

《光纤通信》第1章

《数据通信技术》

—第7章 光纤绪论

主讲：郑秋匀

系部：数据科学与工程系

办公室：逸夫楼413

E-mail:109345@qq.com

光纤通信-第1章 绪论

主要内容

- 1.1 光纤通信概念
- 1.2 光纤通信系统的基本单元
- 1.3 光纤通信的基本问题
- 1.4 光纤通信系统的主要性能指标
- 1.5 光纤通信技术的回顾和展望
- 1.6 课后巩固

重点： 光纤通信系统的概念、构成，光的特性，衰减及色散。
共**2**学时。

课前资料推送

- 1. 了解《数字中国发展报告》（2020年），过去的“十三五”中国已经取得的重要成就：
 - 信息基础设施建设规模**全球领先**
 - **全球规模最大的光纤网络**和4G网络
 - 5G网络建设速度和规模位居**全球第一**
 -
- 2. 了解“中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议”
http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm
 - 三、坚持**创新**驱动发展，全面塑造发展新优势
 - 十四、加快国防和军队**现代化**，实现富国和强军相统一

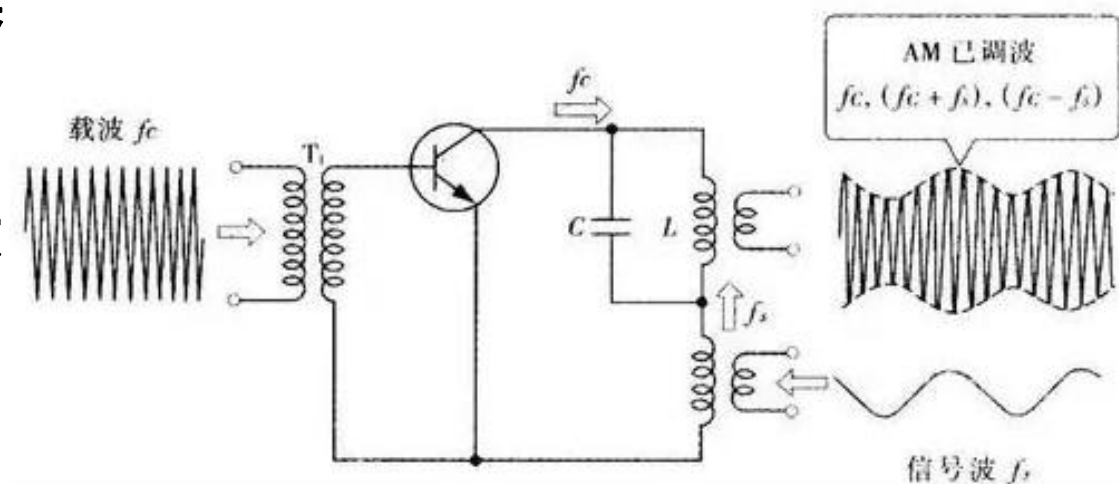
1.1 光纤通信概念

通信的定义

- 通信 communication是各种形式信息的有效传递
 - “通” 传送, “信” 信息
- 基本组成: 发送端、传输、接收端 (需要相应的技术设备和传输介质)

举例: 调幅广播及原理 AM收音机

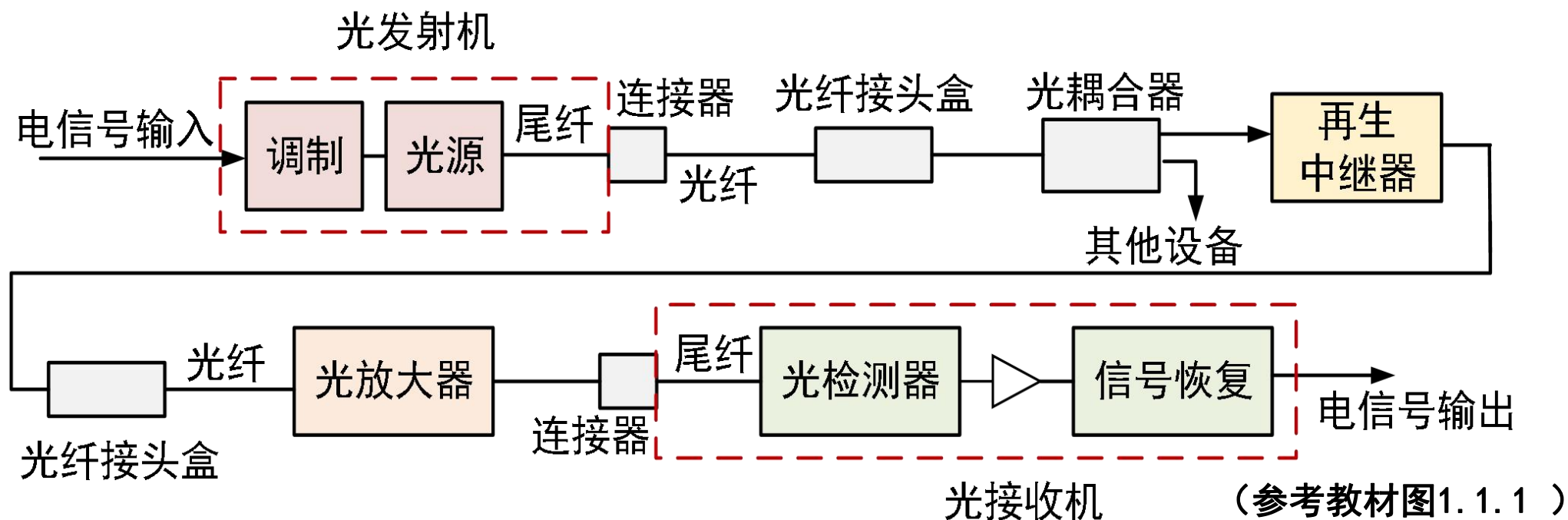
- 原理: 采用调幅方式进行的无线电广播
- 利用低频的声音信号去调整高频振荡的幅度, 高频振荡的幅度随着音频信号大小而变化, 就是调幅的原理



1.1.1 什么是光纤通信

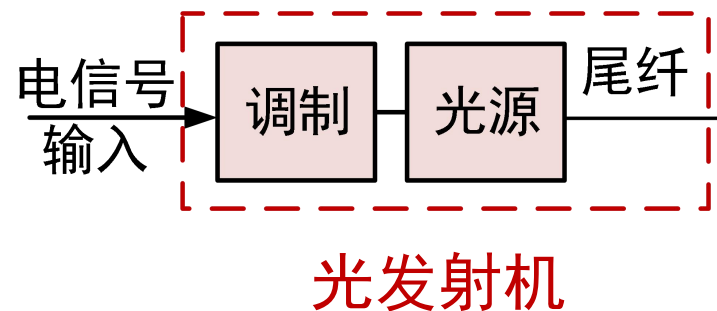
定义:

- Optical Fiber Communiation 光 纤 维 通 信
- 以光作为信息的**载体**，以光纤作为**传输介质**的一种通信方式



1.1.1 什么是光纤通信

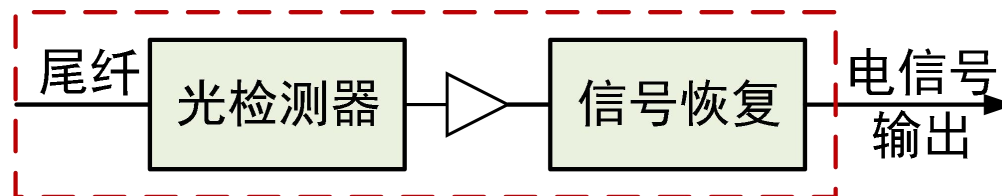
- 三个基本单元：光发射机，光纤，光接收机
- **光发射机**：电信号**转换**成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成，**光源**是其核心部件，由半导体发光二极管LED（Light Emission Diode）或者激光二极管LD（Laser Diode）构成；
- **作用**是完成将电信号转换成光信号
- **部件**：
 - ① 半导体光源
 - ② 调制电路
 - ③ 保护电路
 - ④ 光电路编码等
- **核心部件**是：半导体光源



1.1.1 什么是光纤通信

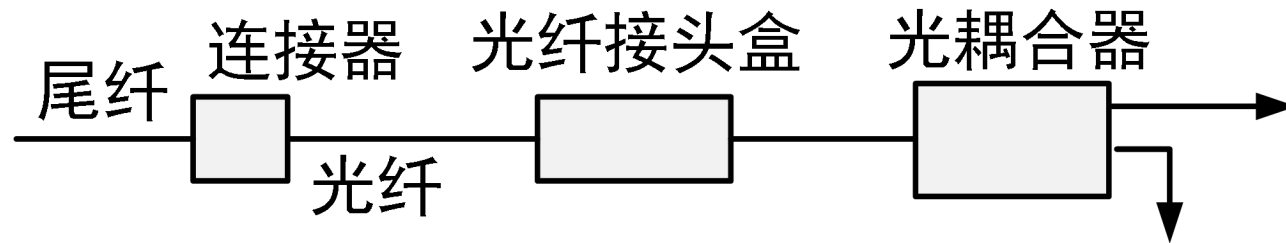
- **光接收机**由光检测器、放大电路和信号恢复电路组成。光发射机和光接收机也称为光端机。
- **作用**是将光信号转换为电信号
- **部件**:
 - ①光电检测器
 - ②前放、AGC、主放
 - ③均衡、判决再生电路
 - ④光线路解码等
- **核心**部件是：光检测器
- 光发射机和光接收机统称**光端机**

光接收机



1.1.1 什么是光纤通信

□ **光纤**在实用系统中一般以**光缆**的形式存在；



□ **思考：**

1. 光器件何为有源，无源？区别？
2. 请观察生活，了解相应设备或技术！

认识连接器接头

- ❑ LC (Lucent connector) : 小方口, 常用于连接SFP光模块和预端接模块盒
- ❑ SC (Subscriber Cable): 卡接式方形 (大方口), 常用于光纤收发器和GBIC光模块
- ❑ FC (ferrule contactor) 型: 圆形带螺纹, 常用于用于光纤配线架
- ❑ ST (Straight Tip): 圆形卡口, 常用于光纤配线架
- ❑ MPO (Multi-fiber Push On): 使用精密模具成型在MT插针中, 用于高密度应用领域



- ❑ 认识尾纤、跳线、连接器等

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

1. 使用光作为载波，极大地提高信道的带宽。带宽与载波频率的关系？

- 信道容量与信道带宽的关系：通信系统传输信息的能力与**信道带宽**成正比
 - 模拟信道：**香农定理** $C=B*\log_2(1+SNR)$
 - C-信息运载能力 (bit/s, bps)，信道容量
 - B-链路带宽 (Hz=周期/秒)
 - SNR-信噪比 (信号概率/噪声概率)
 - 数字信道：**奈奎斯特准则** $C=2B\log_2M$
- 带宽与**频率**的关系：
 - 按经验，带宽大约为载波信号频率的十分之一

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

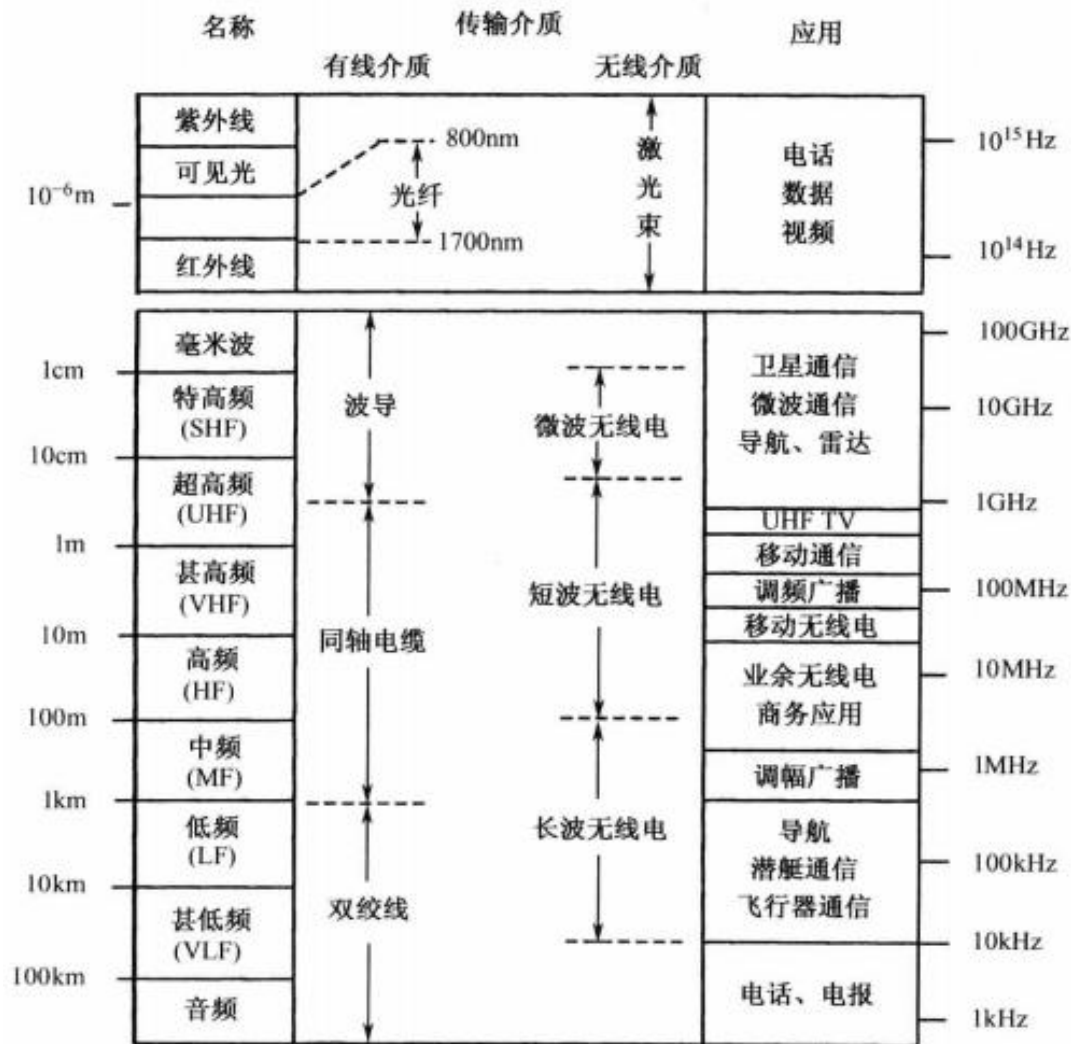


图1.1.2通信系统电磁波谱

***解决实际问题：可以传输多少路电话？**

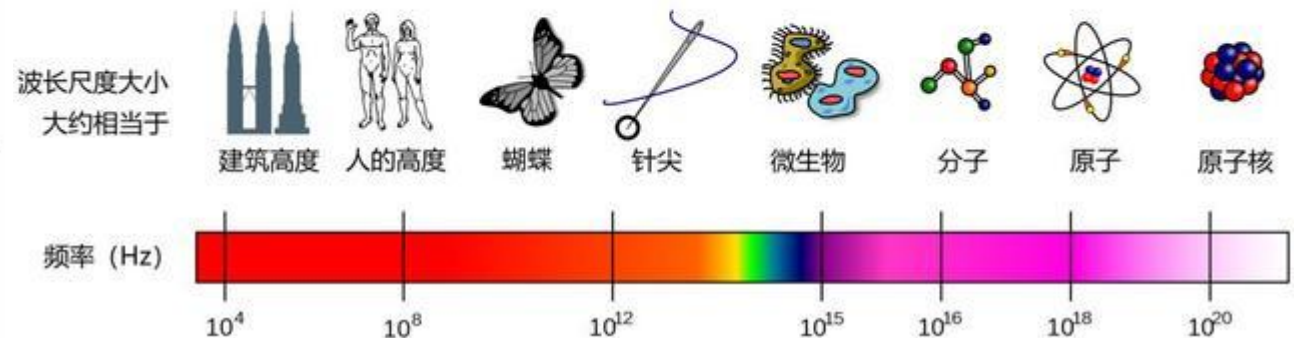
若：双绞线6类工作频率300MHz，同轴电缆1GHz，光纤通信中光频率范围100-1000THz，语音每路带宽64Kbps

理想下：

双绞线 30M/64K ≈ 500路

同轴电缆100M/64K ≈ 1600路

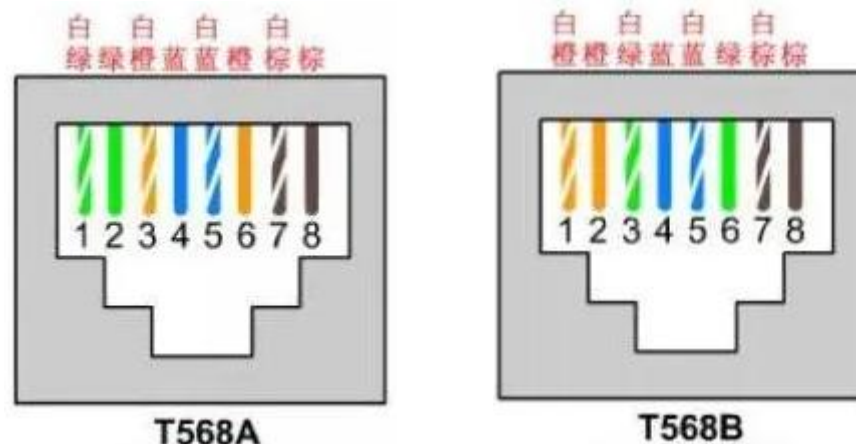
而光纤100T/64K ≈ 16亿路



1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

实际应用

- 双绞线的工作频率300kHz
- 同轴电缆1GHz
- 光纤通信中光频率范围100–1000THz，根据估计，其带宽可达50THz。目前单波长信号速率已达到40Gbit/s，已经实现了单根光纤传输容量为10.96Tb/s的实验系统。



一、直连线互连

网线的两端均按T568B接

1. 电脑-ADSL猫
2. ADSL猫-ADSL路由器的WAN口
3. 电脑-ADSL路由器的LAN口
4. 电脑-集线器或交换机

二、交叉互连

网线的一端均按T568B接，另一端T568A接

1. 电脑-电脑，即对等连接
2. 集线器-集线器
3. 交换机-交换机
4. 路由器-路由器

5类、6类线制作等

实践任务：身边的数据通信设备、光纤通信设备、网线等，实践出真知！

带宽

□ **带宽**（英语：Bandwidth）在信息论、无线电、通信、信号处理和波谱学等领域都是一个核心概念，描述某种“容量”或“能力范围”。

□ 1. 频域角度描述

□ 最初指电磁波频带宽度，即信号最高频率与最低频率差值（即频率范围或占据的**频带宽度**）；单位赫（或千、兆、吉、太赫等）。

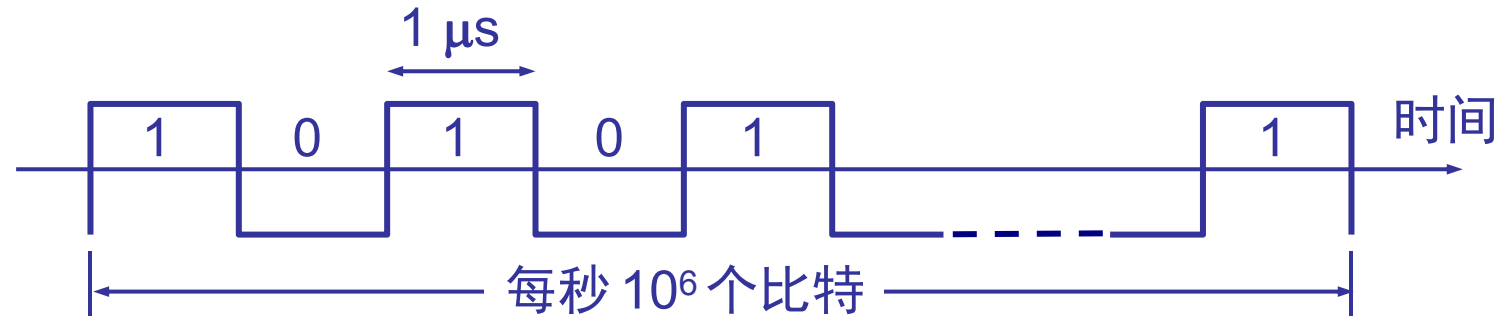
□ 如描述**信道**时，带宽指能够有效通过该信道的信号的最大频带宽度。如**无线通信**，**Wi-Fi** 2.4GHz频段的带宽约为20MHz或40MHz，频率范围内可以传输信号。

□ **模拟信号**，带宽又称为频宽，以**赫兹**（Hz）为单位。如模拟语音电话的信号带宽为3100Hz（从300Hz到3400Hz）。

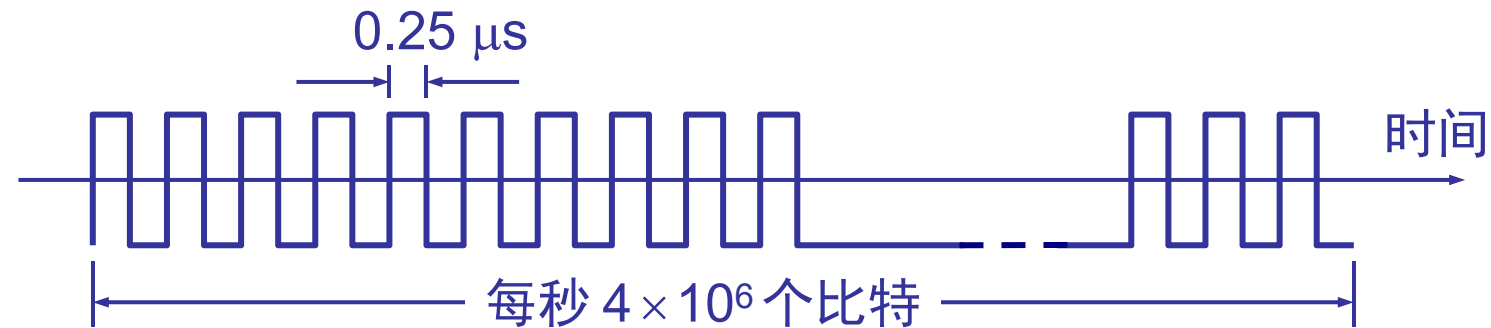
带宽

- 2. **时域**角度描述
- 数字信号流随着时间的变化关系，**时间轴上**信号的宽度随带宽的增大而变窄。

带宽为
1 Mb/s



带宽为
4 Mb/s



带宽

- **数字信号**，带宽是指单位时间内链路能够通过的数据量。
 - 如ISDN的B信道带宽为64Kbps。
- 数字信号的传输是通过模拟信号的调制完成的，为了与模拟带宽进行区分，数字信道的带宽一般直接用**波特率**或**符号率**来描述；
- 在数字信号中，数字**信息流**的基本单位是bit（比特），时间的基本单位是s（秒），因此bit/s或bps是描述带宽的单位，即每秒可传输的比特位数。

带宽

- **计算机硬件领域**：指硬件组间（如内存、总线）的数据传输能力。
 - **总线的带宽**指这条总线在单位时间内可以传输的**数据**总量。可分为并行或总线串行总线。
 - 总线带宽 = 总线位宽 * 时钟频率
 - 如64位、800MHz的前端总线，数据传输率 $64\text{bit} * 800\text{MHz} / 8 (\text{Byte}) = 6.4\text{GB/s}$;
 - 32位、33MHz PCI总线的数据传输率 $32\text{bit} * 33\text{MHz} / 8 = 132\text{MB/s}$ 。
 - **显卡带宽**，指显卡芯片与显存之间的数据传输速率，以字节/秒为单位。
 - 计算方式为：显存带宽 = 显存频率 * 显存位宽 / 8
 - 比如说同样显存频率为500MHz的128位和256位显存，那么它俩的显存带宽将分别为： $128\text{位} = 500\text{MHz} * 128 / 8 = 8\text{GB/s}$ ， $256\text{位} = 500\text{MHz} * 256 / 8 = 16\text{GB/s}$ 。
 - **内存带宽**：内存带宽是处理器可以从内存读取数据或将数据存储到内存的速率。内存带宽通常以字节/秒为单位表示，
 - 带宽 = 内存核心频率 * 倍增系数 * 内存位宽 / 8

带宽

- **网络带宽**，指该链路上数据报文的最大传输速率，网络传输速率的单位用bit/s或bps表示。
- 如下载速度显示为176KB/s，103KB/s等宽带速率大小字样，因为ISP提供的线路带宽使用的单位是比特（bit），而一般下载软件显示的是字节（Byte）（1Byte=8bit），所以要换算，才能得实际值。
- 1M宽带，有以下换算：
 - $1\text{Mb/s} = 1024\text{Kb/s} = 1024/8\text{KB/s} = 128\text{KB/s}$

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

计算举例：

百度网盘、手机下载或U盘拷贝一个500M的游戏需要多少时间？

□ 假设网络下行速率100Mbps，即 $100\text{M}/8=12.5\text{M}/\text{秒}$ ， $500\text{M}/12.5\text{M}/\text{S}=40\text{秒}$

□ 假设USB 3.0传输速度最大5Gbps

□ 即 $500\text{M}/500\text{MB}/\text{s}=1\text{秒}$

□ 5Gbps采用SATA相同的10bit传输模式，在USB2.0基础上增一对纠错码，所以全速只有500MB/s

实际体验，是什么让我等待？

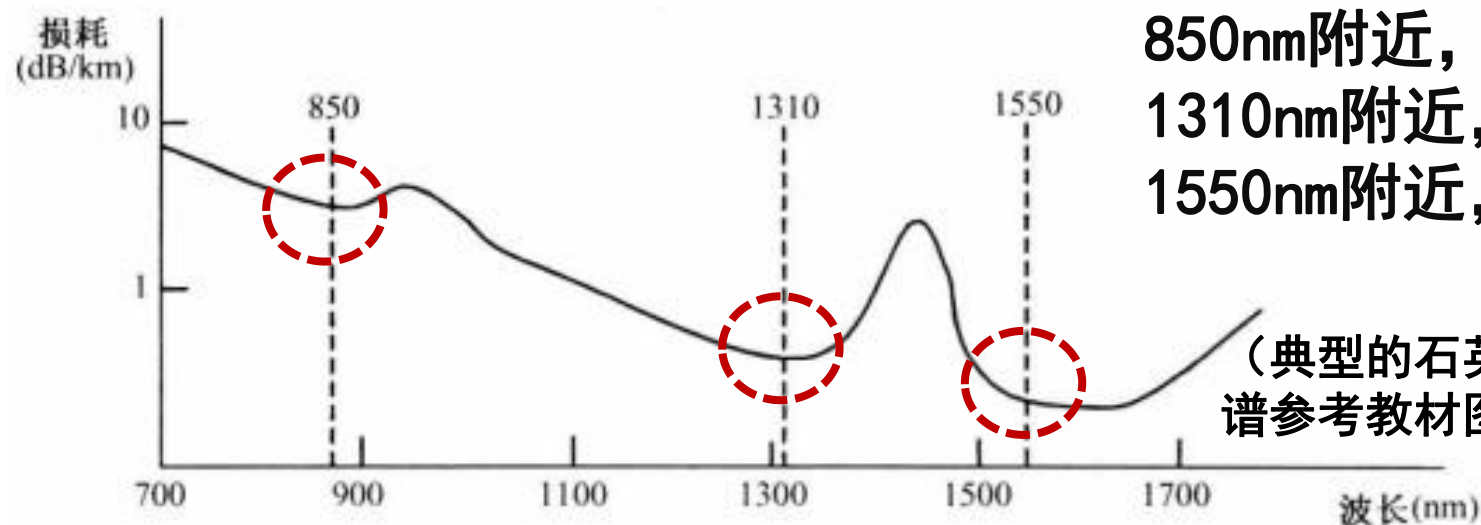


木桶效应：木桶装水量取决于最短的那根木头！

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

2. 光纤特性：光在光纤中传输的工作波长由谁决定？

- 光源使用的波长范围在近红外区内，波长800–1700nm之间，属不可见光
- 低损耗是实现光信号长距离无中继传输的前提
- 光纤的损耗特性即衰减特性
- 三个波长衰减比较小，为光纤的透光窗口



850nm附近，损耗约2dB/km

1310nm附近，损耗约0.5dB/km

1550nm附近，损耗可降至**0.2dB/km**

(典型的石英光纤损耗谱参考教材图1.1.3)

主要内容

所以：光在光纤中传输的工作波长由光纤特性决定

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

3. 光在光发射机和光接收机中的工作基于光的辐射与吸收

□ 光发射机和光接收机中的光源和光检测器是基于半导体材料对光的辐射与吸收机理工作的。

□ 导带 E_C 上的电子跃迁到价带 E_V 上，就会将其间的能量差（也称能带差）以光的形式放出，光子的频率与能带差的关系为

$$E_g = h\nu \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{hc}{E_g}$$

□ 式中为普朗克常数（ $h=6.625 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ）， c 为光速， E_g 的单位是电子伏特（eV）， λ 的单位为微米（ μm ）。我们可以通过**控制**半导体材料的成份来改变能带差，从而改变其发光波长。

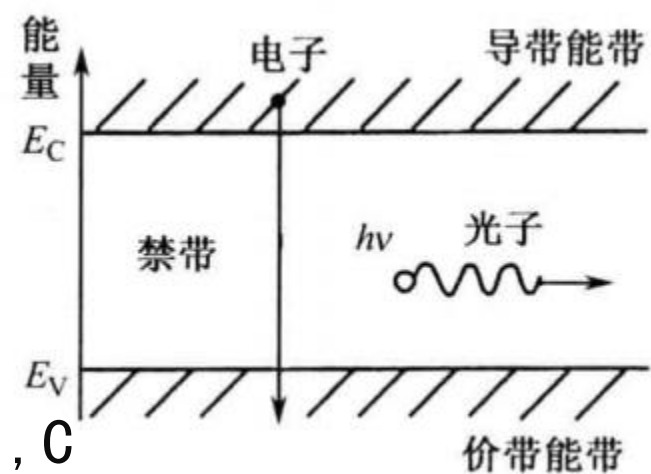
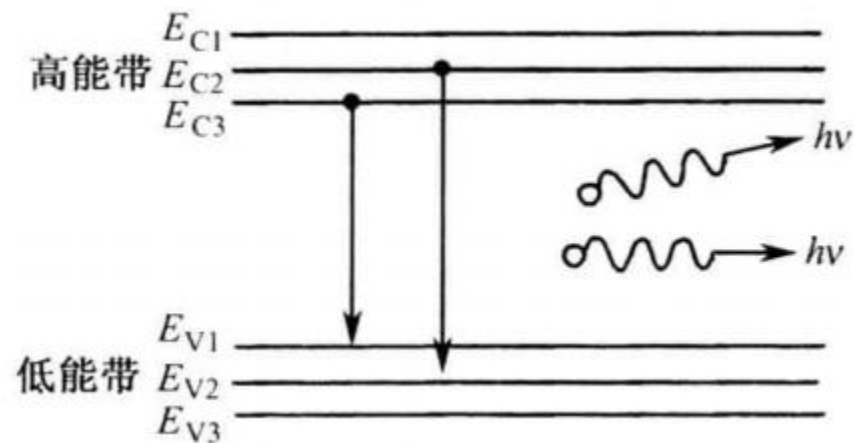


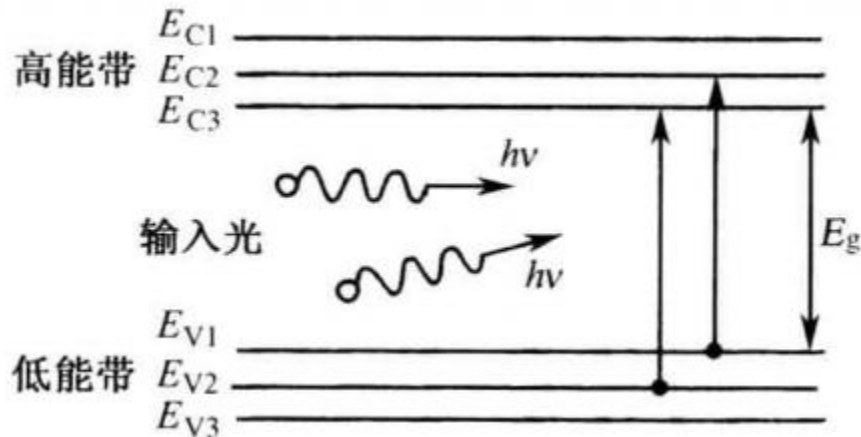
图1.1.4 能带图

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

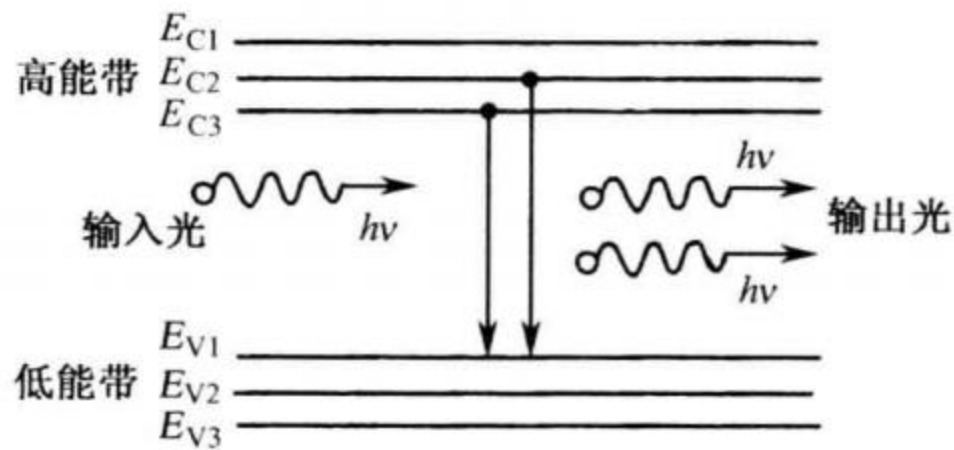
半导体中光的自发辐射、受激发射和吸收



(a) 光的自发辐射（发光二极管）



(b) 光的吸收（光检测器）



(c) 光的受激发射（激光二极管）

- 半导体发光二极管LED电子从高能带跃迁到低能带将电能转变为光能。
- 光检测器则与LED相反，能量大于 E_g 的光照射到半导体材料上，处于低能带的电子吸收该能量后被激励而跃迁到高能带上，从而使光能转变为电能。

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

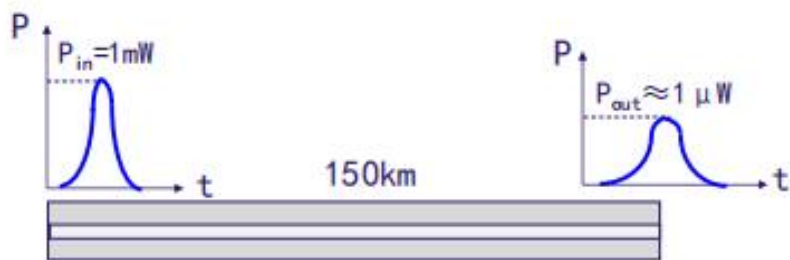
激光二极管LD的工作机理为受激发射

- 自发辐射与受激发射产生的激光**区别**：自发辐射光波的频率并不完全一样，光波还具有不同的相位和偏振方向，因此自发辐射光是一种非相干光，即不是单一频率、相位和偏振方向相同的光。
- 受激发射在入射光的激发下，产生与入射光频率、相位、偏振方向及传播方向一样的发射光，是入射光的倍增。
- 要实现受激发射需要两个条件：
 - 一是高能带上的电子密度要大于低能带上的电子密度，这种状态称为**粒子数反转**，可采用通过向半导体激光二极管注入正向电流的方式来实现粒子数反转；
 - 二是半导体激光器中必须存在**光子谐振腔**，并在谐振腔里建立起确定的振荡，从而得到单色性和方向性好的激光输出。

1.1.3 光纤通信的优势

光纤通信与其他形式通信的主要优势：

- 1. 载波频率很高，信道带宽极宽，传输容量大
 - 目前限于器件等技术因素的制约，光纤通信应有的通信能力并没有完全发挥出来，如理论上一根光纤可以同时传输近100亿路电话和1000万路电视节目，而实用水平为每对光纤传输48万多路电话信号。在实际使用中，常使用组合光纤数不等的光缆，加之一些新技术的应用，如密集波分复用技术，其传输容量可以满足任何条件下信息传输的需要。
- 2. 中继距离很长，且误码率损耗很小
 - 中继距离是指传输线路上不加放大器时信号所能传输的最大距离。中继距离是指传输线路上不加放大器时信号所能传输的最大距离。目前，光纤组成的光纤通信系统最大中继距离可达3000多公里，而同轴电缆系统的最大中继距离仅为6公里。



损耗系数 $<0.2\text{dB/km}$ ；中继距离为数百~数千km

1.1.3 光纤通信的优势

□3. 抗干扰

- 干扰是影响通信质量的重要原因，光纤中传输的光信号特定的频率范围，使它不易受各种电磁干扰的影响。同时光纤主要由高纯度的二氧化硅材料制成的，不导电，也无电感效应，所以光纤通信系统光纤不易受各种电磁干扰影响。

□4. 保密性好

- 对信息的窃取通常有三个途径：一是直接接入式窃听；二是窃听计算机和终端设备辐射的电磁场；三是窃听电缆源辐射的电磁场。光波在光纤中传输，不易泄漏出来，难以用传统的方法窃听其中的信息，同时，它也不会干扰其它通讯设备的正常工作。
- 光泄露小，保密性好



1.1.3 光纤通信的优势

□5. 节约有色金属

- 光纤的主要原材料是二氧化硅。据测量，从上海至北京铺设一条电缆线路需要用铜800吨，铅300吨。如果用光纤代替铜、铅等有色金属。在保持同样的传输容量下，仅需要10公斤石英。光纤通信技术的推广节约大量的金属材料，合理使用地球资源的意义。

□6. 线径细，重量轻，寿命长等

- 光缆的直径很小，144芯光缆横截面直径不到18毫米，而标准同轴电缆为47毫米，利用光纤这个特点可以解决地下管道拥挤问题等。
- 光缆的重量是电缆的1%~0.01%

□其他领域广泛应用

- 除在公用通信和专用通信中使用外，它还如测量、传感、自动控制及医疗卫生等方面得到了广泛的应用。

光纤通信的缺点

❑1. 光纤脆，易裂纹，光纤的抗拉强度



❑2. 光纤的连接必须使用专门的工具和仪表，光分路、耦合不是十分方便，光纤弯曲半径不能太小等。



光纤切割刀



光纤熔接机



耦合器

1.1.3 光纤通信的优势

延伸技术热点:

- **我国科学家创世界纪录! 实现500公里无中继光纤量子密钥分发**
 - 中科院院士、中国科学技术大学教授潘建伟及同事张强、陈腾云与济南量子技术研究院王向斌、刘洋等合作, 基于“济青干线”现场光缆, 突破现场远距离高性能单光子干涉技术, 采用两种技术方案分别实现428公里和511公里的双场量子密钥分发, 创造了现场无中继光纤量子密钥分发传输距离的新世界纪录。
 - 来源央视新闻客户端: <https://m.gmw.cn/baijia/2021-06/25/1302377022.html>

1.3 光纤通信的基本问题

□ 衰减和色散是光纤通信系统的**基本**问题，在传输光信号功率较高时，光纤的非线性效应影响则不能忽略。

- [1.3.1](#) 衰减
- [1.3.2](#) 色散
- [1.3.3](#) 非线性效应

1.3.1 衰减

- 衰减指的是光信号功率在光纤传输过程中的损耗，它是由光纤特性决定的，也称为光纤衰减。
- 在很大程度上决定了在**无需**信号放大和再生的条件下，光发射机和光接收机之间所允许的最大距离。
- 由于光放大器、光中继器的制造、安装及维护费用较高，光纤衰减成为整个系统成本的决定性因素之一。

主要内容

1.衰减的表示

- 光信号在光纤中传播时，其**功率P**随着传输**距离**的增加按指数形式衰减

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \quad (1.3.1)$$

- 衰减系数 $\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{P(0)}{P(L)} \quad (1.3.3)$

1.3.1 衰减

□ 工程应用dB/km作为光纤衰减的单位 $\alpha(dB/km) = \frac{10}{L} \lg \frac{P(0)}{P(L)}$ (1.3.4)

工程应用计算:

已知某单模光纤工作波长1550nm, 传输损耗0.2, 求传输多少公里后光功率下降为原来的一半?

答: 1. 1550nm位置传输损耗0.2 dB/km

2. 光纤损耗公式 $\alpha(dB/km) = \frac{10}{L} \lg \frac{P(0)}{P(L)}$ 参考教材公式1.3.4

3. 代入公式

$$0.2(dB/km) = \frac{10}{L} \lg 2$$

所以L为15km

1.3.1 衰减

衰减的原因：有散射损耗、吸收损耗和弯曲损耗等

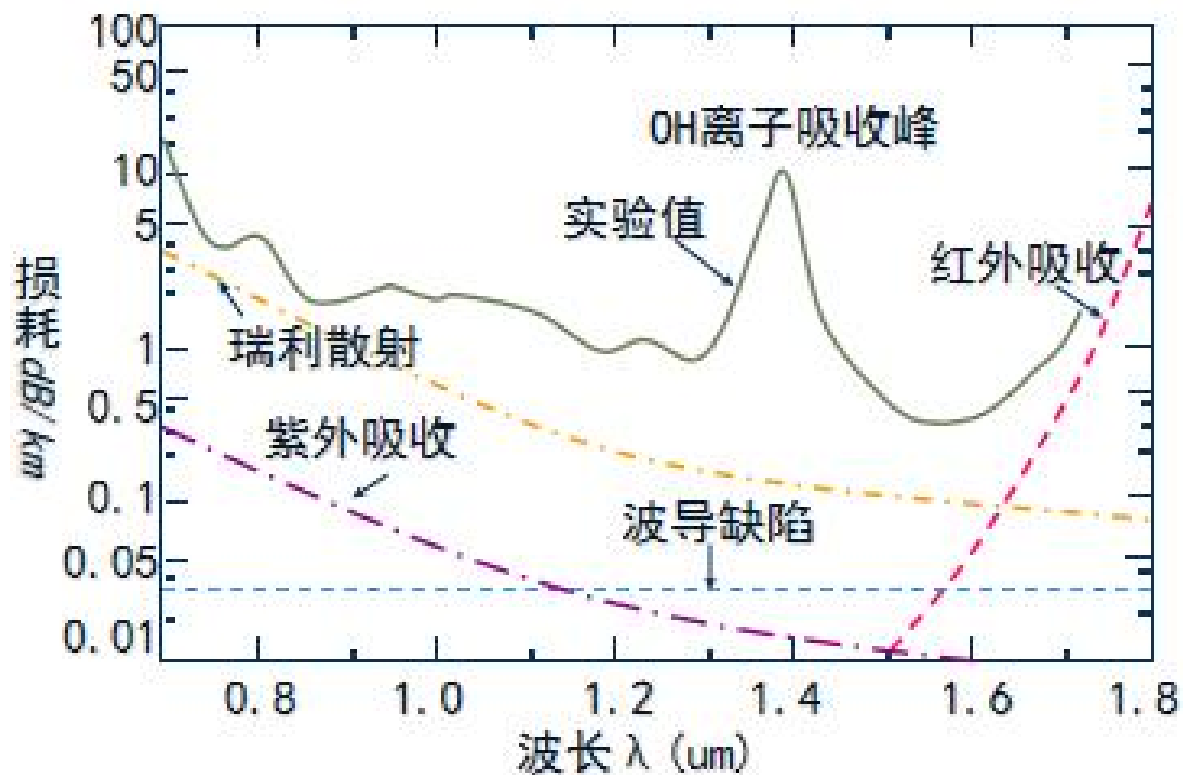
□ 1. 散射损耗

- 光纤材料密度的微观变化、成分的起伏、结构上的不完善以及制造过程中产生的缺陷造成的。
- 光在不均匀的介质中传播将被散射，散射效应破坏了在纤芯包层边界保持全反射的条件，部分光会穿出纤芯，造成功率损耗。
- 也称为**瑞利散射**。它与波长的四次方成反比，在为1550nm时，瑞利散射损耗为0.154dB/km。

1.3.1 衰减

□2. 吸收损耗

- 在光纤制造过程，光纤中的氧与氢相结合会形成OH离子时，会对1390nm和940nm的光造成大量的吸收。
- 将OH离子引起的衰减称为**杂质吸收**损耗
- 还有光纤石英材料（SiO₂）**固有的吸收**，称之为内部吸收。
- 当波长大于2 μm时，石英材料会产生**谐振吸收**光能，吸收带延伸到1500nm~1700nm波段，形成了光纤工作波长的上限。常用的石英光纤，内部吸收损耗在1550nm时，约为0.02dB/km，但当波长为1700nm时，损耗增至0.32dB/km，所以将1650nm看作为石英光纤工作波长的上限。



光纤的损耗谱

1.3.1 衰减

□ 3. 弯曲损耗

□ 光纤敷设中，不可避免需要弯曲，光线从光纤的平直部分进入弯曲部位时，原来的束缚光线在弯曲部位的入射角减小，使得光纤纤芯和包层界面上的**全反射**条件遇到**破坏**，光束的一部分就从光纤的纤芯中逃离出去，造成目的地光功率比从光源发出的光功率小，这就是弯曲损耗。

- 弯曲损耗与光纤敷设的弯曲半径有关，关于**最小弯曲半径**的经验数据是，对**长期应用**，弯曲半径应超出光纤包层直径的150倍；对**短期应用**，应超过包层直径的100倍。如果包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ 的话，这两个数值分别19mm和13mm。
- 弯曲损耗的另一种形式是**微弯**损耗，是由光纤受到侧向应力而产生微小形变而引起的，同样因不满足全反射条件而造成能量的漏泄。在需要对光进行可控衰减时，通过将光纤**绕上几圈**就可以实现，所绕圈数和半径均可控制衰减量。

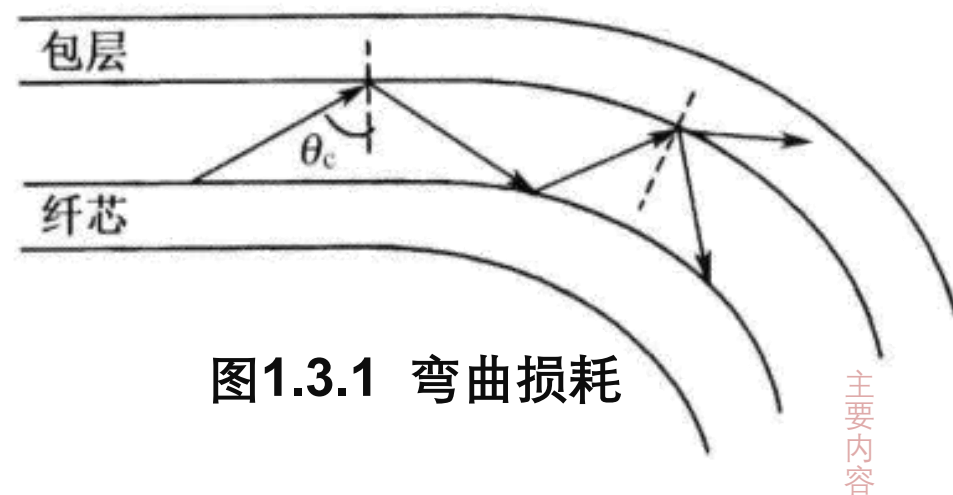


图1.3.1 弯曲损耗

主要内容

1.3.2 色散

- 色散是由于光波中的**不同频率**分量以不同**速度**传输而产生不同的时间**延迟**的一种物理效应。
- 光信号在传输过程中产生失真，传输距离越远失真越严重。
- 对**数字**传输而言，色散造成光脉冲的展宽，使前后脉冲相互重叠，引起数字信号的码间串扰，造成误码率增加；
- 对**模拟**传输而言，限制带宽，产生谐波失真，使系统信噪比下降。
- 光纤色散主要包括模式色散、波导色散和材料色散。
 - 对于**多模**光纤，**模式色散**是主要的，材料色散较小，波导色散一般可以忽略
 - 对于**单模**光纤，只有一个光模式在光纤中传输，所以不存在模式色散，只有**材料色散**和**波导色散**，而且材料色散是主要的，波导色散相对较小。

1.3.2 色散

1. 模式色散

- 在多模光纤中，纤芯的直径比较大，光源入射到纤芯中的光以**一组**独立的光线传播，这组光线以不同的入射角传播，入射角的范围从零度（直线）到临界传播角，我们将这些**不同传播角**传输的光线称为**不同的模式**。
- 将因多个不同模式的存在而引起脉冲展宽称为模式色散或模间色散。

主要内容

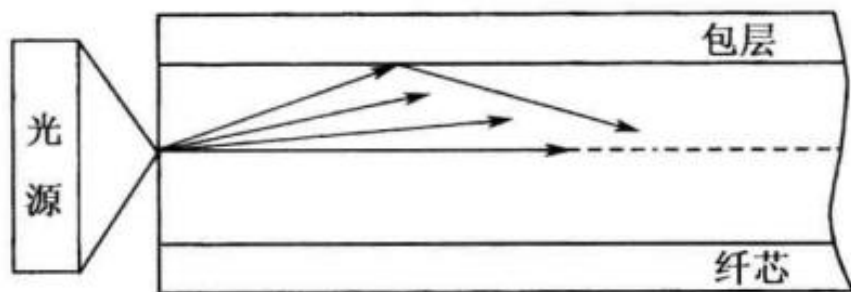


图 1.3.2 不同入射角的光线代表不同的模式

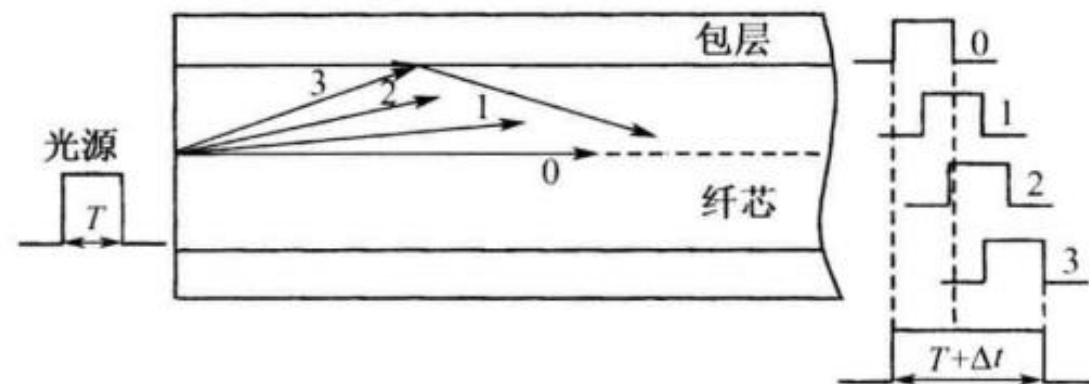


图 1.3.3 脉冲因多个模式的存在而引起的展宽——模式色散

1.3.2 色散

- 光纤的长度为 L ， t_0 沿中心轴线时间，纤芯折射率为 n_1 ，速度 $v=c/n_1$ ， c 为光速， t_c 以临界角 α_c 传播到达光纤输出端所需时间，分析及结论

$$t_0 = \frac{L}{v} \quad t_c = \frac{L}{v \cos \alpha_c} \quad \cos \alpha_c = \frac{n_2}{n_1}$$

脉冲展宽时间

$$\Delta t = t_c - t_0 = \frac{L}{v} \left(\frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \right) = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \quad (1.3.8)$$

相对折射率

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (1.3.9)$$

时延

$$\Delta t = \frac{Ln_1}{c} \Delta \quad (1.3.10)$$

- **结论：**光纤中传输的光只有零级模式，就可以消除模间色散；减小纤芯直径的尺寸，就可以减少模式数量；减小相对折射率，也可以有效地控制模间色散，这些就是单模光纤设计的基本思路。

- 典型的单模光纤的纤芯直径和相对折射率分别是 $8.3 \mu\text{m}$ 和 0.37% ，而渐变折射率光纤这两者的数值分别是 $50 \mu\text{m}$ 和 2% 。

1.3.2 色散

2. 波导色散

- 原因：进入单模光纤中的光信号功率大约只有80%在纤芯中传播，另外20%在包层传输，由于纤芯和包层有着不同的折射率，所以这两部分的传输速度不同，在包层中传播的光功率速度要更大一些，在光纤输出端，脉冲会展宽。

- 波导色散引起的单位长度脉冲展宽可由下式计算：

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t}{L} = |D_w(\lambda)| \Delta\lambda \quad (1.3.11)$$

- 式中 $D_w(\lambda)$ 是波导色散系数，单位为ps/(nm.km)，它与光纤的设计参数有关， $\Delta\lambda$ 为光源的线宽，即光源辐射光的波长范围，L为光纤长度。

1.3.2 色散

3. 材料色散

- 原因：由于纤芯材料的折射率随波长变化，使得各个模式的群速率（光脉冲包络线速度）都会随着波长的变化而造成的。
- 在单模光纤内，即使光经过完全相同的路径，也会发生脉冲的展宽，因为光源发出的光不是单一波长的，而是存在一定的波长范围。
- 材料色散的单位长度脉冲展宽：

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t}{L} = |D_m(\lambda)| \Delta\lambda \quad (1.3.12)$$

- 式中 $D_m(\lambda)$ 是材料色散系数，单位为ps/(nm·km)， $\Delta\lambda$ 为光源辐射光的波长范围，L为光纤长度。
- 波导色散和材料色散的总和称为色度色散。

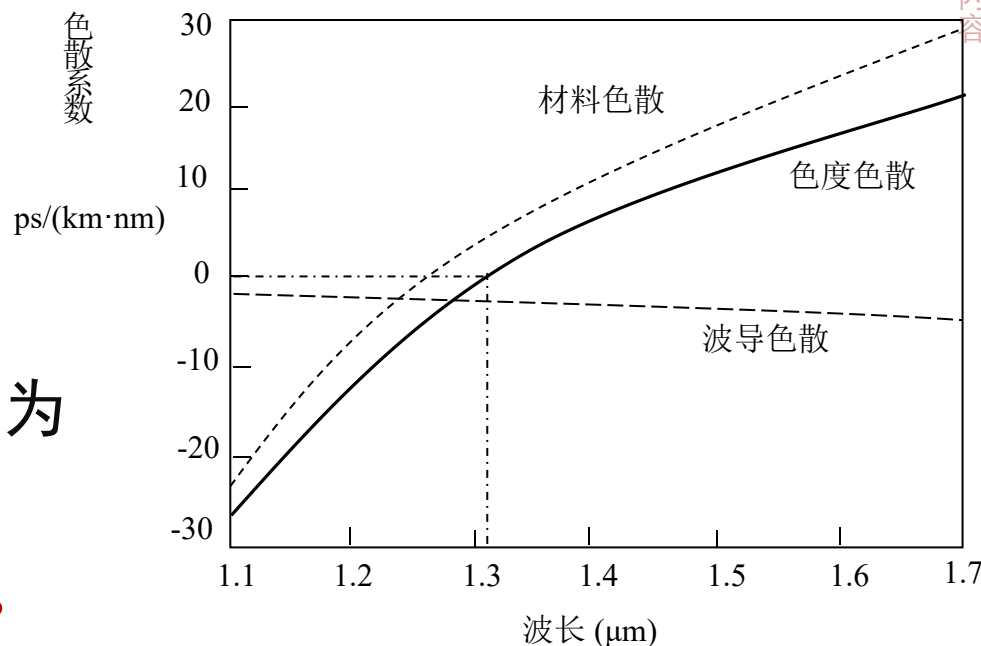


图1.3.4 单模光纤中波导色散和材料色散与波长的关系

1.3.3 非线性效应

- 光纤一般呈现线性传输的特性，但当入射到光纤中的**光功率较大**时，光纤对光的响应将呈现非线性，光纤的参数不再是恒定的，而是依赖于光强的大小。
- 1. **自相位调制SPM (Self Phase Modulation)**
 - 指当输入光信号的光强变化时，光纤的折射率随之改变，从而引起光波的相位产生变化，与光纤的色散相位结合后，将导致光波频谱展宽，并随长度的增加而积累。SPM对高速窄脉冲的传输影响较大。
- 2. **交叉相位调制XPM (Cross Phase Modulation)**
 - 指当两个或多个不同波长的光波在光纤中同时传输时，它们将通过光纤的非线性而相互影响，导致某个波长光信号的相位受到其它波长光信号功率的调制，引起信道间的串音。
- 3. **四波混频FWM (Four Wave Mixing)**
 - 指当多个具有较强功率的光波信号在光纤中混合传输时，将导致产生新的波长成分，四波混频不仅导致信道的光能损耗，信噪比下降，而且还会产生信道干扰，限制光纤通信系统的容量。

1.3.3 非线性效应

□4. 受激散射SBS (Stimulated Brillouin Scattering)

- 受激喇曼散射是指当较强功率的光入射到光纤中时，会引起光纤材料中的**分子振动**，对入射光产生散射作用，它可以造成波分复用系统中的短波长信道产生过大的信号衰减，从而限制了系统的信道数目。
- 受激布里渊散射与受激喇曼散射相似，只不过强光入射到光纤中时引起的是声子振动，散射光方向与光传输方向相反。当光强达到某一数值，将产生大量后向传输的波，对光通信造成不良的影响。
- 非线性效应，**一方面**引起传输信号的损耗、信道之间的串话、信号频率的移动等不良后果，**另一方面**又可以被利用开发**新型器件**，如激光器、放大器、调制器等，如四波混频效应可以实现波长变换，自相位调制与光纤色散相互作用可以形成光孤子，使光孤子通信成为可能。
- 在光纤通信系统中，**高**输出功率的**激光器**和**低**损耗**单模**光纤的使用，使得光纤**非线性效应**越来越显著，单模光纤中的光场主要束缚于很细的纤芯内，场强非常大，低损耗使得大场强维持很长距离，对非线性效应有足够的重视。
- **非线性效应**在多波长系统（如DWDM）反映较多，在单波长系统（如SDH）反映较少。

1.4 光纤通信系统的主要性能指标

□ 1.4.1 比特率和带宽

□ 比特率和带宽是衡量数字通信系统和模拟通信系统的主要指标。

□1. 比特率

□ 比特率也称为信息速率，是信道上每秒钟内所传输的比特数，单位为比特/秒，写成b/s或bps，常用符号B表示。

□ 在数字光纤通信系统中，数字信号的“1”、“0”用光脉冲的“有”、“无”来表示。

最大比特率
$$B_{\max} = \frac{1}{2\Delta\tau} \quad (1.4.1)$$

例1.4.1：计算例1.3.3中可传输光脉冲的最大比特率。

解：假设输入光脉冲的宽度T与模式色散产生的展宽相比可以忽略不计，则最大比特率

$$B_{\max} = \frac{1}{2\Delta\tau} = \frac{1}{2 \times 4.71 \times 10^{-8}} = 10.6 \text{Mbps}$$

1.4.1 比特率和带宽

□ 2. 带宽

- 带宽是一个频率范围，在这个频率范围之内，信号可以不失真地进行传输，它反映了模拟传输系统运载信息的能力。

□ 带宽分为电带宽和光带宽两种表述

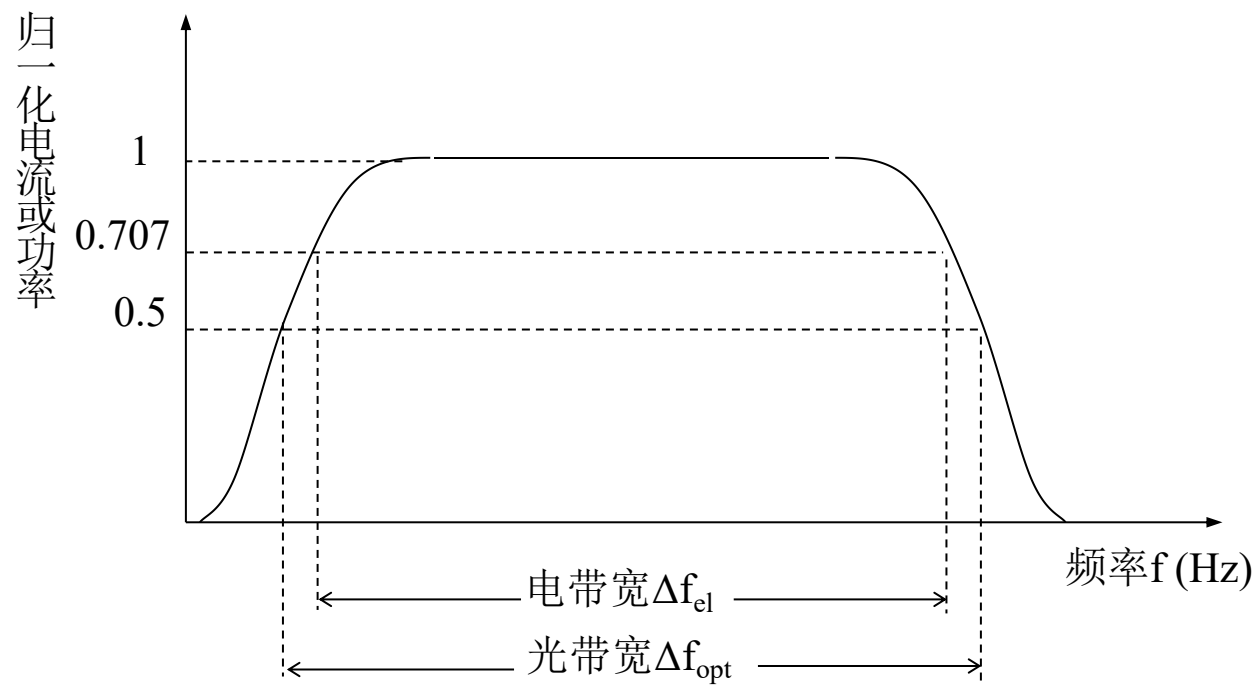


图1.4.3 模拟信号的带宽

1.4.2 传输距离

- 这里讨论的传输距离指的是中继距离。光纤的衰减和色散是限制传输距离的两大主要因素。
- 1. 仅考虑光纤损耗，光信号沿光纤传输的最大距离L可用（1.3.4）式计算，将它改写为

$$L = -\frac{10}{\alpha_f} \lg \frac{P_{out}}{P_{rec}} \quad (1.4.1)$$

- 式中 α_f 为光纤的损耗，单位为dB/km，包括熔接和连接损耗， P_{out} 为光源最大平均输出功率， P_{rec} 为接收机探测器的最小平均接收光功率，两者单位均为mW。

1.4.2 传输距离

□2. 考虑光纤损耗的传输系统示意图

- 图中的**接头**是用熔接机将光纤连接起来时形成的，因接头引起的损耗 L_s 对单模光纤来说可以做到小于0.1dB。
- **连接器**也是连接光纤的方式之一，它是用高精度结构的机械，使光纤纤芯紧密接触，光纤纤芯接触得越紧，同心度越高，则连接损耗 L_c 越小。单模光纤使用连接器相连时，连接损耗可以做到0.5dB以下。

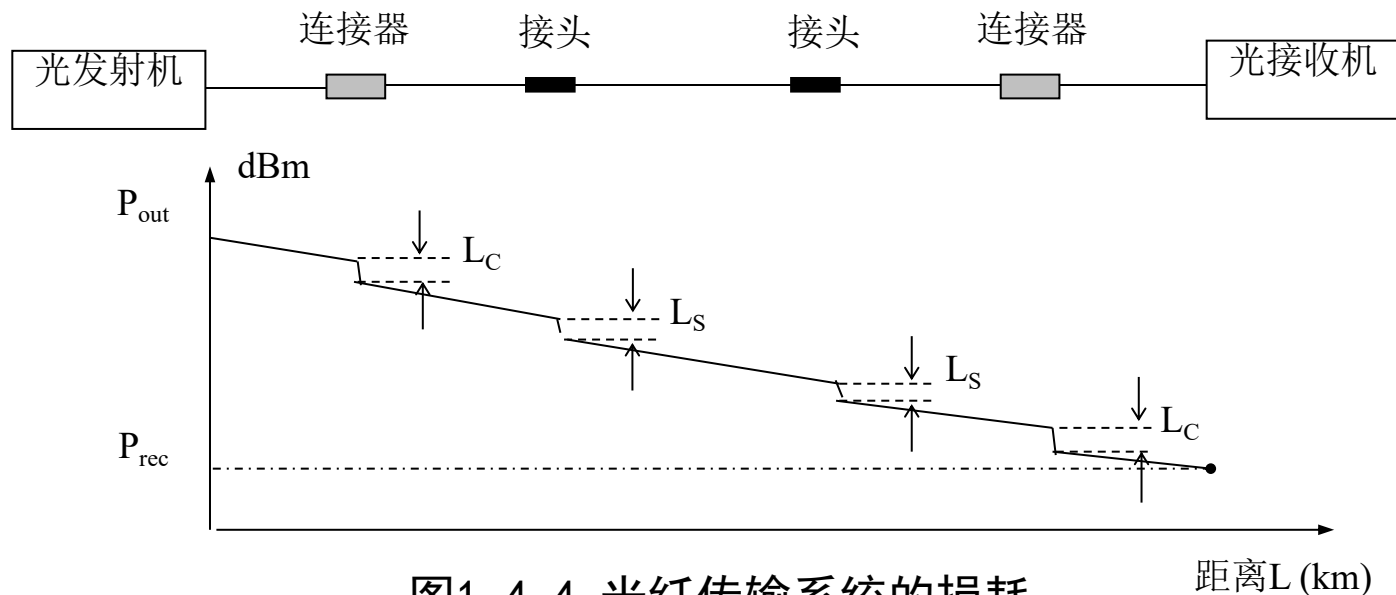


图1.4.4 光纤传输系统的损耗

1.4.2 传输距离

3. 各种类型光纤的传输距离与传输速率之间的关系

- 当光纤系统的信息传输速率较高时，色散对传输距离起到主要的限制作用，图1.4.5示出实线表示损耗对传输距离和比特率的限制，虚线表示受色散限制。

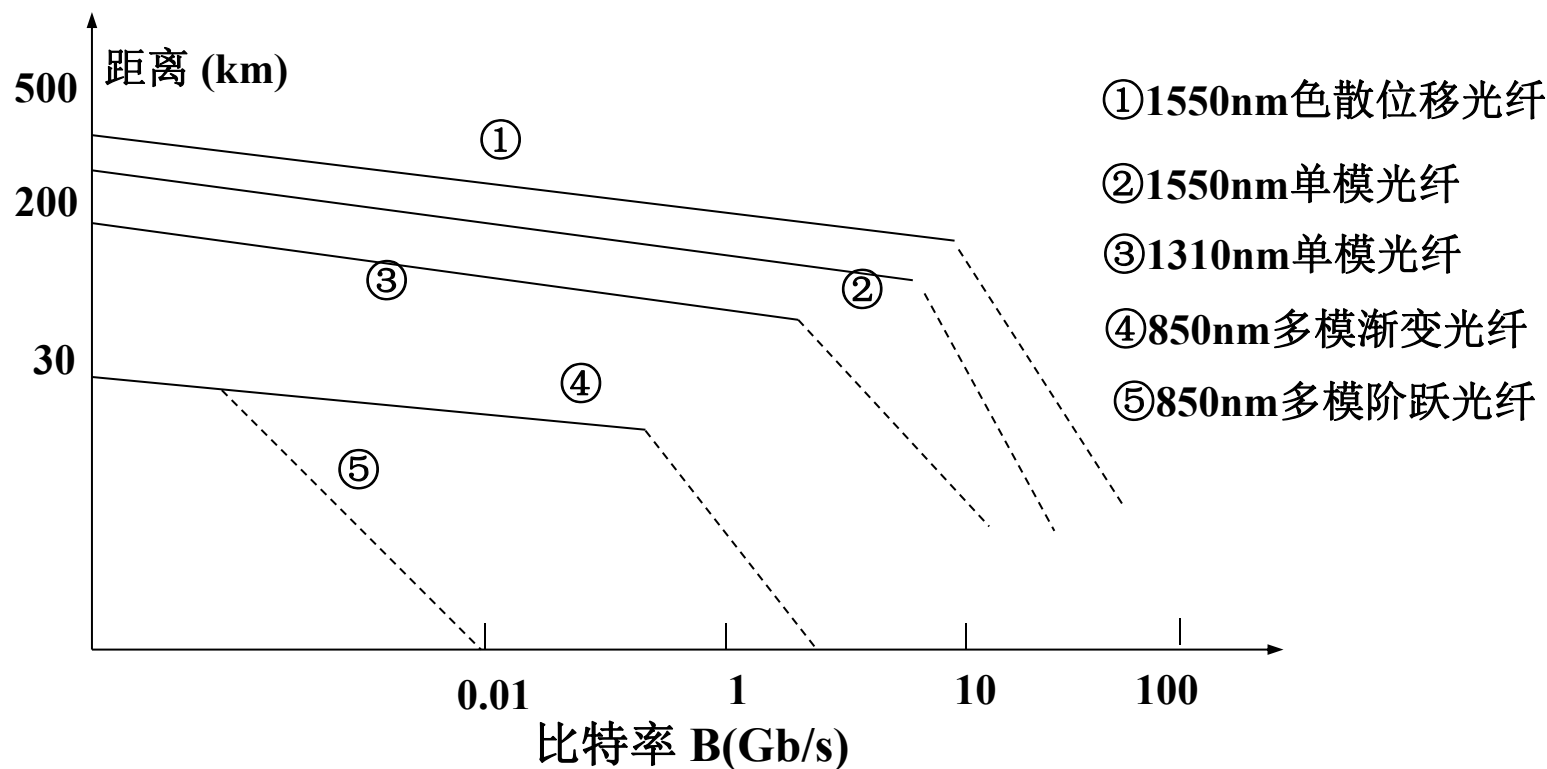


图1.4.5 光纤的传输速率与传输距离的关系

1.4.3 通信容量

- 光纤通信系统的通信容量用**比特率—距离积**BL来表示，B为系统传输信息的比特速率，L则是中继距离，单位是 $(\text{Mbit/s}) \cdot \text{km}$ 。
- 通信容量也可以用**带宽—距离积**来表示，单位是 $\text{MHz} \cdot \text{km}$ 。通信容量与光纤的类型、工作波长、以及使用的激光器类型等诸多因素有关。
- 对于工作于850nm的阶跃折射率多模光纤，比特率—距离积被限制在50 $(\text{Mbit/s}) \cdot \text{km}$ 左右，因此除了短距离传输的低速率数据，一般都不采用阶跃折射率多模光纤。
- 工作于1550nm的色散位移光纤系统的BL积可达到1600 $(\text{Gbit/s}) \cdot \text{km}$ 。见图1.4.5。

1.5 光纤通信技术的回顾和展望

□ 1.5.1 回顾

- 利用光载波远距离传输信道的设想在19世纪就被提了出来，但是因为光源和传输介质这两个基本限制一直未得到发展。

光纤通信元年

1966年，英籍华裔科学家高锟（Charles Kao）首次提出通过降低石英玻璃材料中的杂质含量和改善拉丝工艺，可以使光学纤维成为实用光传输介质，开创光纤通信领域研究工作。

第一代光纤通信

- 1977年，在芝加哥相距7公里的两电话局之间，首次采用0.85 μm波段，多模光纤，损耗2.54dB/km，速率为44.736Mb/s，光源铝镓砷半导体激光器，光电探测器采用硅材料，成功地进行了数字光纤通信试验，成为第一代光纤通信的标志。
- 第一代光纤通信的特征：采用850nm的多模光纤，光纤损耗为2.5~3dB/km，传输速率为50~100Mb/s，中继距离为8~10公里。

1.5 光纤通信技术的回顾和展望

第二代光纤通信系统

- 1981年，工作波长采用1.3μm多模光纤。
- 第二代光纤通信的特征：石英光纤的第二个低损耗窗口，且有最低的色散，相应的光源长波长，铟镓砷磷（InGaAsP）/铟磷（InP）半导体激光器，光电探测器采用锗材料，传输速率为140Mb/s，中继距离为20~50公里。

第三代光纤通信系统

- 1984年，工作波长采用1.3μm单模光纤。
- 第三代光纤通信特征：单模光纤色散低，损耗0.3~0.5dB/km，中继距离为50~100公里。
- 广泛地应用于长途干线和跨洋通信中。从此，全球通信网全面展开发展。
 - 日本，北海道到冲绳岛纵贯南北光缆干线，全长3400公里，24芯单模光纤光缆，速率400Mb/s。
 - 美国，东西海岸各敷设光缆干线，长度分别600公里和270公里，芯数为144芯。在1985年，又敷设了2002公里的南北干线，增设总长为5万公里光缆，把美国22个州连接形成长途光缆干线网。
 - 国际上第一条海底光缆于1986年在北海海底敷设，它连接英格兰和比利时。
 - 美国到欧洲跨大西洋海底光缆在1988年敷设，长度为5600公里，到欧洲后分成两个分支，一路经500多公里到英国，另一路经300多公里到法国，语音信道为8万路，为了补偿信号衰减，沿光缆每隔50公里安装了一个转发器。

1.5 光纤通信技术的回顾和展望

第四代光纤通信系统

- 20世纪80年代中后期，实现的1.55μm单模光纤通信系统，即第四代光纤通信系统。
- 特征：1550nm是石英光纤的最低损耗窗口，为0.2dB/km，传输速率达2.5Gb/s，中继距离为80~120公里。
- 在这个时期，掺铒光纤放大器的出现成为光纤通信发展史上的重要里程碑。
 - 掺铒光纤放大器研制成功的意义不仅在于可进行全光中继，它还多方面推动了光纤通信的发展。尤其是在波分复用WDM (Wavelength Division Multiplexing) 光纤通信系统中的应用，波分复用是将一根光纤分割成多个光信道，从而成为充分利用光纤带宽，有效扩展通信容量的一种光纤通信方式，这项技术使光纤通信进入了高速光纤通信阶段。

主要内容

第五代光纤通信系统

- 自1995年以来，光纤通信的发展进入了第五代。
- 主要特征：是采用了密集波分复用DWDM对光纤系统传输容量进行扩容。
 - 截至2002年，商用DWDM系统容量已达 $160 \times 10\text{Gb/s}$ (1.6Tb/s)，实验室 $256 \times 42.7\text{Gb/s}$ (10.932Tb/s)

第六代光纤通信系统：利用量子纠缠效应进行信息传递的量子通信方式。

1.5 光纤通信技术的回顾和展望

□相关核心器件的演进

激光器： LED半导体发光二极管→半导体激光器LD同质结半导体LD→双异质结LD→分布反馈LD→量子阱LD →

速率： MHz →Gb/s→10Gb/→40Gb/s →

光电探测器： PIN光电二极管→APD雪崩光电二极管

Si→GaAs→Ge→InGaAs →

速率： MHz →Gb/s →10Gb/s →40Gb/s →

从通信网的观点来看光纤通信

- 第一代**为纯电信网**。
- 第二代通信网仅仅是**用光纤代替铜线**，使通信网的性能得到了某种改善，而网络的拓扑骨架基本上之前的模式，光波通信的潜力尚未完全发挥。
- 第三代通信网为**全光通信网**。
 - 1990年后，随着光纤与光波电子技术的发展，新颖光纤与半导体功能光器件相继问世，掀起了发展全光通信网的潮流。
 - 这种通信网中，不仅用光波系统传输信号，交换、复用、控制与路由选择等亦全部在光域完成，由此构建真正的光波通信网。

1.5.2 趋势

1. 光纤传输容量的提高

- 提高通信容量的主要途径是**减小信道间距**, **扩展带宽**以及采用**混合复用**技术, 信道间距是在带宽不变的条件下, 增加光信道数目从而提高WDM系统的通信容量的一种方法。
- **扩展带宽**是针对传统光纤传输系统主要工作在低损耗C (1530nm~1565nm) 波段。已经开辟了长波段L (1565nm~1625nm) 与短波段S (1460nm~1530nm) 两个波段, 并且实现三个波段信号的同时传输。
- 而**混合复用**技术是由单一复用技术向多种复用技术混合使用的方向发展, 如双向传输的波分复用、偏振复用 (PDM) 与波分复用混合方式, 波分复用与码分复用 (CDM) 混合方式等。
 - 当单信道码率达到40Gb/s以上时, 信号必须采用光**时分**复用。光时分复用利用了高速**光开关**将多路光信号在时域里复用到一路上的技术, 其基本原理是在发送端的同一载波波长上, 把时间分割成周期性的帧, 每一帧再分割成若干个时隙, 然后根据一定的时隙分配原则, 使不同的信源在每帧内按照指定的时隙向信道发送信号, 接收端在同步的条件下, 分别在各个时隙中取回各自的信号。

1.5.2 趋势

2. 宽带光放大器

- 随着光纤通信的带宽从C波段到L波段及S波段的发展，要实现长距离传输，对光放大器带宽提出了新的要求，宽带光放大器成为研究的热点。
- 前述的掺铒光纤放大器（硅化物）工作在C波段，其平坦增益带宽为30nm，它对波分复用系统有较大的限制。而碲化物掺铒光纤放大器的增益带宽高到50nm(1560nm~1610nm)增益光谱覆盖了C和L两个区域。
- 而覆盖全光波段(1270~1670nm)喇曼光纤放大器的研究已经成熟，已有10Gb/s波分复用系统(40个信道)利用分布喇曼放大方式传输1600km和10Gb/s波分复用(105个信道)利用分布喇曼放大方式传输8186km实验报道。
- 正在研制中的宽带放大器还有掺铋光纤放大器，其工作波段为1450~1480nm，增益漂移的掺铋光纤放大器工作波段为1480nm~1510nm。

主要内容

1.5.2 趋势

3. 密集波分复用系统中的光源复用和解复用器

- 按照通信间隔的差异, 波分复用WDM又可分为**粗波**分复用CWDM (Coarse WDM, 信道间隔小于20nm), **密集**波分复用DWDM (Dense WDM, 信道间隔小于或等于1.6nm), **超密集**波分复用SDWDM (Super DWDM, 信道间距小于或等于25GHz)。
 - 信道间隔可用频率表示, 也可用长度表示, 两者之间的关系是 $\Delta f = (c\Delta\lambda) / \lambda^2$
 - 介于CWDM和DWDM之间的波分复用, 为一般波分复用。
 - 在DWDM和SDWDM系统中, 要求采用**可调谐**光源替代固定波长光源以降低通信系统的成本, 波分复用可调谐光源的基本要求是输出波长稳定, 波段间隙小。
- 复用/解复用器是组合和分离不同波长信号的装置, 制作光复用/解复用的技术很多, 其中阵列波长光栅AWG (Arrayed Wavelength Grating) 由于结构具有复用/解复用双向对称功能, 信道数几乎不受限制而成为研究的热点。
 - 如现在已经能制作400个信道、25GHz间距的AWG, 它可以覆盖整个C和L波段。AWG除了最基本的复用/解复用功能外, 还便于与其它器件集成, 如和集成电吸收调制器/半导体光放大器构成32波长直接可调锁模激光器, 与点阵式交叉滤波器集成构成WDM滤波器等, AWG器件具有尺寸小、易于集成、性能稳定和制作成本低等优点, 它正受到越来越多的关注。

1.5.2 趋势

4. 偏振模色散补偿技术

- 偏振模色散是由于光纤不圆度、光纤内部残留应力、环境温度变化等因素导致的光纤内部产生双折射现象，引起在垂直光纤轴线的平面内两个相互正交偏振的基模光场的传输速度不同，从而产生了脉冲展宽。
 - 因为偏振模色散对系统的损害在码率较高时（大于10Gb/s）较为明显，所以，它成为高速光通信系统发展的主要障碍之一。
 - 目前抑制和补偿偏振模色散的技术主要有：制作超低偏振模色散光纤；选择信号码型（如归零码）以抑制偏振模色散，在DWDM系统中，相邻信道采用正交入射的方法抑制偏振模色散等。

2020年全球海底光缆分布图

- 全球通信来说，海底光缆才是互联网的“中枢神经”，它承载了全球90%以上的国际语音和数据传输。
 - 海底光缆需加强的铠装保护。从外到内分为：聚乙烯层、聚酯树脂、钢绞线层、铝制防水层、碳酸树脂层、铜管、石蜡、烷烃层，最后才到光纤。如此密集的保护层，为了防止光缆受到海水的侵蚀。可不管如何保护，在时间的冲刷下，光缆依旧会受损。海底光缆寿命一般25年左右。
- https://blog.csdn.net/Conrad_Wang/article/details/105022745
- [参考：世界海底光缆分布图！ Conrad Wang的博客-CSDN博客 世界海底光缆分布图](#)
 - 中国大陆的海底光缆连接点只有几个，因此非常容易对出入境的信息进行控制。
 - 第一个是青岛(2条海缆，包括EAC-C2C和TPE海缆)
 - 第二个是上海(3条海缆，包括EAC-C2C、FEA、Seamewe-3海缆)
 - 第三个是福州(1条海缆，包括TSE-1)
 - 第四个是汕头(3条海缆，包括APCN-2、Seamewe-3、SJC)

《2021年中国光纤光缆产业全景图谱》 (附市场供需、竞争格局、发展前景等)

□ <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1704503403666701625&wfr=spider&for=pc>

□ 光纤光缆上游行业中，代表性企业有长飞光纤、亨通光电、富通集团、中天科技等等；中游光纤光缆的代表性企业有长飞光纤、亨通光电、富通集团、中天科技、特发信息、汉信光电等。

图表3：中国光纤光缆行业产业链全景图

图表12：中国光纤光缆企业区域分布热力图(按主要上市企业注册地分布)



资料来源：企查查 前瞻产业研究院整理

料来源：前瞻产业研究院整理

@前瞻经济学人APPP

@前瞻经济学人APP

1.6课后巩固

- 1. 目前光纤通信采用的工作波长有哪些？为什么？
- 2. 光纤通信的优缺点？
- 3. 光纤的传输窗口有哪些？什么是光纤通信？光纤通信系统的构成及各个主要部件的作用？

1.目前光纤通信采用的工作波长有哪些？为什么？

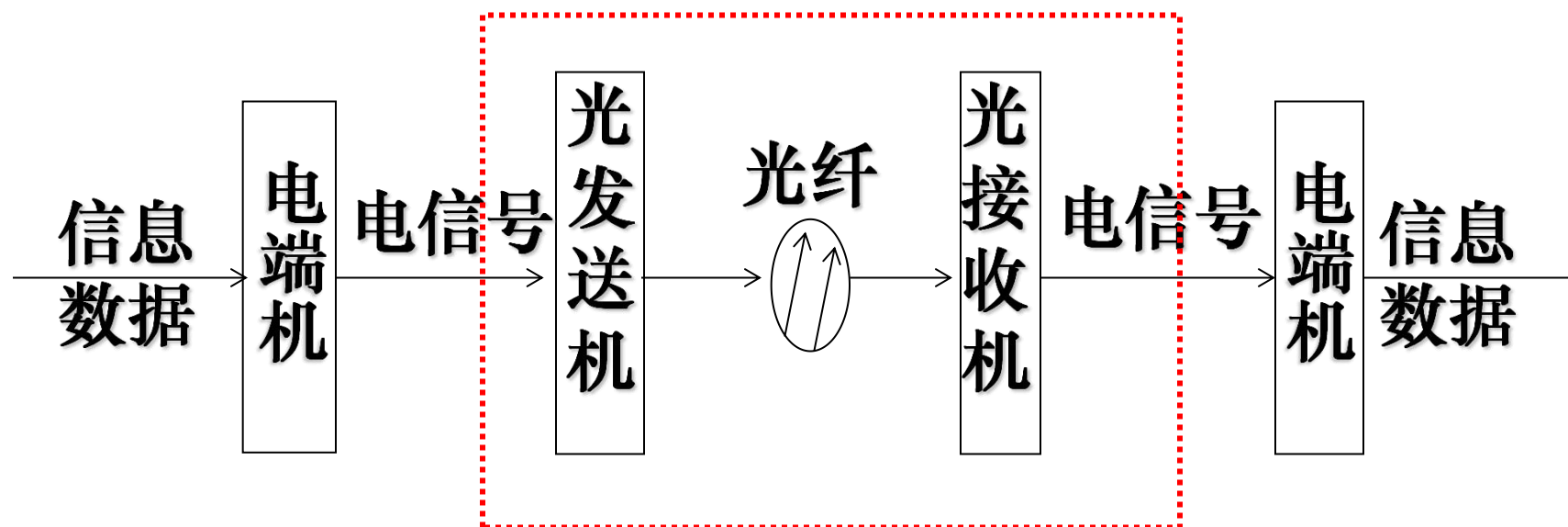
- 答：光纤传输窗口有①850nm，②1310nm，③1550nm
其他：如④长波段L1565-1625nm⑤超常波段U1625-1675nm等
- 原因由损耗特性决定：低损耗

2.光纤通信的优缺点是什么？

- 答：**优点**：①传输频带宽，通信容量大；②中继距离远；③抗电磁干扰能力强；④细且轻；⑤均衡容易；⑥资源丰富，节约有色金属和能源；⑦经济效益好；⑧抗腐蚀、不怕潮湿等。
- 缺点**：①光纤的切断和接续需要专门的工具，设备和技术；②分路，耦合不灵活；③光纤质地脆，机械强度差，光缆的弯曲半径不能过小；④有些光器件比较昂贵，维护成本高；⑤有供电困难问题等。

3. 什么是光纤通信？ 光纤通信系统的构成及各个主要部件及作用？

- 以光为载波、光纤为传输媒质的一种信息传送系统。
- 光纤通信系统的构成



3. 什么是光纤通信？光纤通信系统的构成及各个主要部件及作用？

答：光发射机的部件有：①**半导体光源**②调制电路③保护电路④光电路编码等。

光发射机的核心部件是：半导体光源
作用是完成将电信号转换成光信号。

光接收机的部件有：①**光电检测器**②前放、AGC、主放③均衡、判决再生电路④光线路解码。

作用是将光信号转换为电信号