,

从多模光纤到单模光纤,再到同步数字体系(SDH),系统容量约以每年 0.5dB 的速率增长。

第 2 个时代是放大的色散管理系统(1995—2008)。实用型掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier,EDFA)的发明堪称光纤通信史上的一个里程碑,它使得直接进行光中继的长距离高速传输成为可能,并促成波分复用(wavelength division multiplexing,WDM)系统的诞生。20 世纪 90 年代初,几项与 EDFA 中光纤非线性管理相关的核心发明,使得商用 WDM 系统容量从 20 世纪 90 年代中期到 21 世纪初以每年 100% 的速率显著增长,实验研究的增长速率比商用系统慢,为每年 78%,如图 1.1.3(a)所示。WDM 技术结合 EDFA 技术开启了光纤通信的新纪元,通过增加传输的信道数,传输容量呈现爆炸性增长,如图 1.1.3(b)所示。

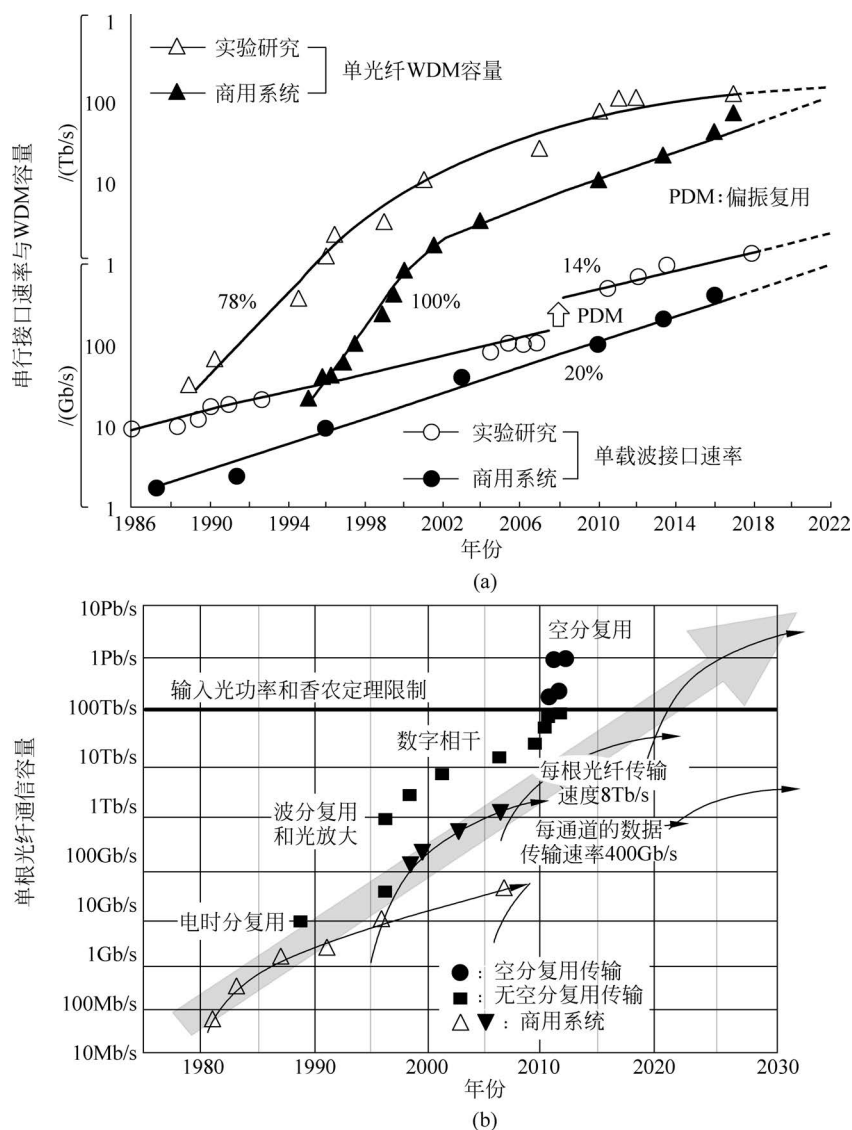


图 1.1.3 单载波接口速率和 WDM 容量,以及单根光纤通信容量

(a) 单载波接口速率和 WDM 容量; (b) 单根光纤通信容量演变图

第3个时代是放大的数字相干系统(2008—2014):数字相干接收技术的引入,使得基本被占满的频谱资源得到更好的利用,系统谱效率(spectral efficiency, SE)进一步提升, WDM 的传输容量持续突破,单信道 Tb/s 级传输系统陆续出现, WDM 传输系统容量持续增长至单纤 100Tb/s 左右。到 2020 年 6 月,两家美国电信公司创造了光纤传输距离的新纪录,开发和维护了一根 730km 的光纤线路,传输速率达到了 800Gb/s; 2020 年 8 月,来自英国伦敦大学学院的工程师刷新了一项通过单根光纤传输数据的新纪录,在 40km 距离上传输速度达到了 178Tb/s,比原纪录高 20%。

第4个时代是空分复用系统(2014 年至未来)。单模单纤 WDM 光传输系统容量提升受限于现有技术,光的幅度、时间/频率、正交相位和偏振 4 个物理维度已通过高阶调制格式、数字相干接收、偏振复用、频分复用等光传输技术被利用到接近极限。引入空间这一个还没有被利用的维度参数被认为是当前和今后一段时间内超大容量光传输的主要发展方向之一。模式复用和多芯复用等空分复用技术的相继出现,将使得光纤通信系统容量达到 Pb/s 量级或更高,如图 1.1.3(b)所示。

2020 年,日本国立信息技术与情报通信研究机构在世界光通信大会上报道了基于 38 芯 3 模的多芯少模光纤,结合 C+L 波段的波分复用技术,实现了高达 10.66Pb/s 的空分复用光传输世界纪录; 2021 年,日本的科学家实现了四芯光缆在 3001km 的距离以 319Tb/s 的速率传输数据,该团队使用了最新的放大技术(掺杂稀土元素,如铒、铥),以及分布式拉曼放大技术,其跨越了 S、C 和 L 三个信号波段; 2022 年 10 月,丹麦技术大学和瑞典哥德堡查尔姆斯理工大学的研究人员使用单个激光器和单个光学芯片实现了超过 1Pb/s 的数据速率,团队使用一个光源在 37 芯、7.9km 长的光纤上成功实现了 1.84Pb/s 的传输速率。

在国内,2019 年,中国信息通信科技集团利用自主研发的 19 芯单模多芯光纤实现了 1.06Pb/s 相干光 DFT-S(多频带离散傅里叶变换扩频)OFDM(正交频分复用)16QAM(正交幅度调制)大容量光传输,成为中国首个超 1Pb/s 的空分复用光传输系统。2021 年我国启动粤港澳大湾区超级光网络建设,总长度超过 160km,连接广州和深圳,正在打造目前世界上距离最长、容量最大的空分复用光通信“超级高速公路”,采用了自主研发的高性能 7 芯光纤光缆,2022 年中期阶段敷设的竣工,标志着我国多芯光纤向商业化迈上了新台阶。

## 2) 光纤通信的优势

从 20 世纪 70 年代初到现在,光纤通信技术能够得到迅速的发展,主要是由于它具有以下几点优势:

(1) 传输频带宽,通信容量大。通信容量和载波频率成正比,通过提高载波频率,可以达到扩大通信容量的目的。光波的频率要比无线通信的频率高很多,因此其通信容量也要大很多。光纤通信的工作频率为  $10^{12} \sim 10^{16}$  Hz,假设一个话路的频带为 4kHz,则在—对光纤上可传输 10 亿路以上的电话。目前采用的单模光纤的带宽极宽,因此用单模光纤传输光载频信号可获得极大的通信容量。

(2) 传输损耗小,中继距离长。传输距离和线路上的传输损耗成反比,即传输损耗越小,则无中继距离越长。目前,  $\text{SiO}_2$  光纤线路工作在  $1.55\mu\text{m}$  波长时,传输损耗可低于 0.2dB/km,系统最大中继距离可达 200km; 在采用光放大器实现中继放大的系统中,无电再生(不通过电子设备进行中继放大,无须将光信号转换为电信号再转换为光信号)最大中继距离可达 600km 以上。这样,在保证传输质量的前提下,长途干线上无电中继的距离越

长,则中继站的数目可以越少,这对于提高通信的可靠性和稳定性具有非常重要的意义。

(3) 抗电磁干扰的能力强。光纤是绝缘体材料,无电磁干扰。它不受自然界的雷电干扰、电离层的变化和太阳黑子活动的干扰,也不受高压设备等工业电器的干扰。此外,它可以与高压输电线平行架设或与电力导体复合构成复合光缆,如电力通信光缆、铁道通信光缆等。

(4) 无串音干扰,保密性好。光波在光缆中传输时很难从光纤中泄漏出来,即使在转弯处,弯曲半径很小时漏出的光波也十分微弱,若在光纤或光缆的表面涂上一层消光剂,效果会更好。这样,即使光缆内光纤总数很多,也可实现无串音干扰,在光缆外面也无法窃听到光纤中传输的信息。

此外,光纤纤芯细、重量轻,而且制作光纤的原材料很丰富。

由于光纤通信具有以上优越性,因此发展速度非常快,在信息社会中光纤通信占有非常重要的地位。

### 3) 提升光纤通信系统容量的关键技术

在早期光纤通信中,为了能传输多个信道的信号,常常依靠增加光纤数量来达到增加传输容量的目的。可这种方式会造成光纤带宽的浪费,同时使得维护成本大大增加。为了进一步提升光纤通信系统容量,需要从频率、时间、正交、偏振和空间 5 个物理维度努力(见图 1.1.4),各种复用技术应运而生。常见的复用技术有光波分复用技术、时分复用技术、正交幅度调制技术、偏分复用技术以及空分复用技术等。

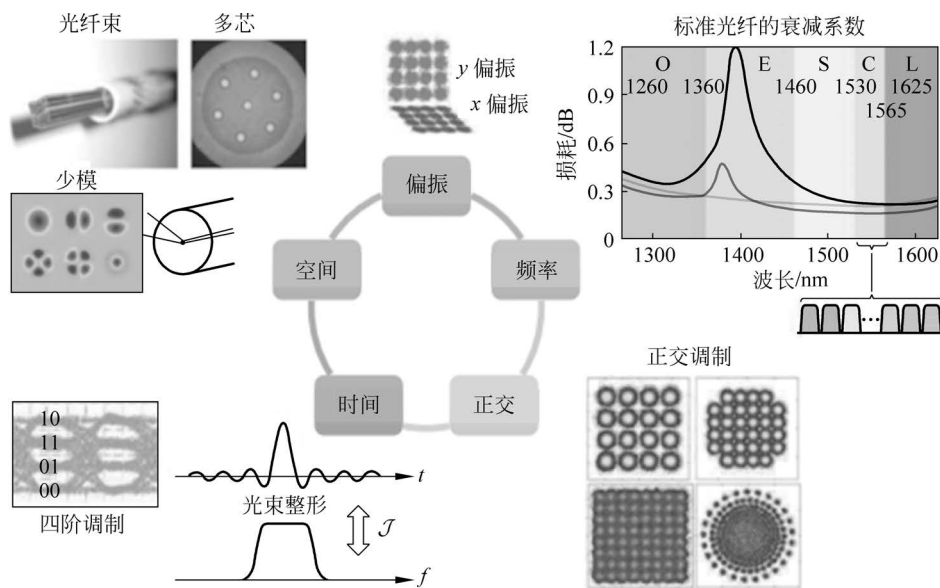


图 1.1.4 提升光纤通信系统容量的 5 个物理维度

#### (1) 光波分复用技术(WDM 技术)

光波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术是指利用光波长划分技术,将两种或多种不同波长的光载波信号(携带各种信息)在发送端经复用器汇合在一起,并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输的技术。在接收端,经过解复用器(demultiplexer)将各种波长的光载波分离,然后由光接收机做进一步处理以恢复原信号。光波分复用技术具有大容量、高速率和易扩展等优点,被认为是光纤通信技术的一次伟大革新。

根据波长间隔的疏密,波分复用可以分为密集波分复用(dense wavelength division multiplexing,DWDM)和稀疏波分复用(coarse wavelength division multiplexing,CWDM)。CWDM的波道间隔是20nm,波道数支持最大16个。DWDM的波道间隔为0.4nm或0.8nm左右。一般我们用的40波系统就是采用C波段波道间隔0.8nm,而80波系统一般采用C波段波道间隔缩小一半,即0.4nm,这时可容纳波道数量增加一倍。在80波不能满足容量要求的时候可以使用L波段。根据ITU-T(国际电联电信标准组织)G.692建议,WDM中心波长的偏差不超过信道间隔 $\pm 20\%$ 。

#### (2) 时分复用技术(TDM技术)

时分复用(time division multiplexing,TDM)技术是指在同一信道上利用不同的时隙来传递多路光脉冲信号(语音、数据或图像);在接收端再用同步技术,将各个时间段内的信号提取出来还原成原始信号的通信技术。

时分复用技术将多个通道的数字信息(低速率)以时间分割的方式插入同一个物理信道。复用之后的数字信息成为高速率的数字流,数字流由帧组成。帧定义了信道上的时间区域,在这个区域内信号以一定的格式传送。时分复用必须采取同步技术来使远距离的接收端能够识别和恢复这种帧结构。例如发送端在每帧开始的时候发送一个特殊的码组,而接收端利用检测这个特征码组来进行帧定位。特征码组(或称帧定位码组)按一定的周期重复出现。每一帧又包含若干个时间区域,该时间区域称为时隙(TS)。每个时隙在通信时被严格地分配给一个信道,即每个信道的数字信息是严格相等且时间上保持严格的同步关系。

TDM技术在一个共用信道上各路信号之间的传输相互独立,互不干扰。时分复用是建立在抽样定理的基础上的,抽样定理使连续的基带信号有可能被在时间上离散出现的抽样脉冲值所替代。这样,当抽样脉冲占据较短时间时,在抽样脉冲之间就留出了时间空隙,利用这种空隙便可以传输其他信号的抽样值。因此,就有可能沿一条信道同时传送若干个基带信号。

#### (3) 正交幅度调制技术(QAM技术)

正交幅度调制(quadrature amplitude modulation,QAM)技术是将调幅和调相结合调制方法,相比传统的相位调制信号(PSK)和幅度键控信号(ASK)具有更高的信息容量和频谱效率,特别是以8QAM(调制格式中有8个不同的符号)和16QAM(调制格式中有16个不同的符号)为代表的偏分复用信号被认为是用来承载下一代100G甚至400G网络中的标准信号格式之一。在长距离相干光通信系统中,8QAM和16QAM信号可以通过相干检测的方式进行有效接收,这有利于降低信息远距离传输的每比特成本。

#### (4) 偏分复用技术(PDM技术)

偏分复用(polarization division multiplexing,PDM)技术是指将传输波长的两个独立且相互正交的偏振态作为独立信道来分别传输两路信号,从而实现频谱利用率加倍(即系统带宽容量加倍),达到节约光纤资源的目的。

需要注意的是,在光纤通信系统中,光信号的偏振特性具有两面性:一方面可以使光纤通信系统受益,例如偏分复用技术使光纤通信系统传输容量加倍;另一方面,一些偏振效应又可以使在光纤中传输的光信号产生损伤,例如随机偏振旋转、偏振模色散、偏振相关损耗

等均会使光纤通信系统产生误码。因此,对光纤中偏振效应的研究是十分必要的。

#### (5) 空分复用技术(SDM 技术)

空分复用(space division multiplexing,SDM)技术顾名思义是指通过增加纤芯或模式的空间利用率来进一步增加光纤的通信容量。随着云计算、大数据、工业互联网、5G 无线等新一代信息技术的快速发展,全球互联网数据持续迅猛增长。光纤通信网络承载着全球互联网 90% 以上的数据传输流量,数据流量的激增对光纤通信网络造成了容量危机。通过扩展光纤的传输带宽,采用时分、波分、偏振复用和高阶调制等先进的通信技术,单模单芯光纤的传输容量已实现了高达 100Tb/s 的传输容量,但受到光纤非线性效应、放大器带宽和光纤熔断现象的限制,单芯光纤的容量已逼近香农传输极限。如何进一步挖掘光纤的传输容量潜力,是光纤通信技术研究领域的核心问题。

在各种突破单模光纤理论极限的新型传输技术中,空分复用技术有望从根本上避开单芯光纤的容量瓶颈,是未来宽带光通信网络的必由之路。空分复用是利用空间维度,将不同信道的信号通过空间维度进行复用并同时传输,通过在“同一条信息高速公路”中增加“车道”,光纤的传输容量随着纤芯或“车道”数量的增长而成倍增加,并同时能够兼容传统的复用及高阶调制技术,进而解决单芯光纤遇到的容量危机。

目前,空分复用技术的实现方式主要包括多芯光纤(multi-core fiber,MCF),少模光纤(few mode fiber,FMF)及少模多芯光纤(few mode multi-core fiber,FM-MCF)。空分复用技术通过利用多个平行空间信道,能够成倍提升系统传输容量,在容量提升空间上具有其他技术无法比拟的优势,适用于数据中心等空间敏感的应用场景。在空分复用技术的支持下,未来光纤通信容量将由 Tb/s 级向 Pb/s 级,甚至 Eb/s、Zb/s 级演变。

## 2. 光纤传感

光纤传感的发展始于 20 世纪 70 年代,是光电技术发展最活跃的分支之一。光纤传感技术以光纤作为信息传感和传输的介质,以激光作为信息的载体,利用外界物理量变化直接或间接地改变光纤中光场的振幅、相位、频率、偏振态或波长等参量的方式,实现对外界物理信息的精确快速感知。

光纤传感技术以抗电磁干扰、耐腐蚀、易集成、本质安全、精度高、绝缘等优势,被人们关注并广泛研究。目前,光纤传感技术主要分为分布式光纤传感和点式光纤传感两大类。分布式光纤传感主流技术包括基于拉曼散射的分布式光纤测温(DTS),基于布里渊散射的分布式温度和应变监测(BOTDA、BOTDR),基于瑞利散射效应的分布式光纤振动监测( $\Phi$ -OTDR、COTDR)和光频域反射计(OFDR),基于迈克耳孙(Michelson)、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder,M-Z)、塞格纳克(Sagnac)干涉原理的分布式振动监测等;点式光纤传感主流技术包括光纤光栅(FBG)、荧光光纤、F-P 腔传感器等。光纤传感技术可以检测的物理量包括温度、压力、流量、位移、振动、转动、弯曲、液位、速度、加速度、声场、电流、电压、磁场量及辐射等。

分布式光纤传感技术主要是基于光纤内的瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射效应以及双路或环路干涉原理。根据国内外当前光纤传感公司的产品与工程应用成熟情况的调研分析,目前的主要技术情况如表 1.1.1 所示。分布式光纤传感因其特有的长距离监测、工程施工便宜、精度高等特点,在大型长距离工程项目中应用优势明显。

表 1.1.1 分布式光纤传感的主要技术情况

| 技术名称                          | 技术原理                               | 关键指标(当前)                                                                                                                                                                                             | 物理量   |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| DTS 测温                        | 拉曼散射                               | 最高精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 测温范围为 $-190 \sim 700^{\circ}\text{C}$ , 定位精度为 $0.5\text{m}$ , 最大监测距离为 $30\text{km}$                                                                                | 温度    |
| 防区型光纤振动                       | Michelson、Mach-Zehnder、Sagnac 干涉原理 | 单防区最大探测距离为 $2\text{km}$ , 误报、漏报指标有待考核                                                                                                                                                                | 振动    |
| 定位型光纤振动 ( $\Phi$ -OTDR、COTDR) | 瑞利散射                               | 监测距离为 $120\text{km}$ , 定位精度为 $50\text{m}$ , 误报、漏报指标有待考核                                                                                                                                              | 振动    |
| DOTDA/BOTDR                   | 布里渊散射                              | 监测距离为 $60\text{km}$ (环路 $120\text{km}$ ), 定位精度为 $0.5\text{m}$ , 温度范围为 $-190 \sim 700^{\circ}\text{C}$ , 温度精度为 $0.5^{\circ}\text{C}$ , 应变范围为 $-4000 \sim 6000\mu\epsilon$ , 应变精度为 $\pm 20\mu\epsilon$ | 温度、应变 |
| 光频域反射计 (OFDR)                 | 瑞利散射                               | 最大监测距离为 $3\text{km}$ , 最高定位精度为 $0.5\text{mm}$ , 温度范围为 $-50 \sim 300^{\circ}\text{C}$ , 温度精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , 应变范围为 $\pm 13\,000\mu\epsilon$ , 应变精度为 $\pm 2\mu\epsilon$                   | 温度、应变 |

点式光纤传感技术主要是基于波长调制的光纤光栅 (FBG)、基于荧光效应的光纤荧光测温、基于 F-P 腔干涉原理的系列传感器。根据国内外当前光纤传感公司的产品与工程应用成熟情况的调研分析, 目前的主要技术情况如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 点式光纤传感的主要技术情况

| 技术名称     | 技术原理      | 关键指标                                                                                                        | 物理量              |
|----------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 光纤光栅     | 光纤周期折射率变化 | 波长范围为 $1510 \sim 1590\text{nm}$ 或 $1525 \sim 1565\text{nm}$ , 波长分辨率为 $0.5\text{pm}$ , 最大扫描频率为 $5\text{kHz}$ | 温度、应变、压力、位移、电磁场等 |
| 光纤荧光     | 荧光效应      | 测温范围为 $-40 \sim 200^{\circ}\text{C}$ , 测温精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$                                        | 温度               |
| F-P 腔传感器 | 光的干涉      | 温度精度为 $0.1^{\circ}\text{C}$ , 压力精度为 $3\text{psi}$ , 测压范围为 $0 \sim 20\,000\text{psi}$                        | 温度、压强、液位         |

注:  $1\text{psi}=6.895\text{kPa}$ 。

光纤传感技术以其特有的优势在军事、国防、航天航空、交通运输、工矿企业、能源环保、工业控制、医药卫生、计量测试、建筑、家用电器等众多领域有着广泛的应用前景。为了适应社会发展的需求, 小型化、多功能、高性能、低成本的光纤传感技术成为社会发展的必然趋势。

### 3. 光纤激光光源

激光器作为性能独特的能量光源, 是 20 世纪的重大发明之一。1998 年, 随着双包层光纤概念的提出和包层泵浦技术的发展, 光纤激光器输出能力大幅提升, 从此揭开了高能光纤激光光源的新篇章。光纤激光器凭借电光转换效率高、光束质量好、散热性好、性能稳定、结构紧凑、性价比高等优点, 广泛应用于工业加工、科学研究等领域, 并已成为激光技术发展主流方向和激光产业应用主力军, 同时也是世界各大国竞相发展的科技与战略要地。

光纤激光光源在很多方面优于传统的激光光源 (如  $\text{CO}_2$  激光器、棒状或板条固体激光器), 这主要体现在以下几个方面: 其一, 在激光增益过程中, 光纤的波导结构使得不符合波