

第四章 光纤通信



4.1 光纤通信的起源和发展

4.2 光纤的基本理论

4.3 光源和光检测器

4.4 光纤通信系统

4.5 光纤通信新技术



4.1 光纤通信的起源与发展



4.1.1 贝尔与光电话

4.1.2 阿尔费罗夫与半导体激光器

4.1.3 高琨与光纤

4.1.4 光纤通信的发展

4.1.5 光纤通信的特点



4.1.1 贝尔与光电话



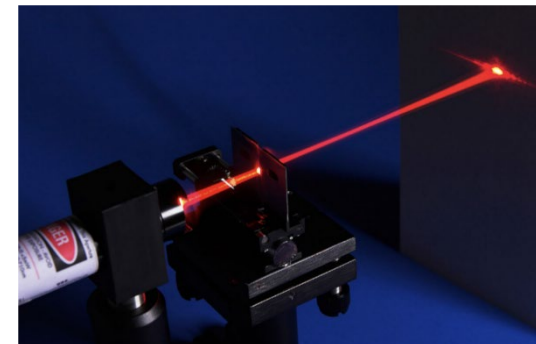
(1) 贝尔与光电话

① 具有稳定相干性的可以高速调制的光源：激光

• 1880年，贝尔
提出一种光电话系统

• 1960年，梅曼
研制出第一个红宝石
激光器

• 1970年，阿尔费罗夫
以异质结半导体为基础
研制出首个室温半导体激光器



半导体激光器

• 1966年，高锟
提出从材质纯度方面
提高光纤传输效率

• 1970年，美国康宁公司
研制出首根低损耗石英光纤



第一根低损耗光纤

② 低损耗的传输媒质：光纤

4.1.2 阿尔费罗夫与半导体激光器



(1) 激光器

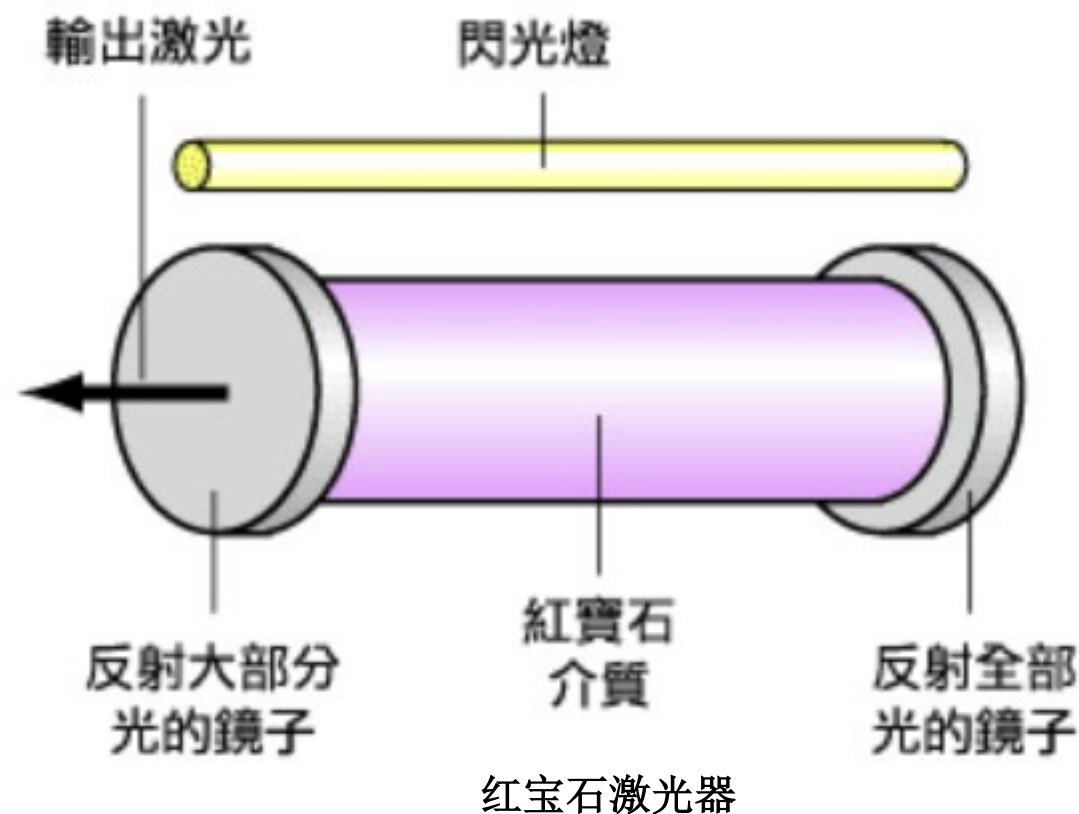
① 激光器的诞生：

- 红宝石激光器：1960年，梅曼(美国)
- 氦-氖激光器
- 二氧化碳激光器
- 半导体激光器

② 激光：基于受激辐射的光放大，其概念来自于1917年爱因斯坦提出的受激辐射理论

③ 特点：

- 具有非常好的相干性
- 与非相干光源对比，可以适应高速稳定的调制



4.1.2 阿尔费罗夫与半导体激光器



(2) 室温激光器

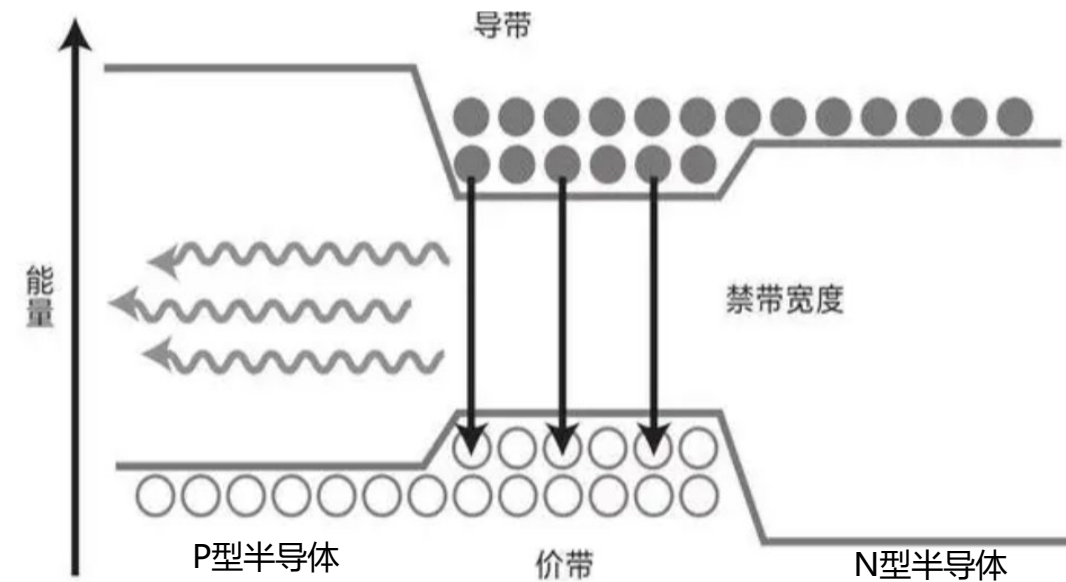
① 问题：当时基于PN结的半导体激光器无法在室温下连续工作

② 室温激光器的诞生：

- 1963年，阿尔费罗夫(俄国)率先提出半导体双异质结型结构
- 1966年，首次发表半导体异质结超注入研究，研制出第一个实用的异质结器件
- 1970年，他与同事们成功研制出世界上第一台可室温下连续工作的半导体激光器

③ 半导体异质结器件：

- 传统晶体管只采用一种半导体材料制成
- 异质结器件由两种或两种以上的半导体材料构成



双异质结能带图

4.1.3 高琨与光纤



(1) 光纤

① 起源:

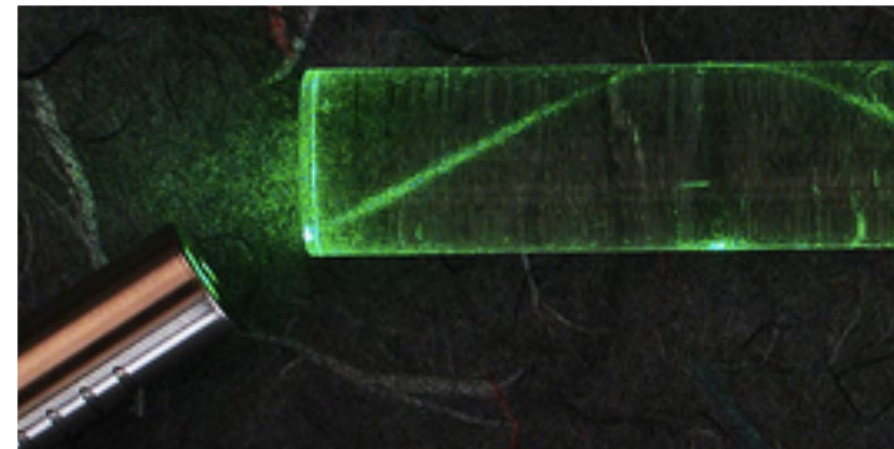
- 20世纪中叶，人们就发明了由透明玻璃棒制成的光导纤维，但是传输损耗非常巨大

② 改进:

- 1966年，高琨和霍克哈姆提出
- 减少光纤材料中的杂质含量，提高材料的均匀性

③ 低损耗光纤的诞生:

- 1970年，美国康宁玻璃公司
- 研制出第一根20dB/km的低损耗石英光纤



激光在亚克力管内的全反射



高琨

4.1.4 光纤通信的发展



(1) 20世纪70年代和80年代光纤通信发展

① 趋势：降低损耗，延长距离

② 短波长向长波长发展：

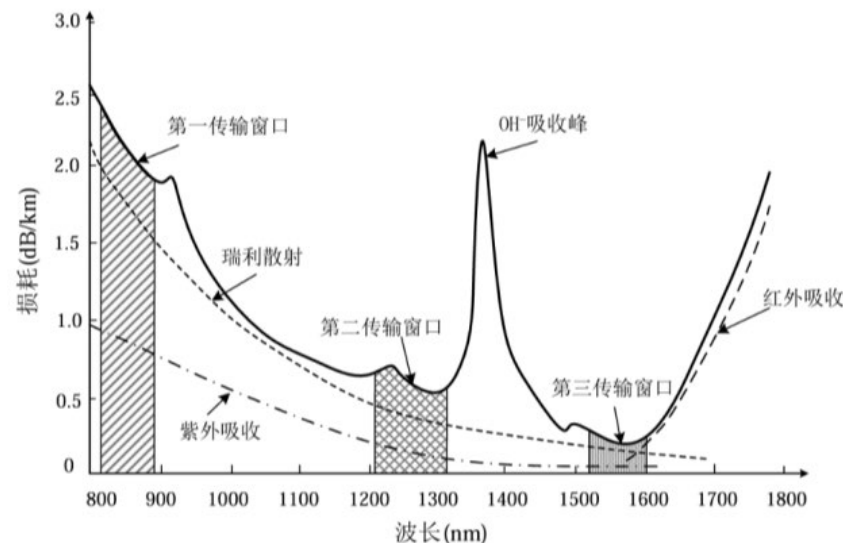
- 光纤在长波长处损耗更低
- 850nm波长处的损耗下降到 2dB/km
- 1310nm波长处的损耗下降0.5dB/km
- 1550nm波长处的损耗下降到0.2dB/km

③ 多模光纤向单模光纤发展：

- 消除多模光纤的模间色散
- 传输带宽更大

④ 广泛部署：

- 大带宽、高容量和低损耗



光纤的损耗谱



海底光缆

4.1.4 光纤通信的发展



(2) 20世纪90年代光纤通信发展

① 趋势：掺铒光纤放大器 (EDFA) 和密集波分复用 (DWDM) 技术

② 原因：

- 光纤传输速率达到瓶颈
- “光-电-光”的中继方式速率受限且结构复杂

③ 掺铒光纤放大器(EDFA)：

- 在 1550nm 波长附近数十个纳米的波带内对光波进行透明放大
- 有效补偿光纤损耗

④ 密集波分复用 (DWDM) 技术：

- 多个波长的光信号复用在一根光纤上进行传送
- 大幅提升单根光纤的通信容量

4.1.4 光纤通信的发展



(3) 21世纪光纤通信发展

① 光纤方面：

- 少模光纤
- 多芯光纤
- 空芯光纤

② 通信系统方面：

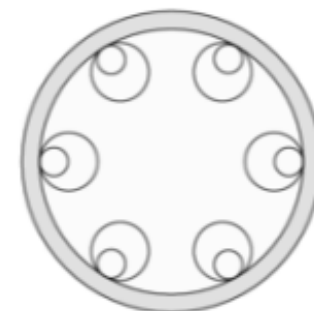
- 高速率
- 长距离
- 大容量
- 高频谱效率

③ 组网方面：

- 多层次的光网络
- “南北纵穿、东西横跨”



多芯光纤



反谐振空芯光纤



中国光纤网络图

4.1.5 光纤通信的特点



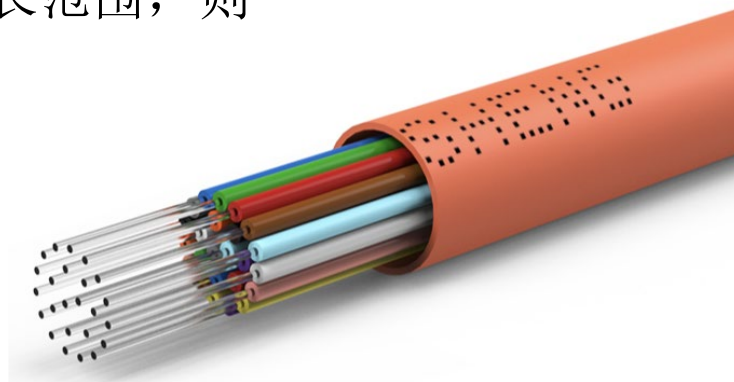
(1) 光纤通信的特点

① 可用频带宽，通信容量大

石英光纤的低损耗频段为 $800\text{nm} \sim 1650\text{nm}$ ，对应频带在 200THz 左右。如将光纤的低损耗和低色散区做到 $1250\text{nm} \sim 1650\text{nm}$ 波长范围，则相应的带宽可达 50THz 左右。

② 传输损耗低，中继距离长

石英光纤 1550nm 波长处的传输损耗为 0.2dB/km ，甚至可达 0.15dB/km 。损耗低，无中继传输距离就长。一般光纤通信系统的无中继传输距离为80公里左右。



③ 抗电磁干扰，无电磁污染

通信用光纤大多由石英材料制成，抗电磁干扰，也不受外界光的影响。在强电、雷电甚至核辐射环境中，光纤通信也能正常进行。另外光纤不向外辐射电磁波，不会产生电磁污染。

4.1.5 光纤通信的特点

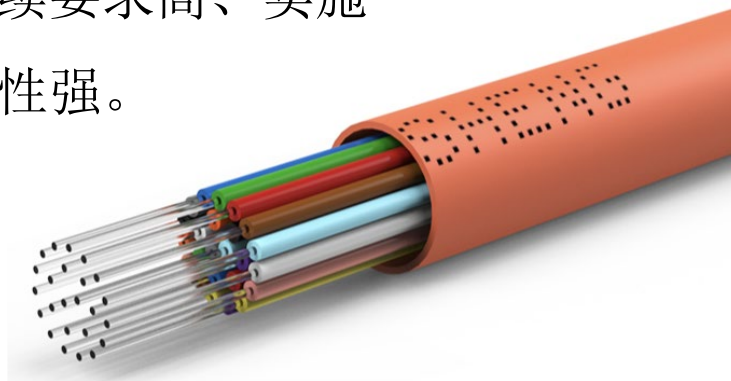
(1) 光纤通信的特点

④ 串话小，保密性强

光在光纤中传输时，能量集中在纤芯中，向外泄漏的光能很小。同一根光缆中的光纤之间不会产生干扰和串话，另外，光纤的接续要求高、实施困难，因此不容易被窃听，保密性强。

⑤ 体积小，重量轻，便于施工维护

光纤外径仅为 $125\mu\text{m}$ ，细如发丝，其套塑后的外径也小于 1mm ，加之光纤材料的比重小，成缆后重量轻。经过表面涂覆的光纤可绕性好，便于敷设，可架空、直埋或置入管道，已广泛用于陆地或海底。



⑥ 材料资源丰富，价格低廉

通信用电缆的主要原材料为稀有金属铜，其资源严重紧缺。石英光纤的主体材料是二氧化硅，材料资源丰富，价格低廉，因而使用光纤大大节约了有色金属资源。

北京邮电大学

谢谢观看

4.1 光纤通信的起源和发展

4.2 光纤的基本理论

4.3 光源和光检测器

4.4 光纤通信系统

4.5 光纤通信新技术



4.2 光纤的基本理论



4.2.1 光纤的结构与分类

4.2.2 光纤的传输理论

4.2.3 光纤的传输特性

4.2.4 单模光纤

4.2.5 新型光纤

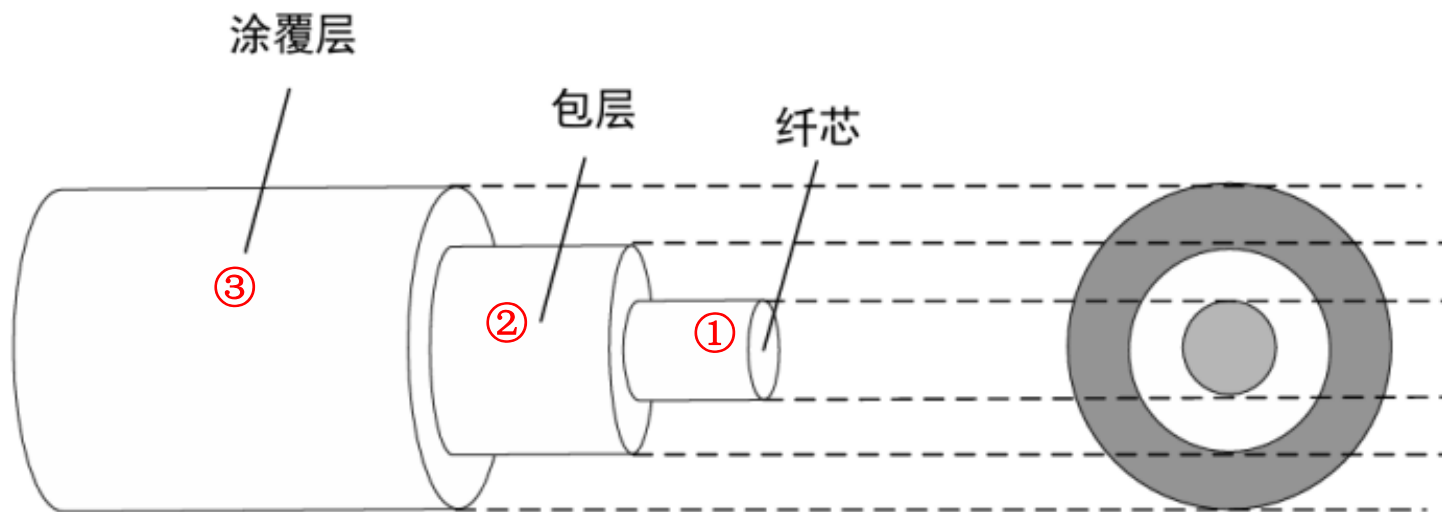


4.2.1 光纤的结构与分类



(1) 光纤的结构

通俗来讲，光纤是截面积小到和头发丝相比拟的可绕透明长丝，其结构与横截面如下图所示



光纤结构和横截面示意图

- ① 纤芯和包层均由高度透明的材料构成
- ② 包层的折射率略小于纤芯，从而可以形成光波导效应
- ③ 涂覆层的作用是保护光纤不受外部损伤

4.2.1 光纤的结构与分类



(1) 光纤的结构

① 按光纤横截面的折射率分布分类:

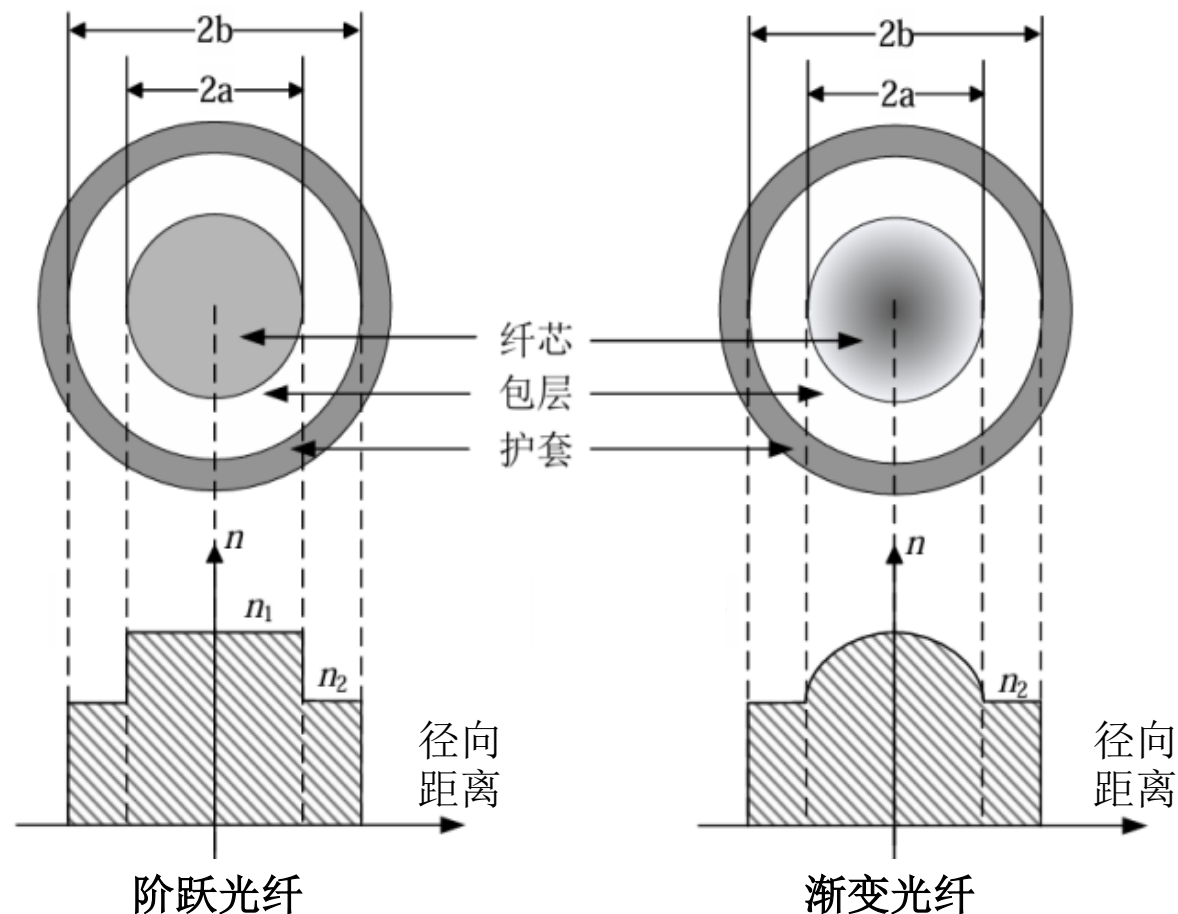
光纤可分为阶跃光纤和渐变光纤, 如图所示

(a) 在阶跃光纤横截面上:

- 纤芯和包层的折射率分布均匀
- 折射率在纤芯和包层的界面上发生突变

(b) 在渐变光纤横截面上:

- 纤芯折射率分布非均匀
- 折射率随纤芯半径的增大而减小
- 折射率在纤芯和包层的界面上是连续的



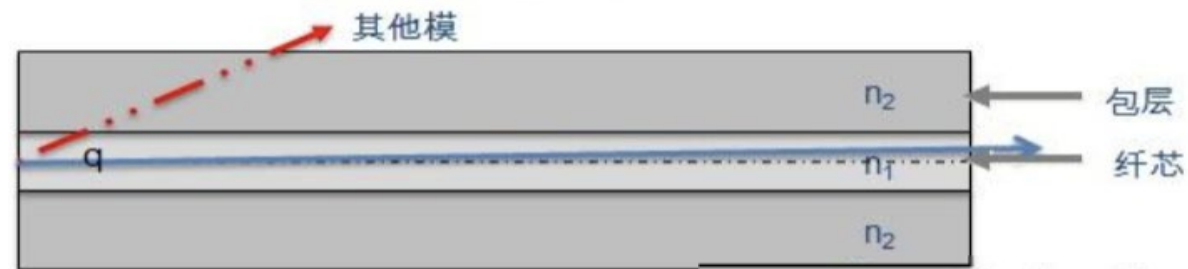
4.2.1 光纤的结构与分类



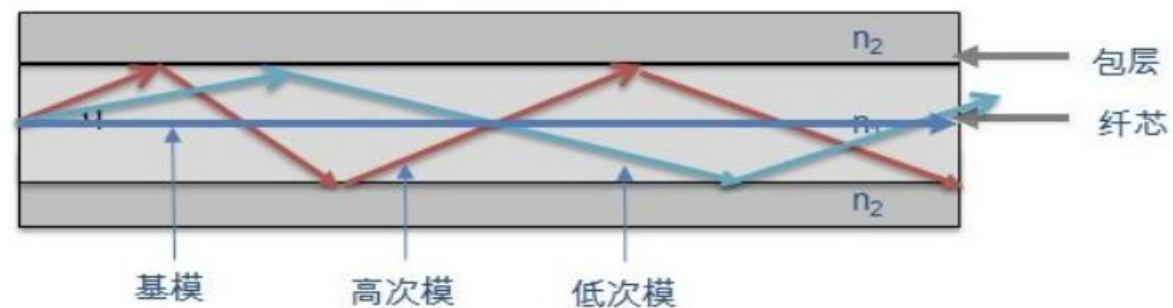
(2) 光纤的分类

② 按光纤中的传导模式数量分类

- **传播模式**：光作为一种电磁波，沿光纤传输时可能存在的多种不同的电磁场分布形式
- **传导模式**：可以远距离传播的传播模式
- **单模光纤**：光纤中只传输一种模式，即基模（最低阶传导模式）。单模光纤适用于长距离、大容量的光纤通信系统。
- **多模光纤**：光纤中同时传输多个模式。多模光纤适用于中距离、中容量的光纤通信系统。



单模光纤



多模光纤

4.2.1 光纤的结构与分类

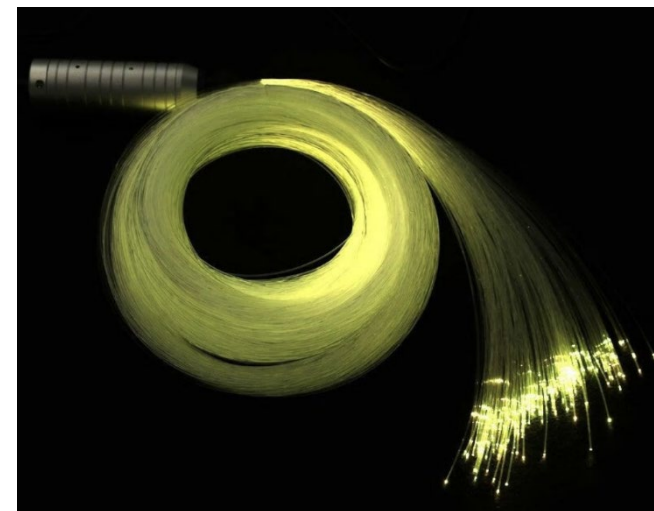
(2) 光纤的分类

③ 按国际电联电信标准化部门 (ITU-T) 建议分类:

- G. 651 光纤 (渐变型多模光纤)
- G. 652 光纤 (常规单模光纤)
- G. 653 光纤 (色散位移单模光纤)
- G. 654 光纤 (截止波长单模光纤)
- G. 655 光纤 (非零色散位移单模光纤)
- G. 656 光纤 (宽带非零色散位移单模光纤)
- G. 657 光纤 (弯曲损耗不敏感单模光纤)

④ 按光纤制作的原材料分类:

- 石英系光纤 (主要使用)
- 塑料包层光纤
- 多组分玻璃光纤
- 全塑光纤



全塑光纤

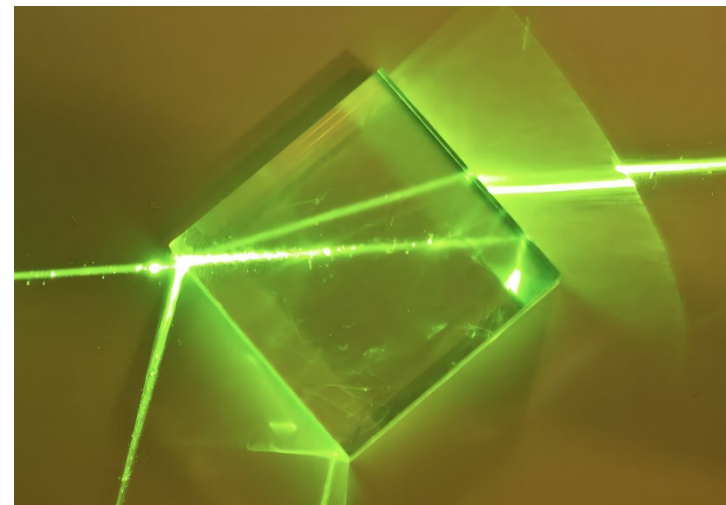
4.2.2 光纤的传输理论



(1) 光纤的传输理论

① 射线光学(几何光学): 用光射线代表光能量传输线路来分析问题的理论

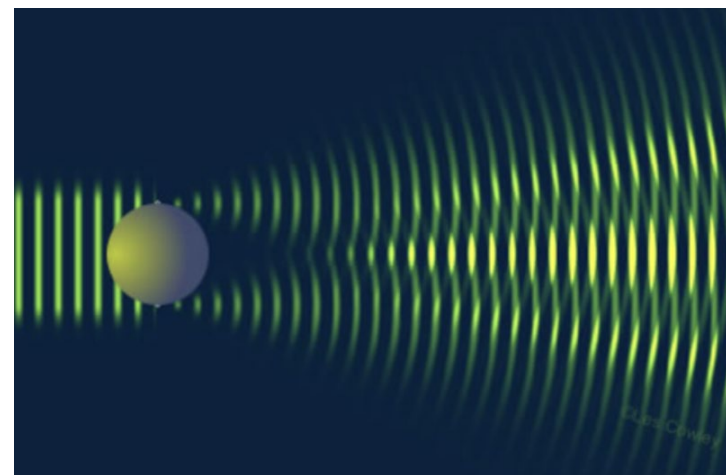
- 分析方法和结果简单直观
- 适用于光波长远远小于光波导尺寸的多模光纤



所有光路都近似一条线

② 波动光学: 把光纤中的光波作为经典电磁波来分析问题的理论

- 分析方法和结果精确全面
- 对单模光纤和多模光纤都适用



光的衍射体现光的波动性

4.2.2 光纤的传输理论



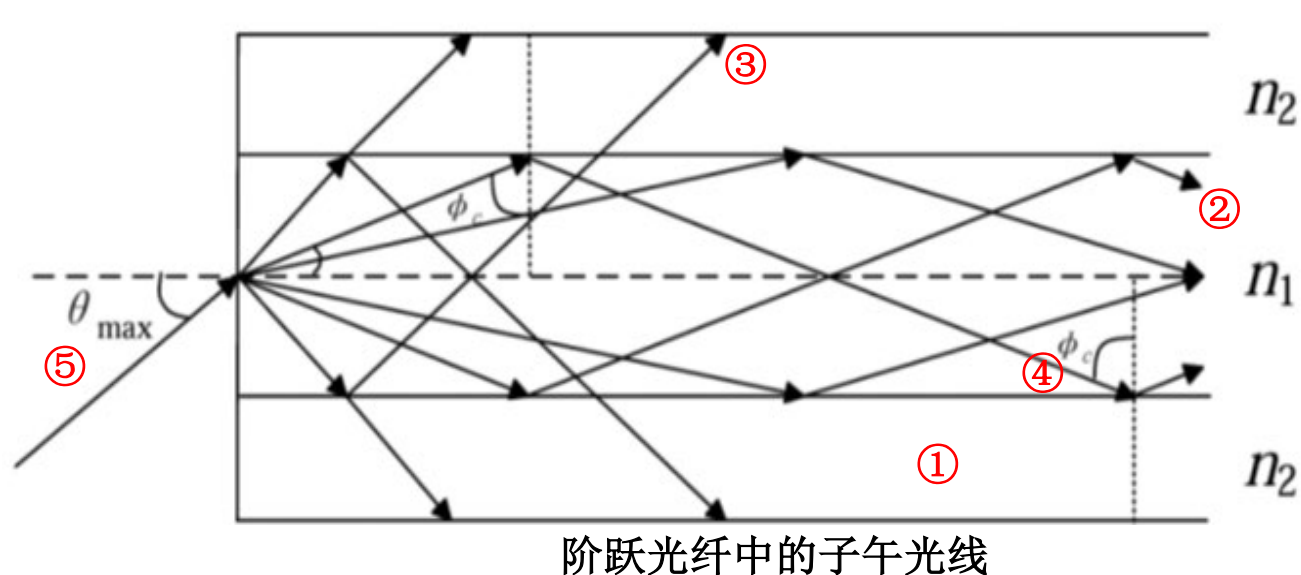
(2) 多模阶跃光纤的射线光学理论

在多模阶跃光纤中可以传播的射线有两种：

- ① 斜光线：轨迹很难跟踪，不是主要研究对象
- ② 子午光线：传输中总是位于子午面内的光线，可以分为约束光线和非约束光线

多模阶跃光纤的子午光线如图所示：

- ① 子午面：通过光纤轴线的平面
- ② 约束光线：由几何光学的全反射定律约束在纤芯内沿光纤轴线方向传播的光线
- ③ 非约束光线：折射到纤芯外面的光线
- ④ 全反射临界角 ϕ_c
- ⑤ 端面最大入射角 θ_{max} 。除此之外相对折射率差、数值孔径和时延差也是光纤的重要参数



4.2.2 光纤的传输理论



(2) 多模阶跃光纤的射线光学理论

在使用射线光学理论分析多模阶跃光纤的导光原理时常用的参数：

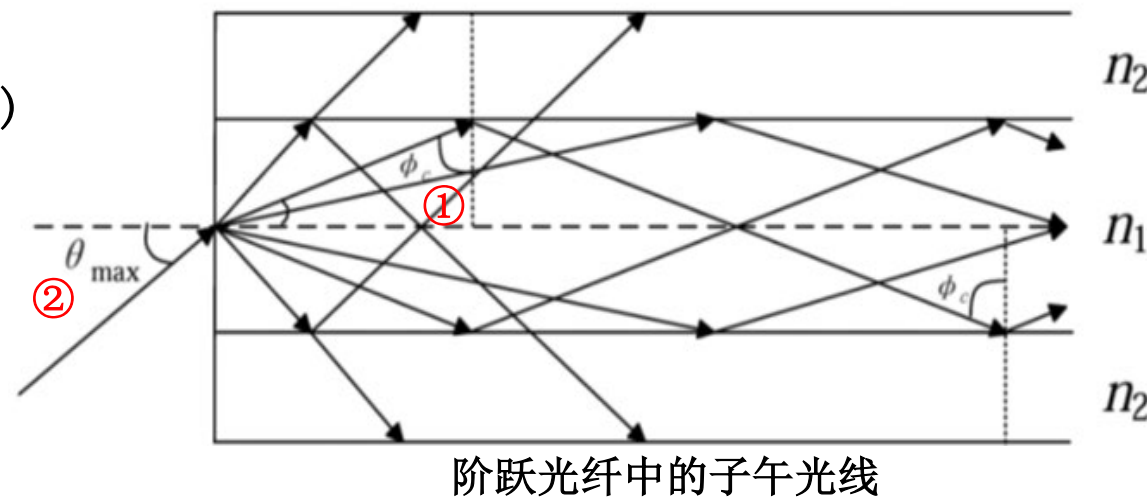
- ① 全反射临界角：在纤芯内满足全反射条件的光线在纤芯和包层界面上的最小入射角，表达式为

$$\phi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

- ② 端面最大入射角：在纤芯内满足全反射条件的光线在纤芯端面的最大入射角，表达式为

$$\sin \theta_{\max} = n_1 \sin(90^\circ - \phi_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\theta_{\max} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$



4.2.2 光纤的传输理论



(2) 多模阶跃光纤的射线光学理论

③ 相对折射率差：表征纤芯和包层的折射率差距，表达式为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (3)$$

➤ 光纤通信中所用光纤的纤芯和包层的折射率一般差别极小，被称为弱波导光纤， Δ 可近似表示为

$$\Delta \approx \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \approx \frac{(n_1 - n_2)}{n_2}$$

④ 数值孔径：表征了光纤的集光能力，表达式为

$$NA = \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4)$$

➤ 相对折射率过大会导致色散现象，因此通信用光纤的数值孔径是较小的

4.2.2 光纤的传输理论



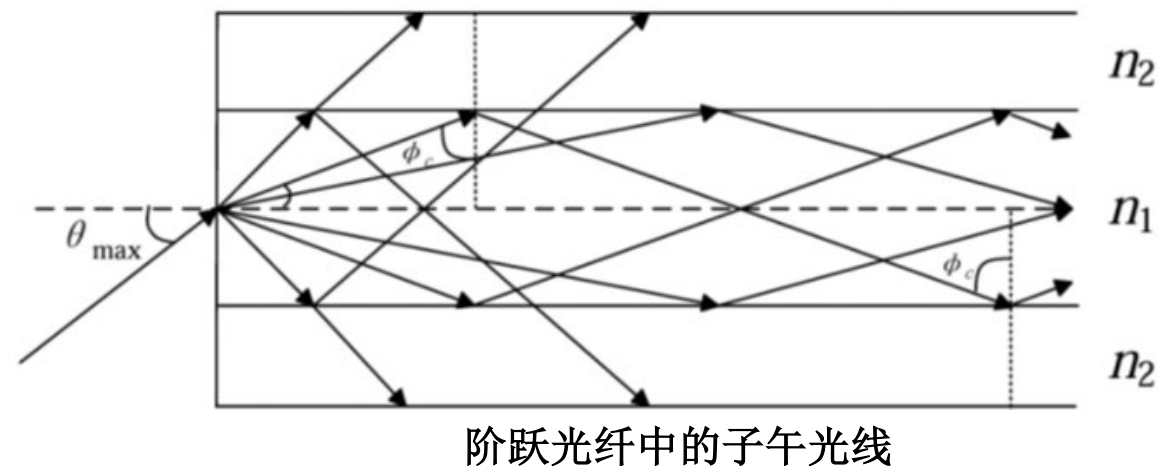
(2) 多模阶跃光纤的射线光学理论

⑤ 最大群时延差：表征模式色散的程度，表达式为

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{\max} &= \tau_{\max} - \tau_{\min} \\ &= \frac{Ln_1}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_2} \\ &\approx \frac{\Delta Ln_1}{c}\end{aligned}\quad (5)$$

模式色散：

- 入射角不同的光线的传输路径是不同的
- 不同光线所携带的能量到达终端的时间不同
- 传输的光脉冲发生展宽现象



阶跃光纤中的子午光线

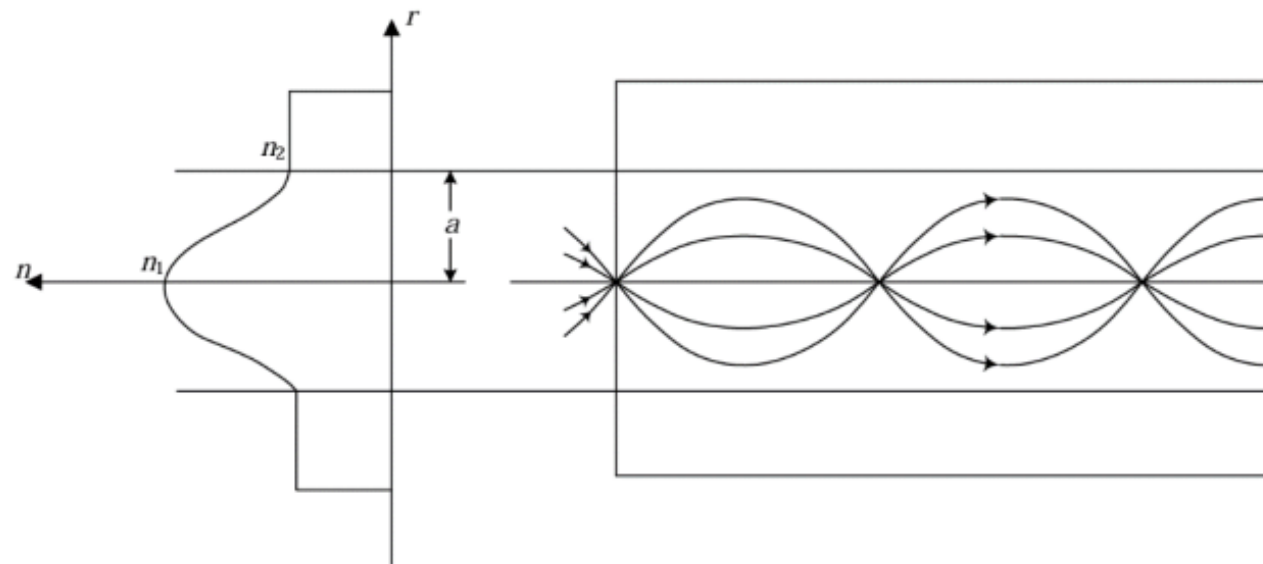
4.2.2 光纤的传输理论



(3) 多模渐变光纤的射线光学理论

① 多模渐变光纤可以克服色散现象：

- 纤芯的折射率随纤芯半径 r 的增加按一定规律减小
- 子午光线的轨迹是曲线
- 全部子午射线以同样的轴向速度在光纤中传输
- 缩短时延差



多模渐变光纤中的子午光线

4.2.2 光纤的传输理论

(4) 光纤的波动光学理论

① 定义：波动光学理论是指从电磁场的基本方程—麦克斯韦方程组出发，求出该组方程满足边界条件的解，由此得到光纤中场的表达式

② 常用的求解方法：

标量近似解法：一种针对弱导波光纤的近似解法

- 可以简化分析，结果也比较简单
- 求解得到的模式不是真实存在的，用 LP_{mn} 模表示

矢量解法：求矢量亥姆霍兹方程满足光纤边界条件的解

- 求解得到的模式是真实存在的，基模为 HE_{11} 模

4.2.3 光纤的传输特性



(1) 光纤的损耗

① 光纤损耗的定义

光纤损耗：由于光纤对光波的衰减作用，光波在传输过程中功率随着距离的增加而不断下降的一种物理现象。

衰减系数：用于衡量光纤的损耗特性，定义为单位长度光纤引起的光功率衰减，表达式为

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \text{ (dB/km)} \quad (6)$$

其中：

$\alpha(\lambda)$ ——在波长 λ 处的衰减系数
 P_o ——光纤输出的光功率

P_i ——输入光纤的光功率
 L ——光纤的长度

引起光纤损耗的原因很复杂，降低损耗主要依靠提高材料的纯净度及改进光纤工艺

4.2.3 光纤的传输特性



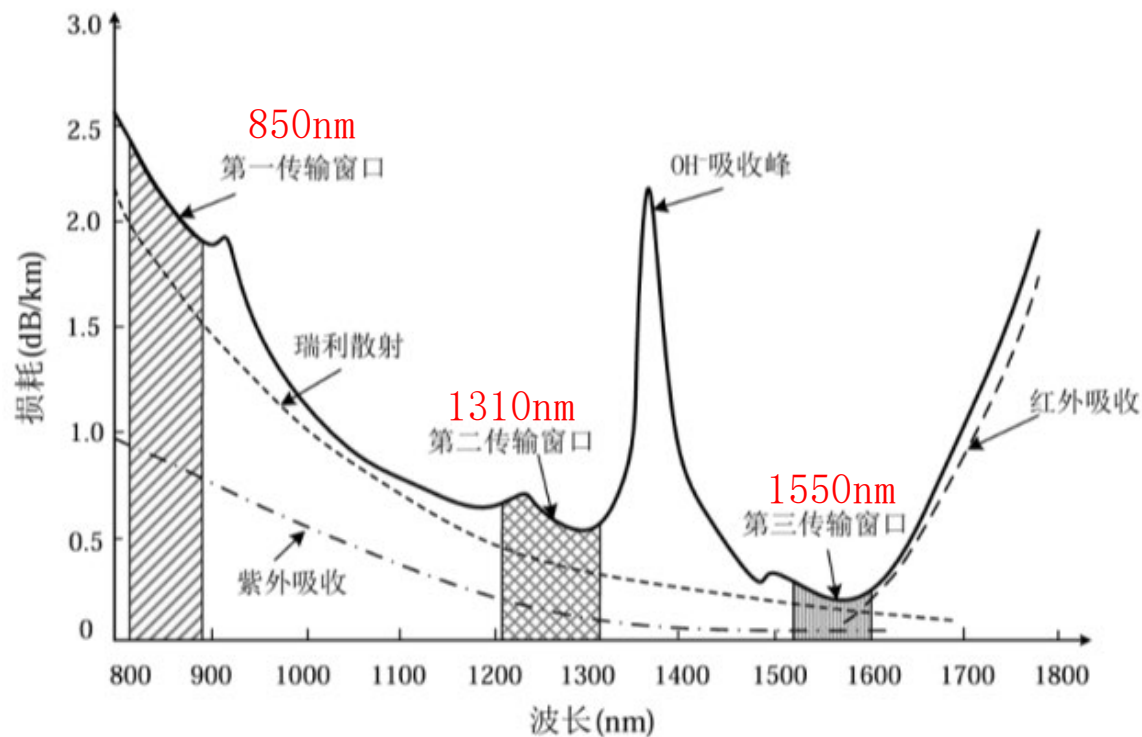
(1) 光纤的损耗

② 光纤的损耗谱

损耗谱：光纤的损耗与被传输的光波的波长有关，总的损耗随波长变化的曲线称为光纤的损耗特性曲线

三个低谷：

- 850nm波段：早期使用
- 1310nm波段：主要使用
- 1550nm波段：长距离大容量使用



光纤的损耗谱

4.2.3 光纤的传输特性



(2) 光纤的色散

① 光纤色散的概念

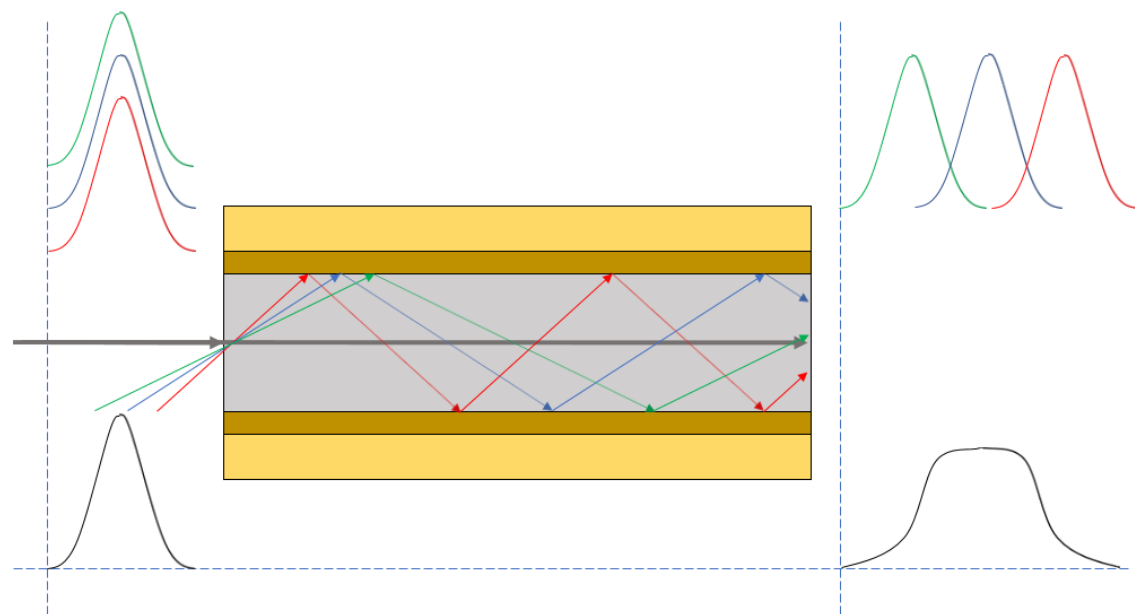
光纤色散： 由于光纤中传输的信号是由不同频率成分和不同模式成分所携带的，而不同频率成分和不同模式成分的传输速度不同，从而导致信号发生畸变的一种物理现象。

产生因素：

- 进入光纤中的光信号不是单色光
- 光纤对于光信号有色散作用

分类：

- 模式色散
- 波导色散
- 材料色散
- 偏振模色散



光纤色散导致信号畸变

4.2.3 光纤的传输特性



(2) 光纤的色散

② 光纤色散的表示

- 色散系数 $D(\lambda)$: 单位线宽的光源在单位长度光纤上所引起的时延差, 表达式为

$$D(\lambda) = \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} \quad (\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})) \quad (7)$$

其中:

$\Delta\tau_g$ ——单位长度光纤上的时延差 $\Delta\lambda$ ——光源的线宽

- 最大时延差 $\Delta\tau$: 最大时延差越大, 表明色散越严重
- 光纤带宽: 光纤带宽和时延差成反比关系

4.2.3 光纤的传输特性



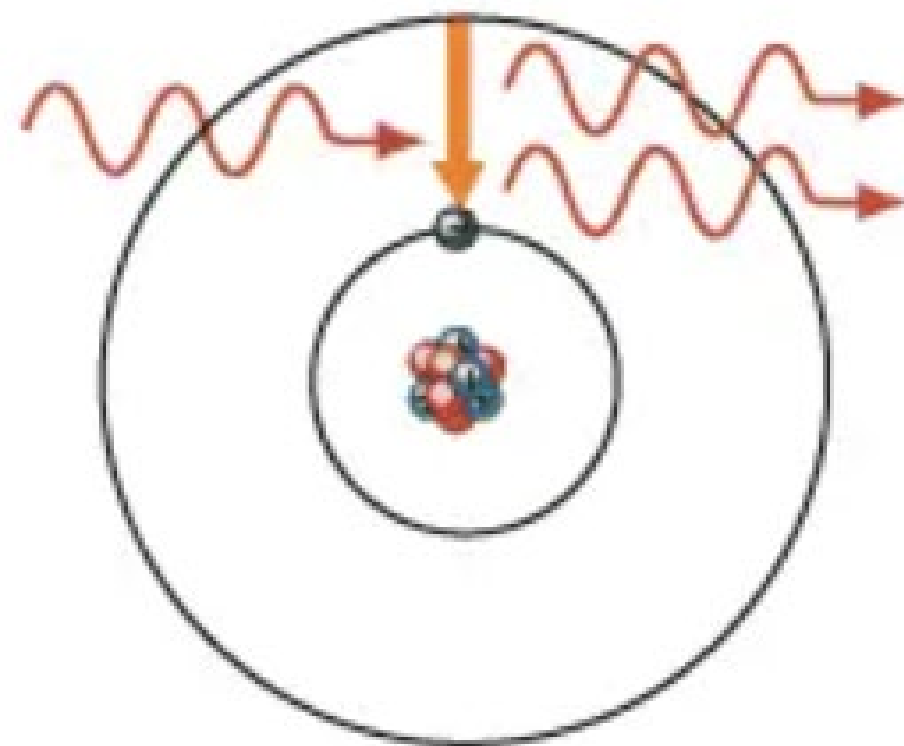
(3) 光纤的非线性效应

① 受激散射效应

受激散射效应：光场经过非弹性散射将能量传递给介质产生的效应，其中光波的频率会发生改变。可以看做一个高能量的光子被散射成一个低能量的光子(斯托克斯光子)，同时产生一个能量为两个光子能量差的另一个能量子(声子)。

影响：

- 使得入射光能量降低，在光线中造成损耗
- 产生新频率信号，造成不同信道之间的串话干扰
- 利用其频率偏移的特性可以制作光放大器等



受激散射效应

4.2.3 光纤的传输特性



(3) 光纤的非线性效应

② 折射率扰动

折射率扰动：光强度引起光纤折射率的变化而产生的效应，在较高光功率下需要考虑，表达式为

$$n = n_0 + \frac{n_2 P}{A_{eff}} \quad (8)$$

其中：

n_0 ——线性折射率	n_2 ——非线性折射率系数
P ——入射光功率	A_{eff} ——光纤有效面积

影响：

- 四波混频效应：两个或三个不同波长的光波混合后产生新的光波的现象，随光纤色散减小而加重
- 非线性相位调制效应：会使光脉冲频谱展宽

4.2.4 单模光纤

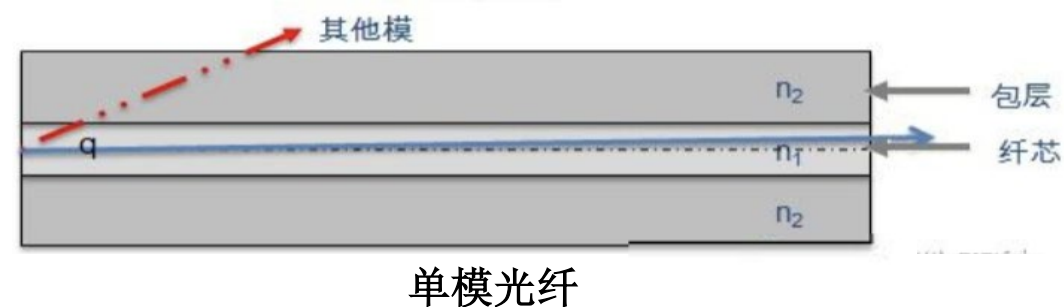


(1) 单模光纤

单模光纤：在给定的工作波长上只传输单一基模的光纤

特点：

- ① 芯径较小：纤芯直径一般为 $4\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$
- ② 不存在模式色散
- ③ 传输速率高：适用于长距离、大容量的光纤通信系统



(2) 单模光纤的特征参数

- ① 截止波长：光纤的第一个高阶模 LP_{11} 模截止时的波长，对于阶跃光纤的截止波长表达式为

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (9)$$

其中：

V_c —— LP_{11} 模的归一化截止频率

4.2.4 单模光纤



(2) 单模光纤的特征参数

② 模场直径

模场：光纤中基模的电场在空间的强度分布

模场直径：描述光纤中光功率沿光纤半径的分布状态，即光纤中光能的集中程度

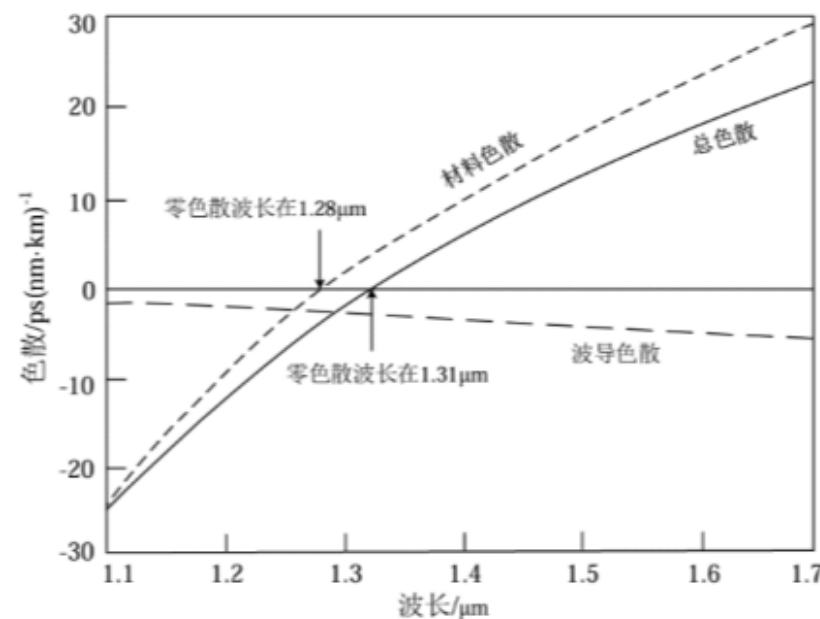
采用模场直径的原因：单模光纤中的场并不完全集中在纤芯中，而是有相当部分的能量在包层中传输

③ 色度色散

色度色散：材料色散和波导色散之和

零色散波长：总色散的零点，在1310nm左右

特点：可以通过改变光纤的波导色散使得光纤的零色散波长发生移动



单模光纤色度色散

4.2.5 新型光纤



(1) 少模光纤

少模光纤：一种纤芯面积足够大、足以利用几个有限的正交模式作为独立信道进行信息传送的新型光纤。

特点：

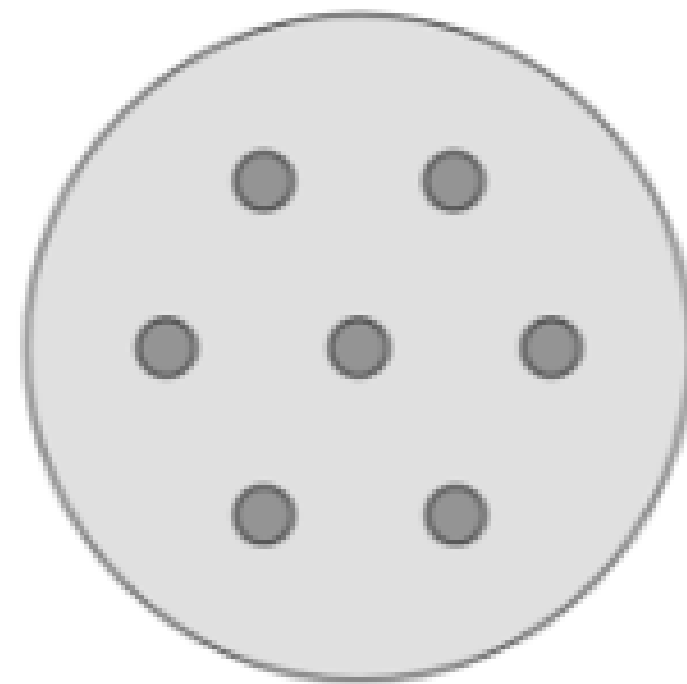
- ① 模式有限、稳定
- ② 每个模式可以作为独立信道进行复用

(2) 多芯光纤

多芯光纤：在一个共同的包层里面设计有多个纤芯，光信号在各纤芯中传输

特点：

- ① 容量显著增大
- ② 可以工作于单模传输状态或少模传输状态



多芯光纤

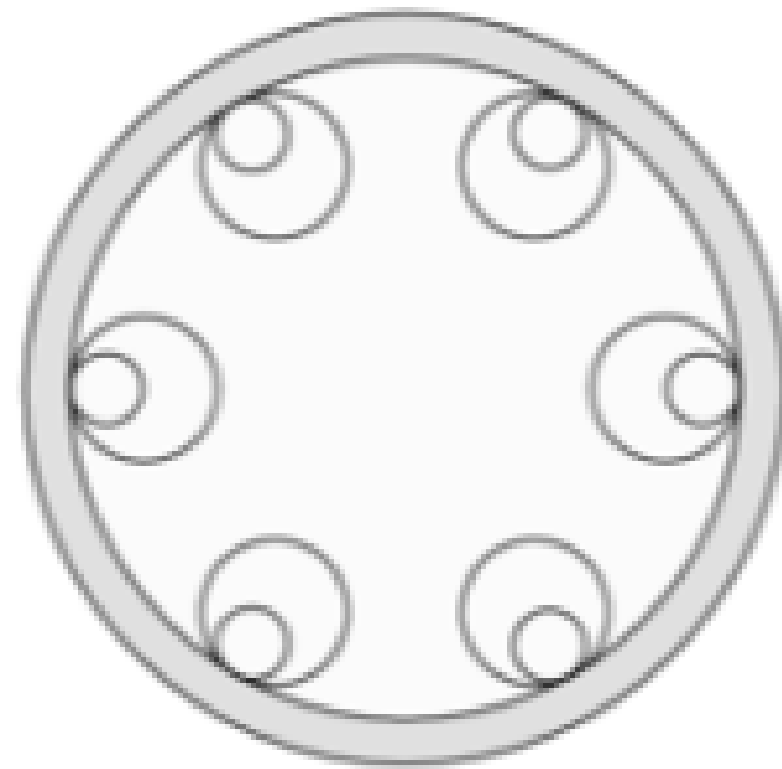
4.2.5 新型光纤

(3) 空芯光纤

空芯光纤：以空气为传输媒介，替代传统以“石英纤芯”作为传输介质的新型光纤

特点：

- ① 通过特定设计的包层结构，将光限制在空气纤芯中进行传输
- ② 理论上具有超低时延、超低非线性、超低损耗及更大带宽等特性



反谐振空芯光纤

北京邮电大学

谢谢观看

4.1 光纤通信的起源和发展

4.2 光纤的基本理论

4.3 光源和光检测器

4.4 光纤通信系统

4.5 光纤通信新技术



4.3 光源和光检测器



4.3.1 光与物质的相互作用

4.3.2 光源

4.3.3 光检测器



4.3.1 光与物质的相互作用



(1) 原子能级的跃迁

① 能级：核外电子绕原子核旋转所处的轨道

② 能级跃迁：

核外电子通过和外界交换能量发生的量子跃迁

③ 交换能量形式：

➤ 热能量——热跃迁

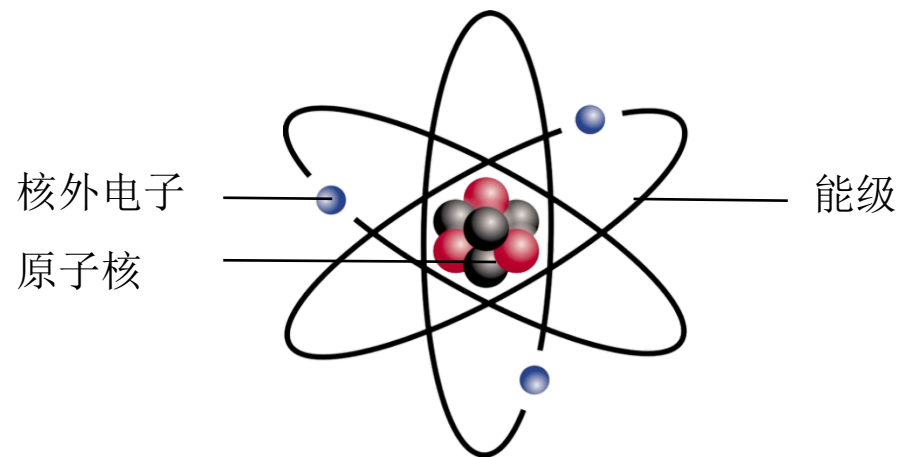
➤ 光能量——光跃迁

④ 光跃迁——光源和光检测器的基础原理

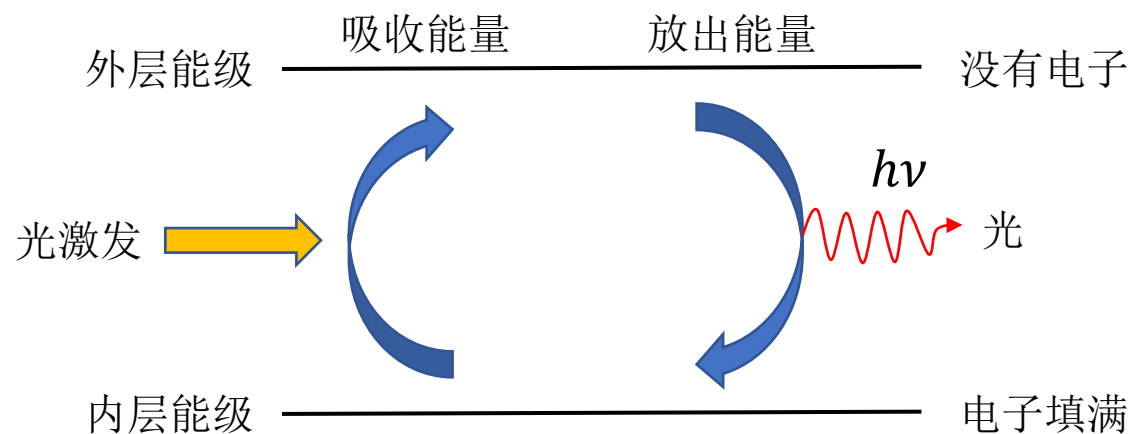
➤ 自发辐射

➤ 受激辐射

➤ 受激吸收



原子结构示意图



光跃迁原理图

4.3.1 光与物质的相互作用



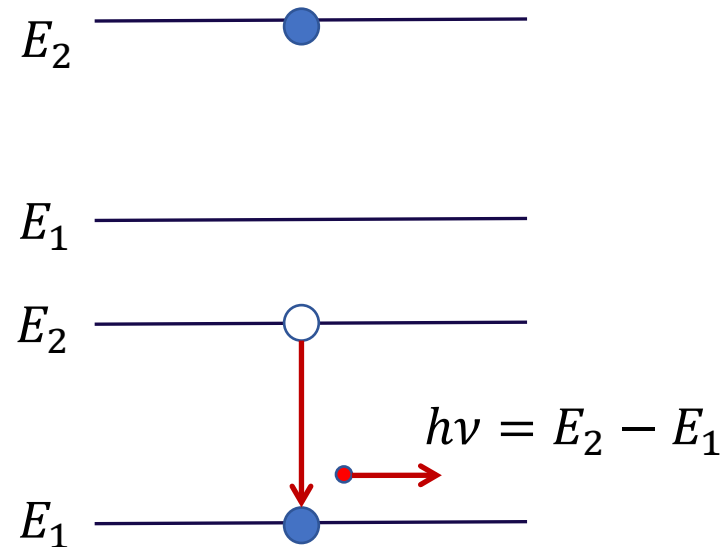
(2) 自发辐射

① 定义：处于高能级 E_2 上的电子自发的按照一定的概率跃迁到低能级 E_1 上，同时辐射出一个能量为高低能级差的频率为 ν 的光子的过程

② 特点：

- 处于高能级上的电子的自发行为，与外界激励无关
- 对大量原子构成的物质(或材料)来说，自发辐射光谱的范围很宽
- 自发辐射光是非相干光，是荧光

③ 应用：发光二极管(LED)



$h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ ，是普朗克常数

自发辐射原理示意图

4.3.1 光与物质的相互作用



(3) 受激辐射

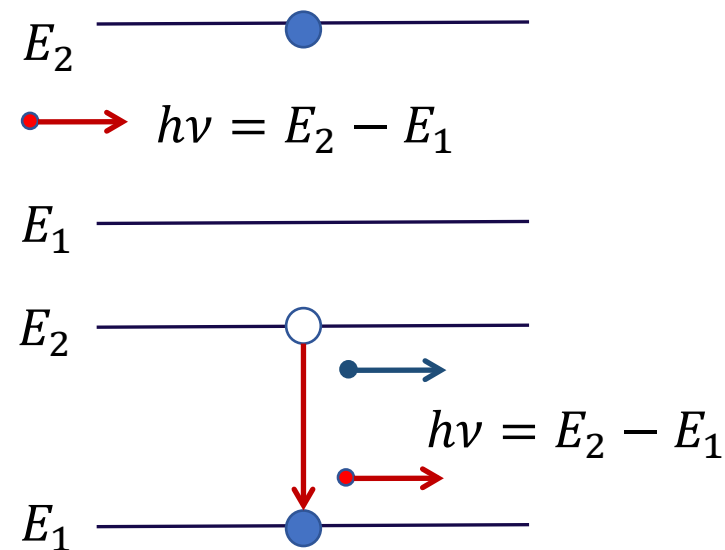
① 定义：处于高能级 E_2 的电子在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来感应光子作用下，向低能级 E_1 跃迁并辐射出一个与感应光子的状态完全相同的光子的过程

② 特点：

- 感应光子的能量等于两个跃迁能级之差
- 受激辐射产生的光子与感应光子是全同光子，是相干光(激光)

③ 过程实质：对外来入射光的放大过程

④ 应用：半导体激光器(LD)



$h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ ，是普朗克常数

受激辐射原理示意图

4.3.1 光与物质的相互作用



(4) 受激吸收

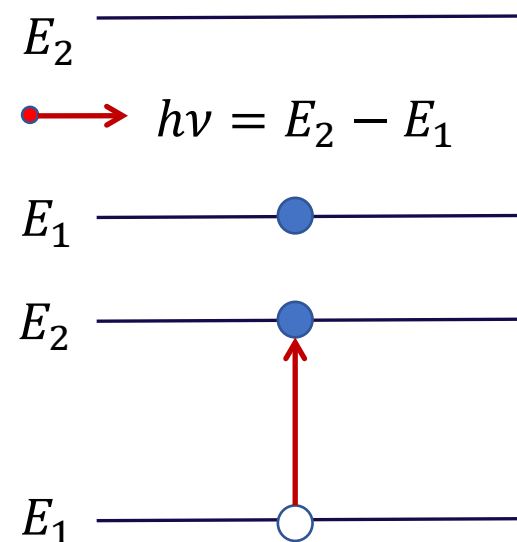
① 定义：处在低能级 E_1 上的电子在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来感应光子的作用下，吸收一个光子后并向高能级 E_2 跃迁的过程

② 特点：

- 需要消耗外来光能
- 外来光子能量等于电子跃迁的能级之差

③ 对光电器件而言，受激吸收过程是一种外来入射光子被吸收，并生成电子-空穴对的光电转换过程

④ 应用：光电二极管 (PD)



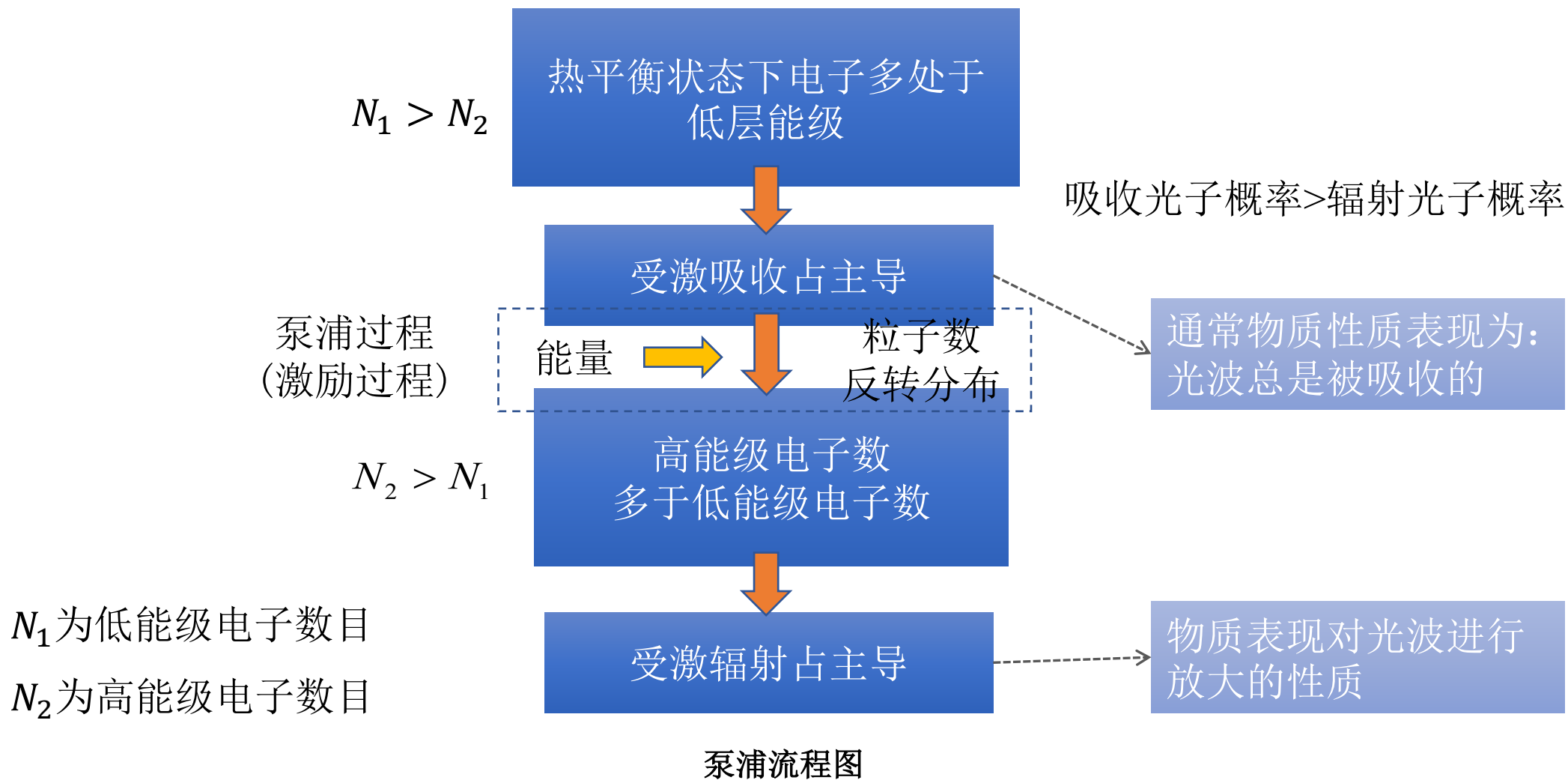
$h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ ，是普朗克常数

受激吸收原理示意图

4.3.1 光与物质的相互作用



(5) 泵浦过程

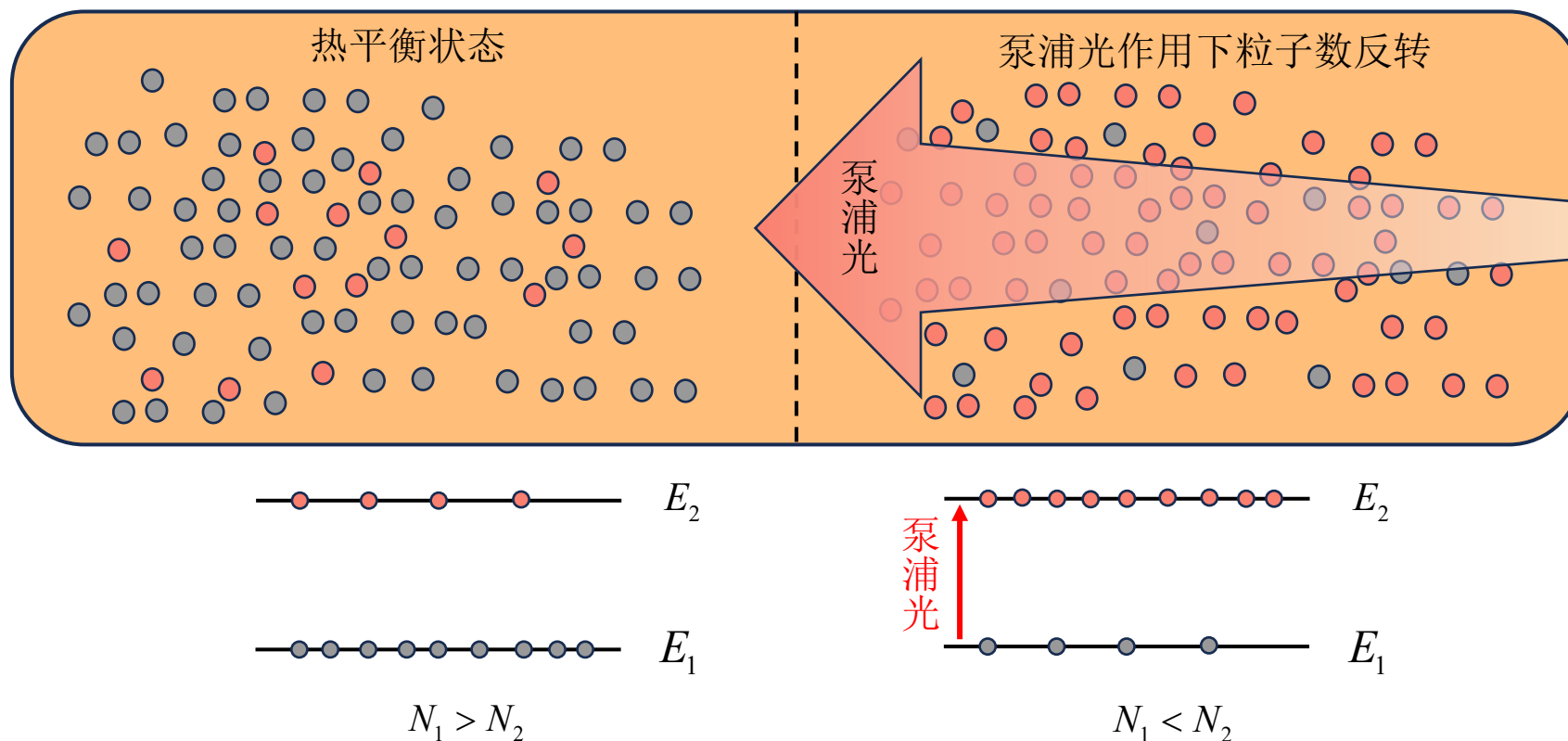


4.3.1 光与物质的相互作用



(6) 粒子数反转分布

为获得原子受激辐射所需的光学增益，应满足粒子数反转(Population inversion)条件



N_1 为低能级电子数， N_2 为高能级粒子数

粒子数反转分布原理示意图

4.3.2 光源



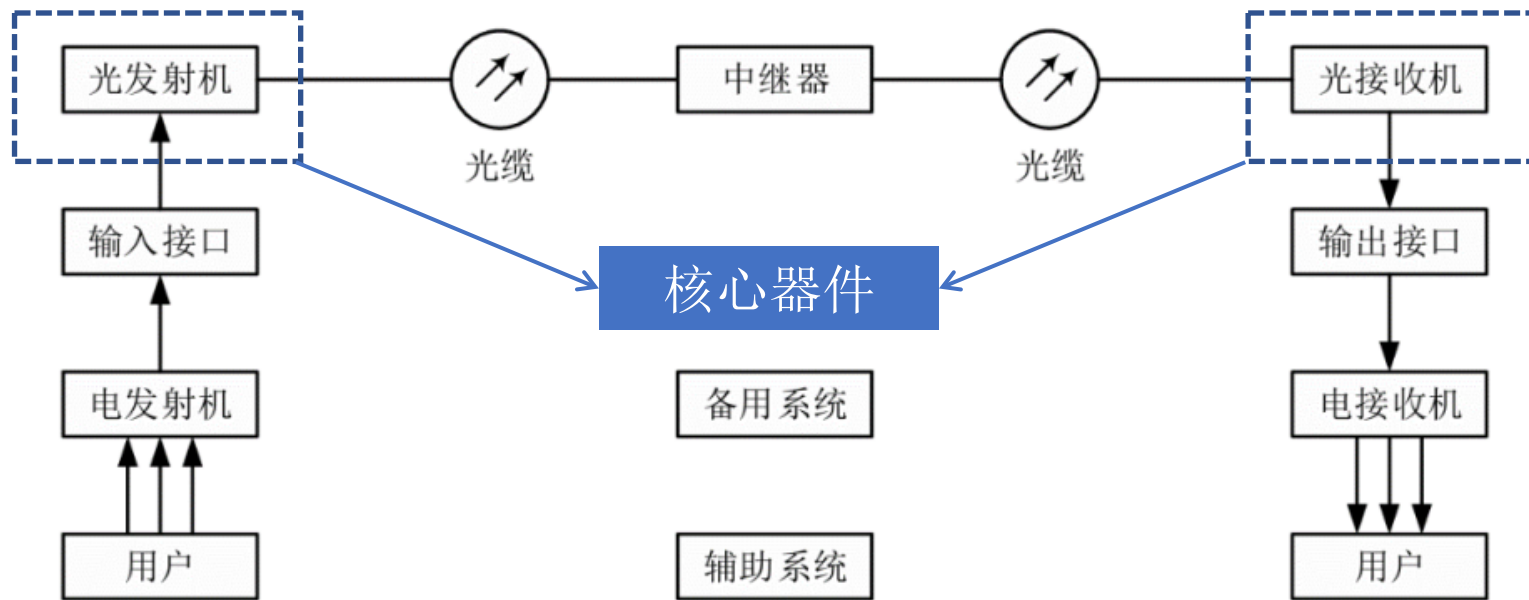
(1) 光纤通信系统

① 光源

- 用在光发射机
- 主要功能：产生光载波并完成信号的电光转换 (E/O)

② 光检测器

- 用在光接收机
- 主要功能：完成接收信号的光电转换 (O/E)



IM/DD 光纤通信系统的基本结构

4.3.2 光源

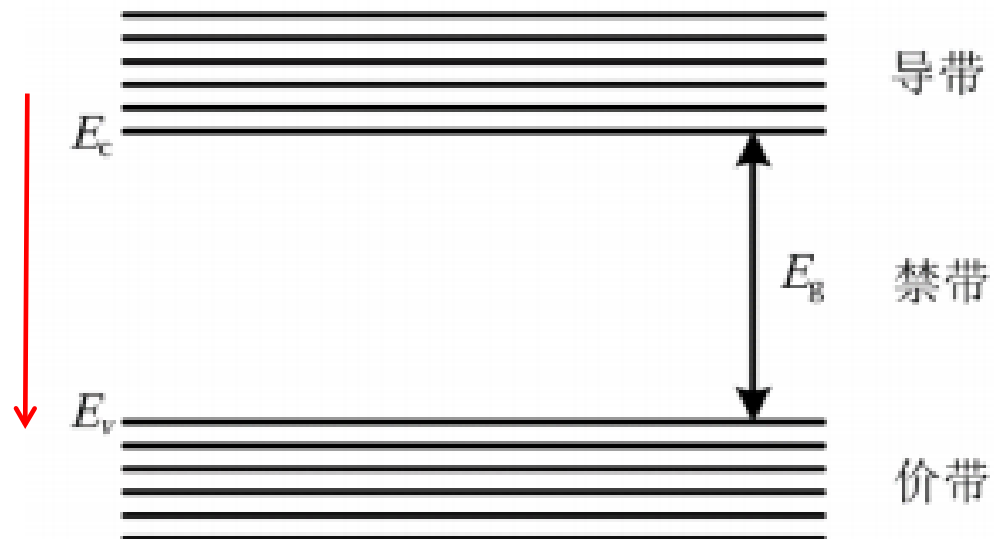


(2) 光载波的产生

① 能带

- 满带：电子填满(能量最低)
- 导带：自由电子占据
- 禁带：无电子
- 价带：价电子占据
- 空带：无电子(未激发状态)

产生光载波



半导体能带示意图

② 光源核心：加正向电压的半导体PN结

③ 发光原理：导带中电子跃迁到价带辐射出光子

- 自发辐射——产生荧光
- 受激辐射——产生激光

$$\text{禁带宽度 } E_g = E_c - E_v$$

$$\text{辐射光子能量 } h\nu \geq E_g$$

4.3.2 光源



(3) 半导体激光器(LD)

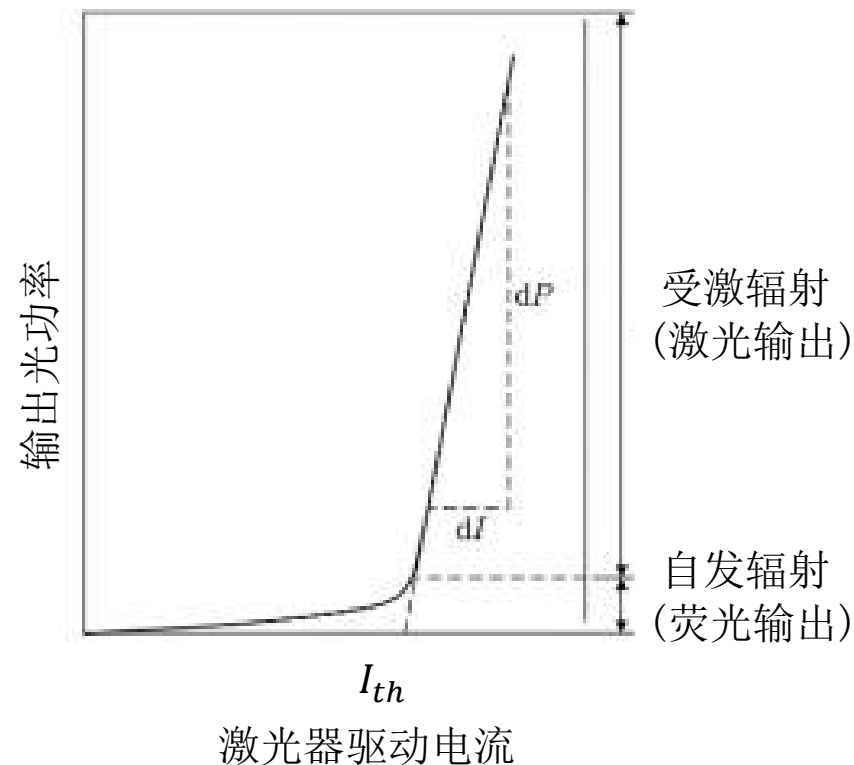
① 原理：受激辐射

② 产生激光的条件：

- 合适的增益物质——符合所需波长要求的半导体PN结
- 实现粒子数反转分布的泵浦源——电流源
- 进行方向和频率选择的光学谐振腔——F-P腔、分布反馈/分布布拉格反射谐振腔等

③ 优点：

- 输出功率大
- 光谱线宽窄
- 调制速率高



LD的输出功率与注入电流之间的关系

阈值器件—— $I \geq I_{th}$ 时发出稳定激光

4.3.2 光源



(4) 发光二极管(LED)

① 原理：自发辐射

② 非阈值：

自发辐射光谱很宽，故LED不是阈值器件，输出功率与注入电流成正比

③ 优点：

- 原理简单：不一定需要粒子数反转
- 结构简单：不存在谐振腔
- 温度稳定性好
- 成本低

④ 应用：局域网



发光二极管

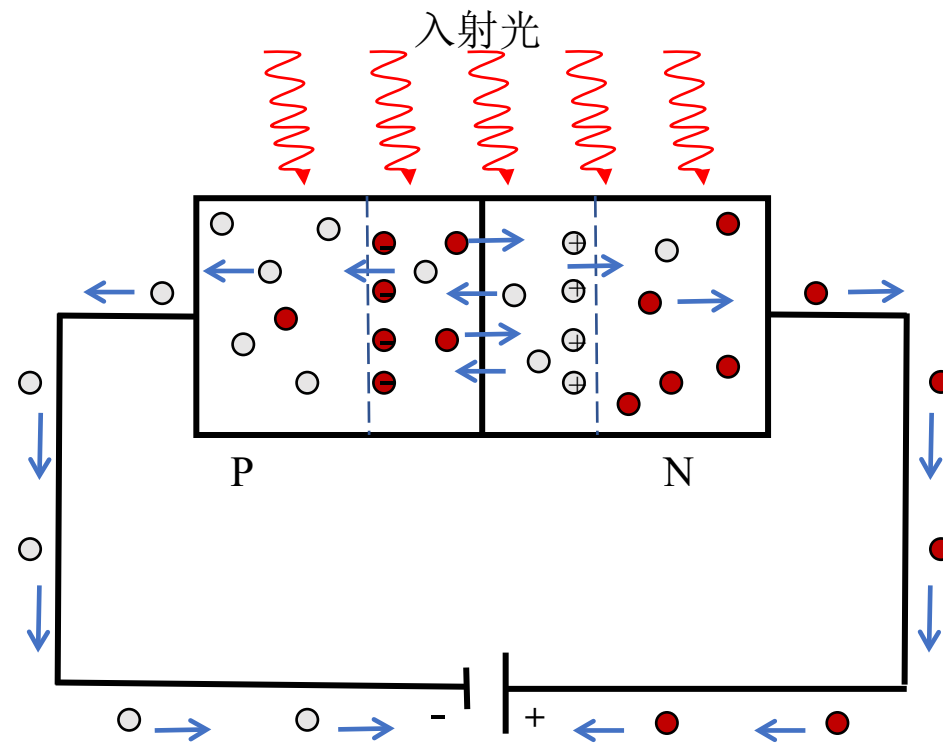
4.3.3 光检测器



(1) 光电二极管

光电二极管：光纤通信中通常采用加反向偏压的半导体PN结制成的光检测器(PD)

- ① 作用：完成信号光电转换(O/E)
- ② 本质：基于光电效应的光电转换器件
- ③ 原理：受激吸收
- ④ 条件：入射光子能量 $h\nu \geq$ 禁带宽度 E_g
- ⑤ 常用两类：
 - PIN光电二极管
 - APD光电二极管



光电二极管工作原理图

4.3.3 光检测器



(2) PIN光电二极管(PIN Photo Detector, PIN PD)

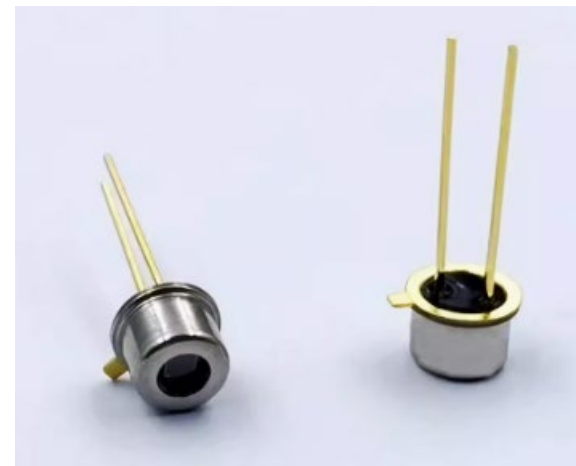
PIN光电二极管：在P型半导体和N型号半导体之间加入一种轻微掺杂的本征半导体

① 特点：

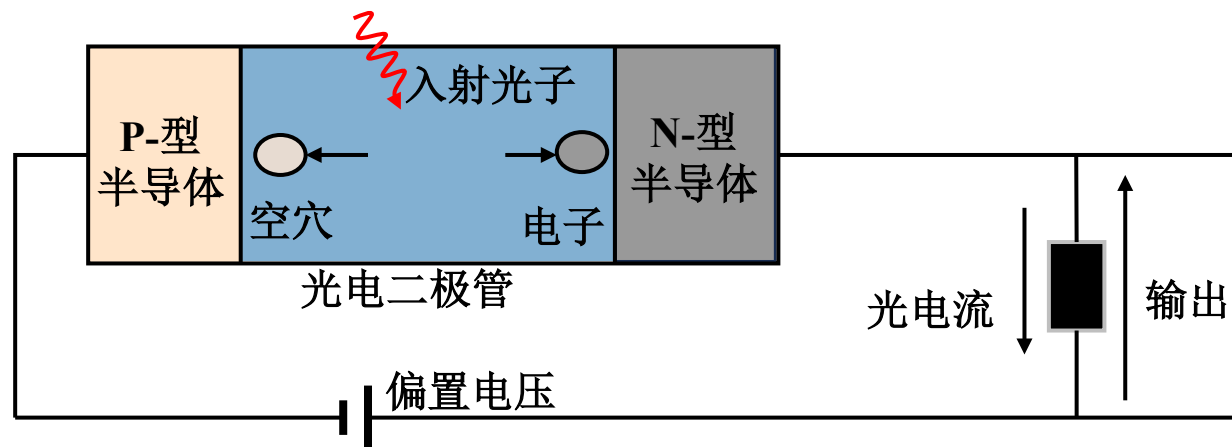
- 响应度R通常小于1
- 极高比特率工作(超过100Gbps)
- 高响应速度(较宽本征层)

② 应用：

- 高速光通信
- 中短距离光通信



1.3mm 紫外Si PIN PD 实物图



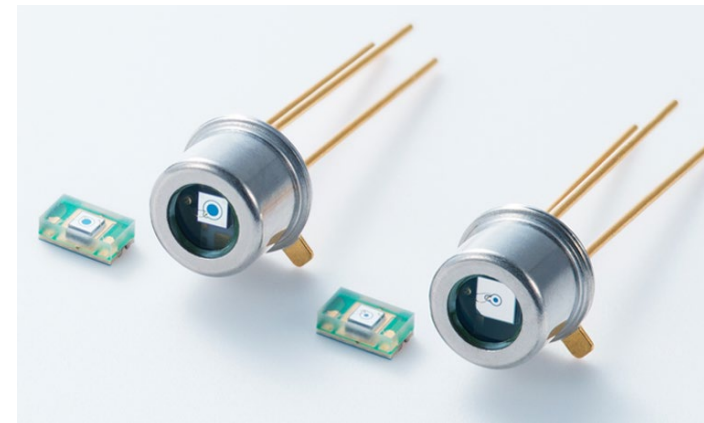
PIN结构原理图

4.3.3 光检测器



(3) 雪崩光电二极管(Avalanche Photo Detector, APD)

雪崩放大：高电场区内多次碰撞使电子-空穴对迅速增加，反向电流迅速加大，形成雪崩增益效应，从而使光电流获得倍增



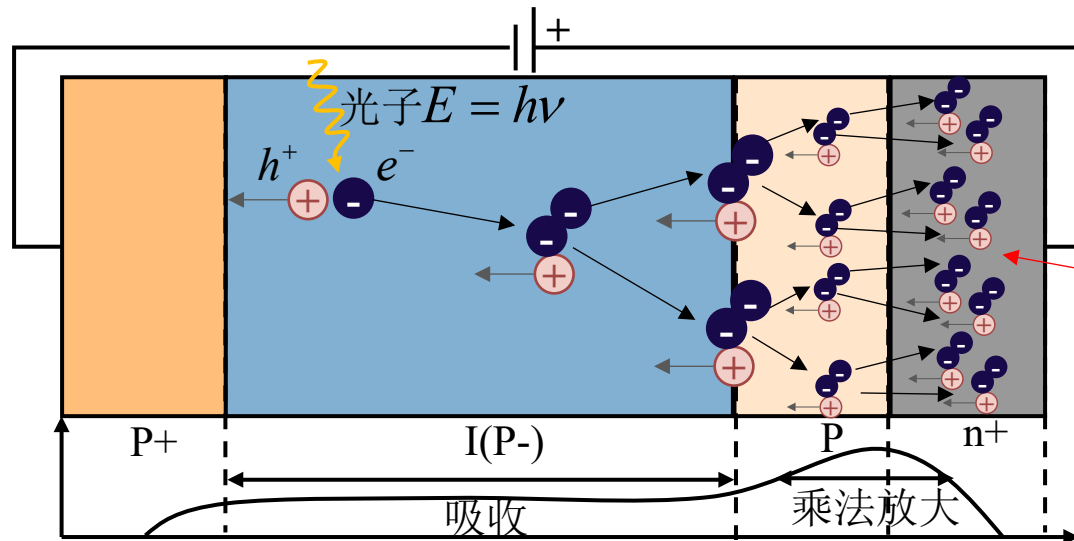
Si雪崩二极管实物图

① 特点：

- 高内部增益
- 高检测灵敏度
- 噪声过剩

② 应用：

- 长距离光通信
- 量子通信系统的单光子检测



载流子速度增加和原子发生冲突形成新电子空穴对

雪崩二极管原理图

北京邮电大学

谢谢观看

4.1 光纤通信的起源和发展

4.2 光纤的基本理论

4.3 光源和光检测器

4.4 光纤通信系统

4.5 光纤通信新技术



4.4 光纤通信系统



4.4.1 IM/DD光纤通信系统

4.4.2 波分复用光纤通信系统

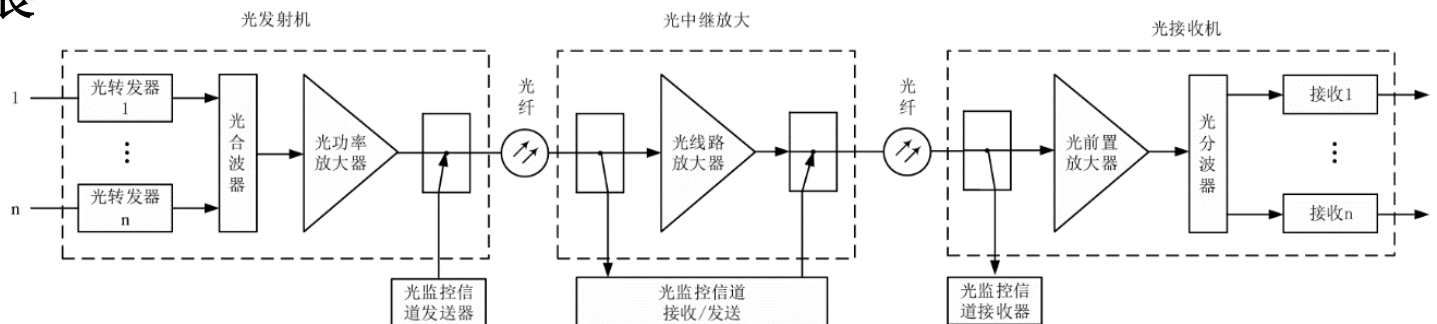
4.4.3 相干光通信系统



4.4 光纤通信系统



光纤通信系统的发展

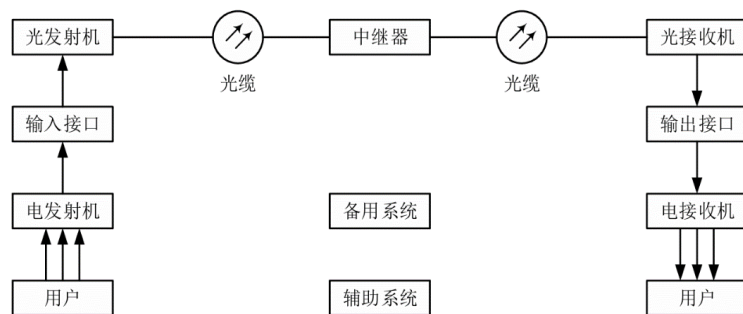


• 20世纪70年代，
光纤通信系统进入实用化

DWDM系统

多路波长复用光纤通信系统迅速成为
长距离大容量通信的主导技术

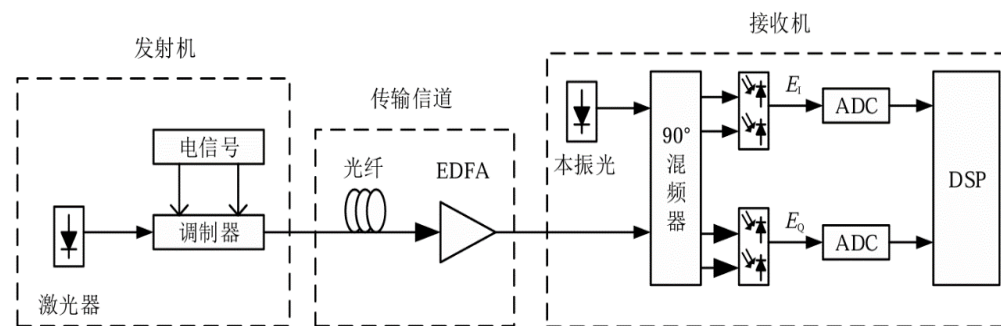
• 21世纪以后，
网络流量迅猛增大



IM/DD光纤通信系统

最早应用、也是最基本的方式
结构简单、性能可靠

• 20世纪90年代，掺铒光纤
放大器（EDFA）和密集波分
复用（DWDM）的应用极大地
提升了传输距离和容量



相干光通信系统

高速率和高频谱效率的相干光通
信获得了越来越多的关注和发展

4.4.1 IM/DD光纤通信系统



(1) IM/DD光纤通信系统

系统组成结构:

① 电发射机

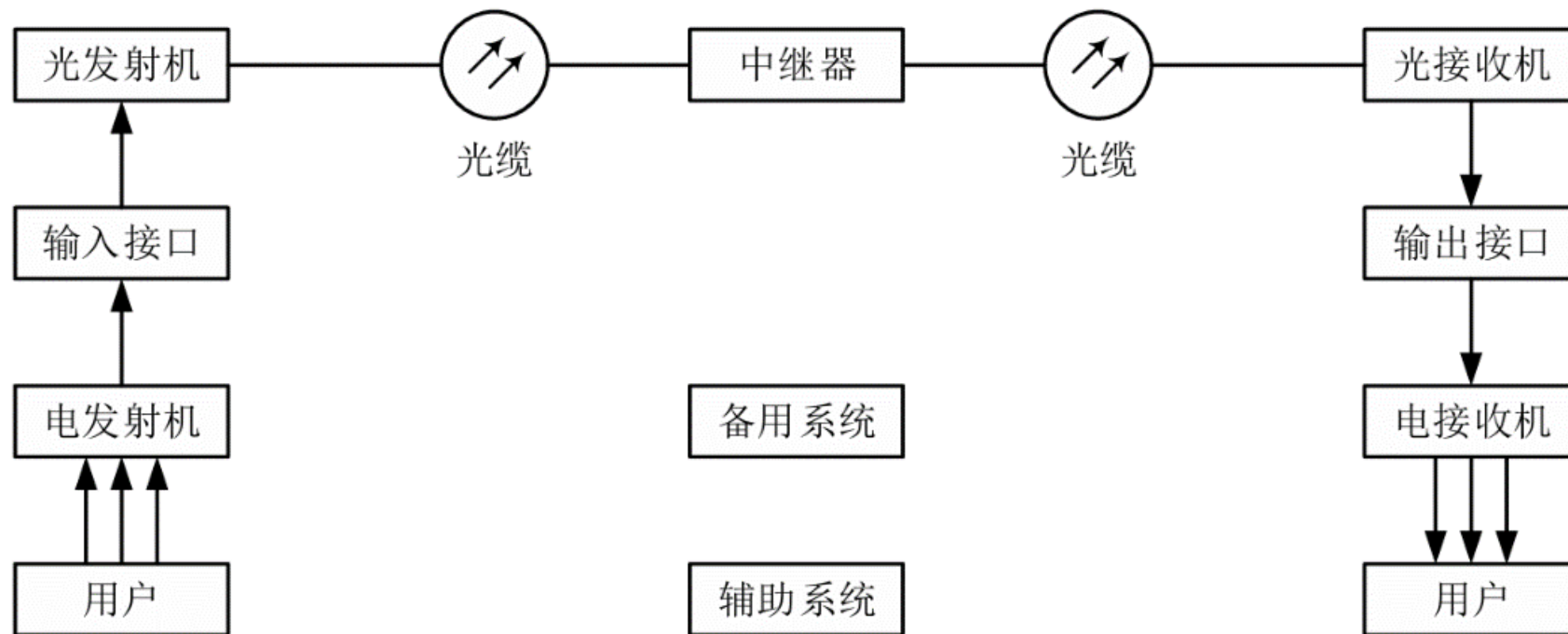
② 光发射机

③ 光纤光缆电路

④ 中继器

⑤ 光接收机

⑥ 电接收机



IM/DD光纤通信系统

4.4.1 IM/DD光纤通信系统

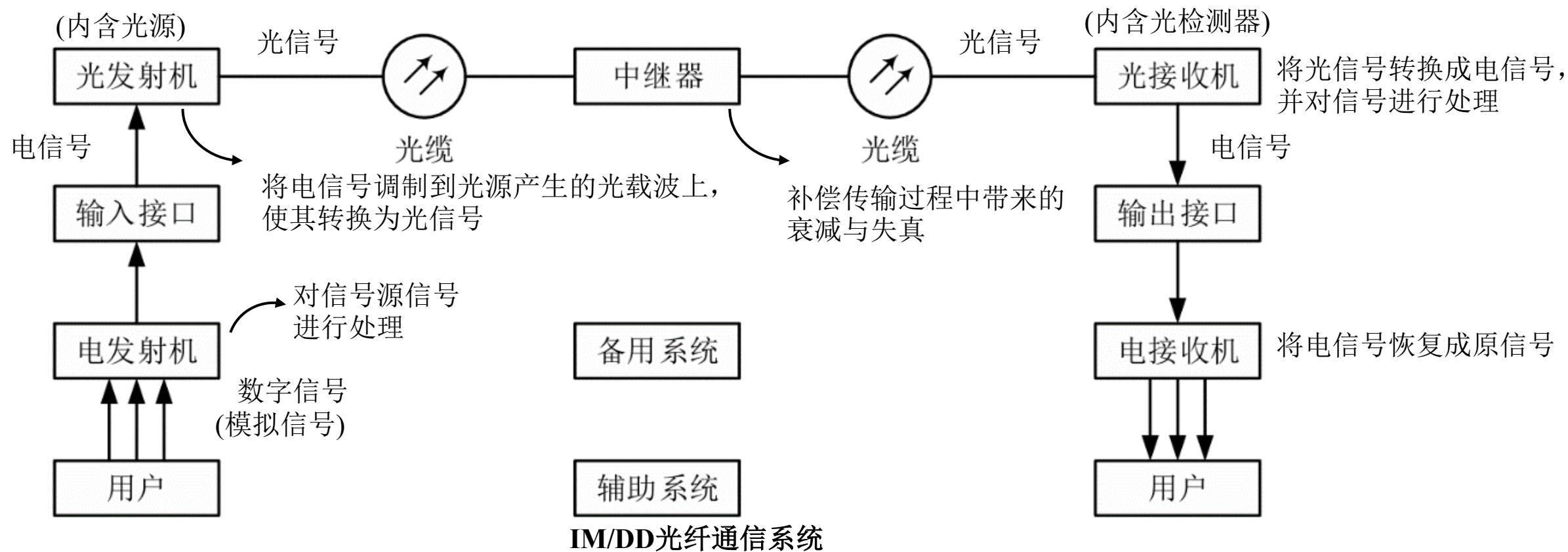


(1) IM/DD光纤通信系统

工作原理：

① 发送端用信号调制光载波的强度

② 接收端用光检测器直接检测光信号



4.4.1 IM/DD光纤通信系统



(2) 光发射机的核心功能

光载波的产生和电信号的调制

① 光载波的产生

常用的载波产生光源：

- 半导体激光器(LD) (一般用于局域网)

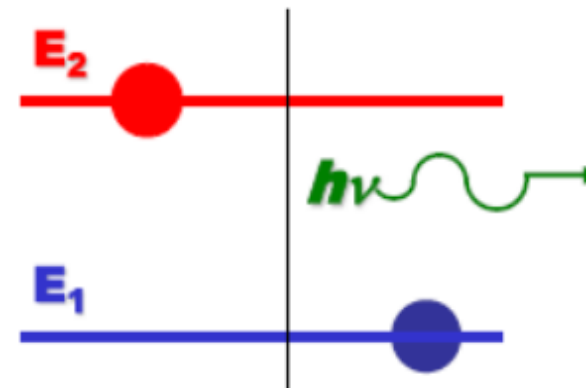
特点：

谱线宽
功率小
成本低

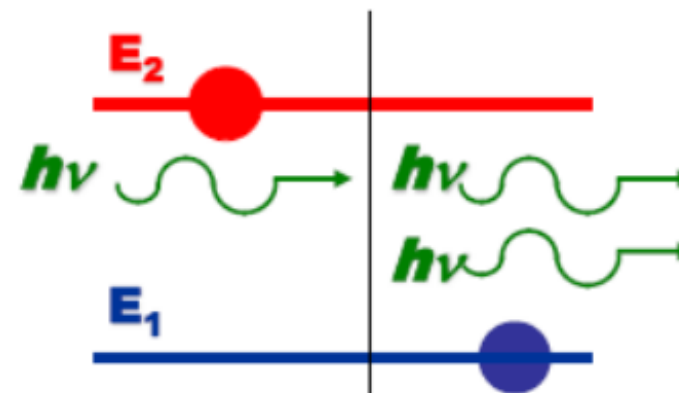
- 光电二极管(LED) (广泛使用)

特点：

谱线窄
功率大
可调制速率高

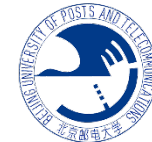


LED工作原理
自发辐射



LD工作原理
受激辐射

4.4.1 IM/DD光纤通信系统



(2) 光发射机的核心功能

光载波的产生和电信号的调制

② 电信号的调制

IM/DD系统采用：**强度调制**

按调制器和激光器的关系分类：

➤ 直接调制

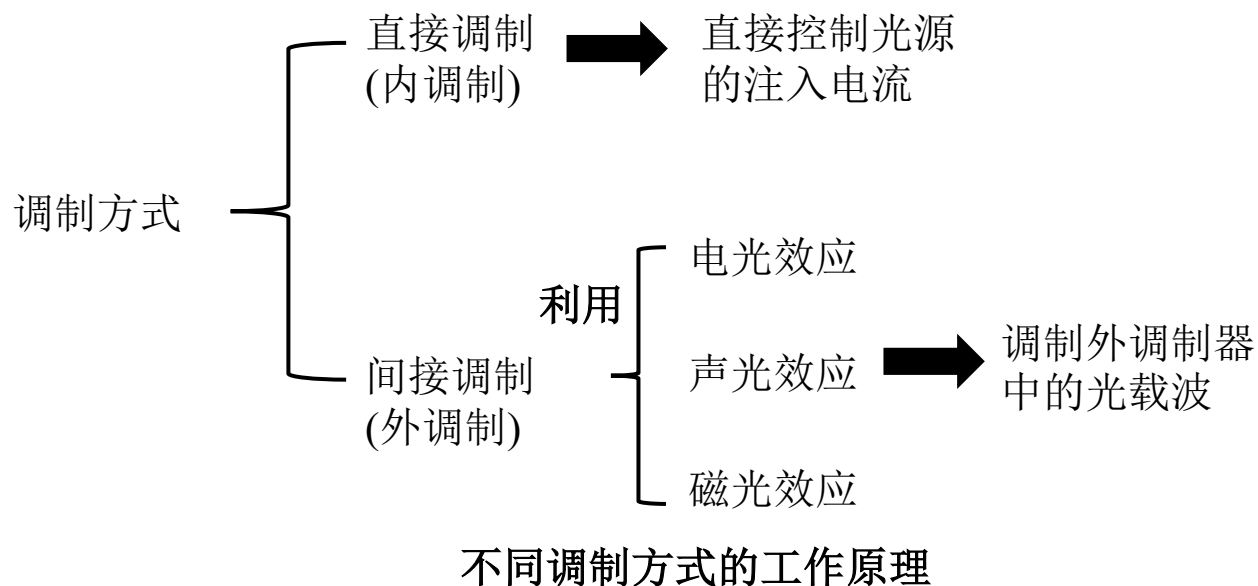
特点：

简单
易于实现
难以高速调制

➤ 间接调制

特点：

调制速率高
插入损耗较大



4.4.1 IM/DD光纤通信系统

(3) 光接收机的核心功能

光信号还原为电信号

① 直接检测

不经过任何变换，由光检测器直接检测光信号

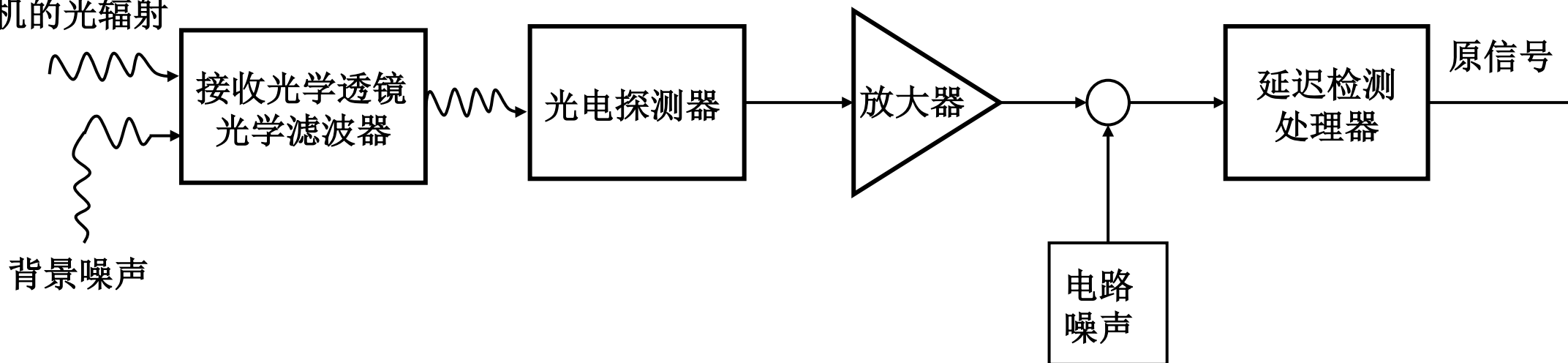
特点：

- 使用光强传递信息
- 无需本振激光即可解调



使用直接探测的OPALS系统上行接收机(NASA)

发射机的光辐射



直接检测技术接收系统

4.4.1 IM/DD 光纤通信系统



(3) 光接收机的核心功能
光信号还原为电信号

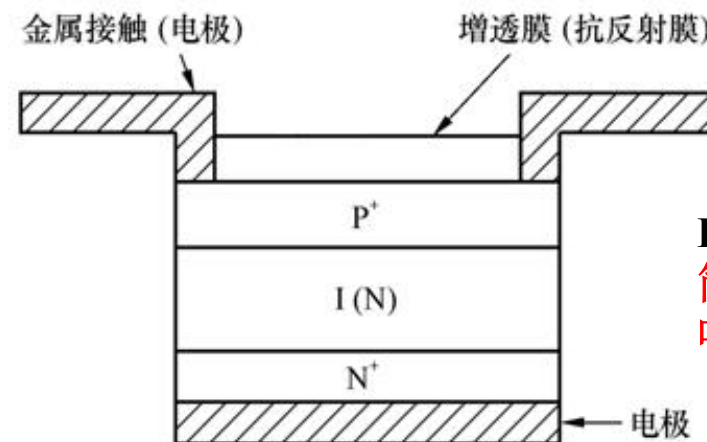
① 直接检测

常用的光检测器：

- PIN型光电二极管
- 雪崩光电二极管(APD)

② 放大、整形

③ 判决再生



PIN 型光电二极管
简单实用
响应速度快



雪崩二极管(APD)
高内部增益
高灵敏度
噪声较大

4.4.1 IM/DD光纤通信系统



(4) 中继器的核心功能

补偿传输损耗和色散失真

① 光-电-光形式的中继器

特点:

- 结构复杂
- 成本高
- 速率受“电子瓶颈”制约

重定时
重整形
重放大

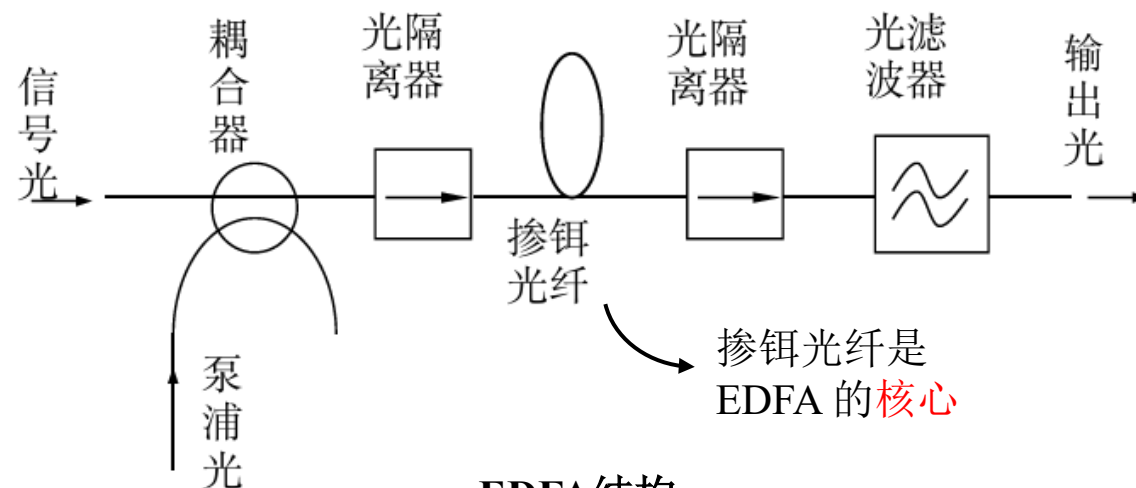
② 全光中继器

使用最广泛的光放大器:

掺铒光纤放大器(EDFA)

特点:

- 直接在光域上实现放大
- 工作波段与光纤低损耗窗口一致
- 同时放大增益范围内的所有波长信号



EDFA结构

最具吸引力
最成熟
应用最广

4.4.1 IM/DD光纤通信系统



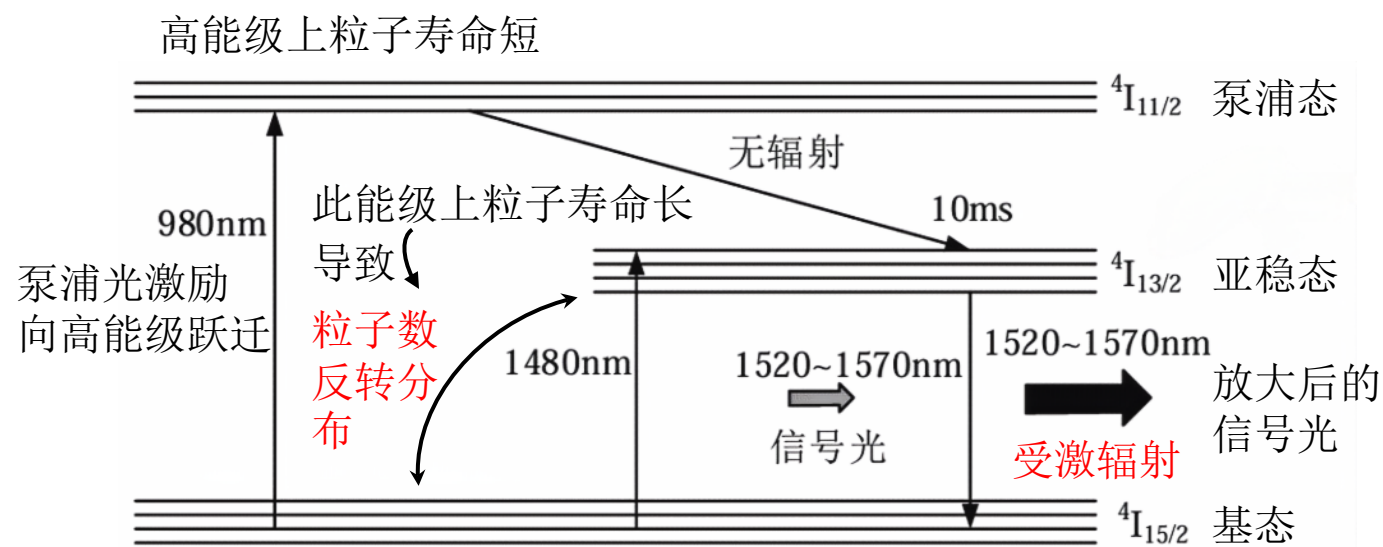
(4) 中继器的核心功能

补偿传输损耗和色散失真

② 全光中继器

EDFA工作原理:

- 低能级的铒离子在泵浦光激励下向高能级跃迁
- 高能级上寿命较短的粒子以无辐射的形式跃迁到亚稳态
- 铒离子在亚稳态上寿命较长，从而形成**粒子数反转分布**
- 亚稳态的铒离子在信号光通过时以**受激辐射**的形式跃迁到基态
- 跃迁的同时辐射出强度放大后的信号光



EDFA工作原理图

4.4.2 波分复用光纤通信系统



(1) 粗波分复用(CWDM)和密集波分复用(DWDM)

波分复用(WDM)

起源:

由华人科学家厉鼎毅提出并大力倡导

价值:

以较低的成本、较简单的结构形式成几倍、数十倍、成百倍地扩大了单根光纤的容量

大容量光纤通信系统和网络中的主导技术

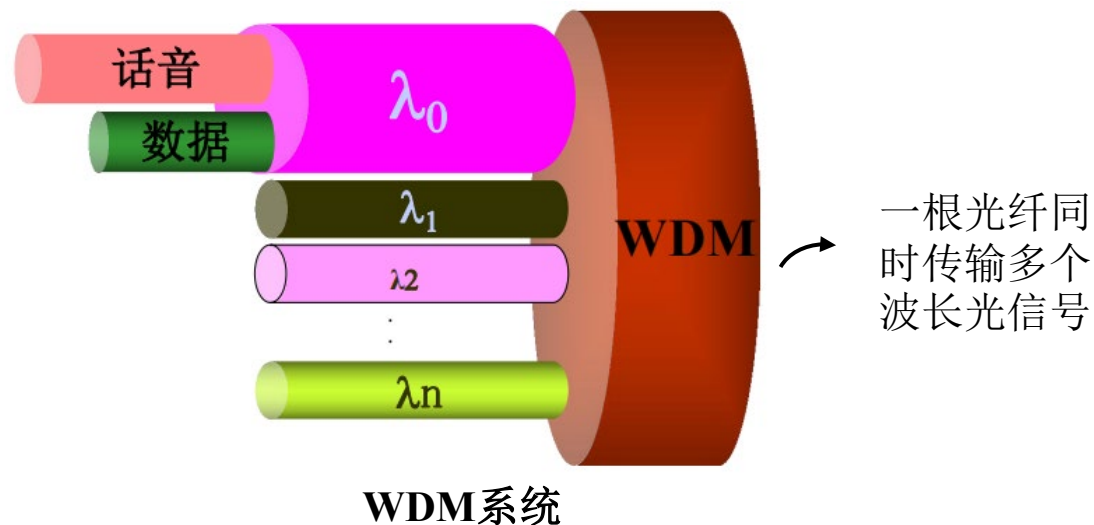
① 本质:

光波长分割复用(或光频率分割复用):

在一根光纤中同时传输多个波长光信号



厉鼎毅院士被称为
“波分复用之父”



4.4.2 波分复用光纤通信系统



(1) 粗波分复用(CWDM)和密集波分复用(DWDM)

波分复用(WDM)

② 按波长间隔的不同可分为:

➤ 粗波分复用(CWDM)

特点:

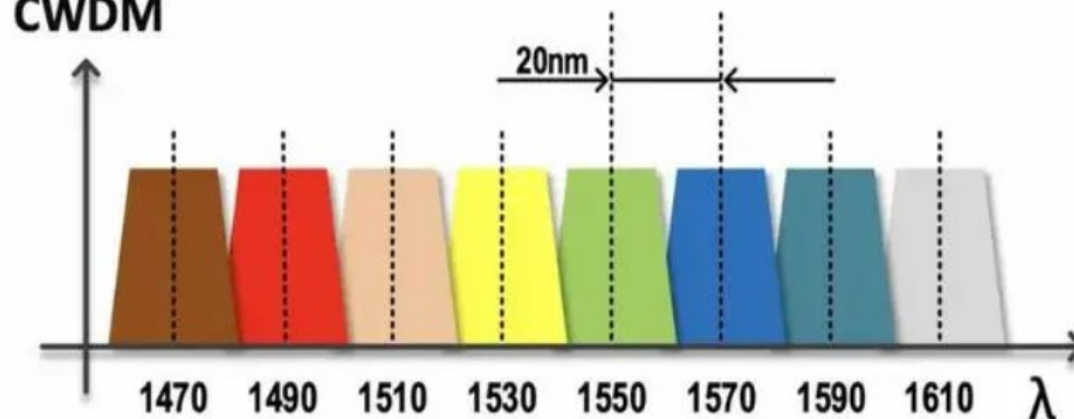
两种波段1310nm和 1550nm波长的
复用
波长间隔一般为 20nm

➤ 密集波分复用(DWDM)

特点:

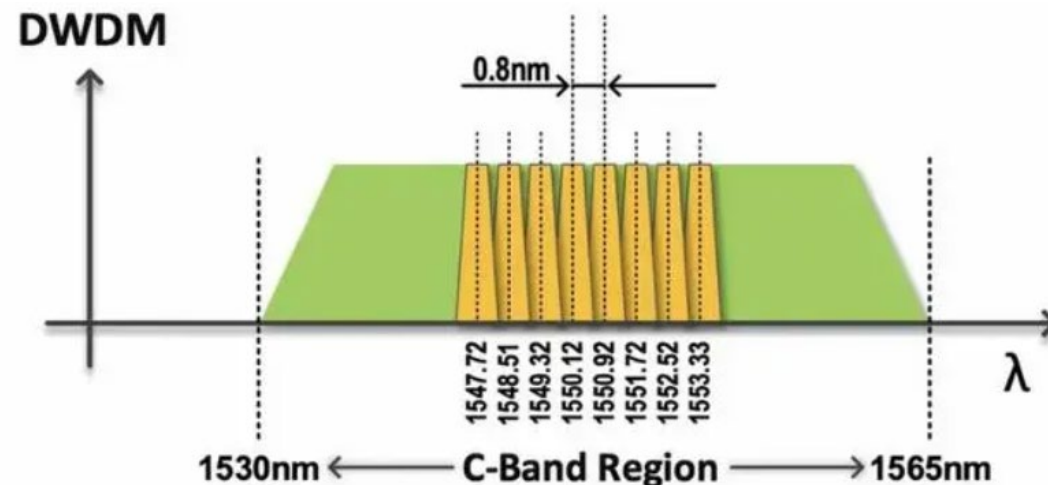
一般是在 1550nm波段的密集波分
复用
波长间隔为 1.6nm、0.8nm, 0.4nm
或更低

CWDM



CWDM

DWDM



DWDM

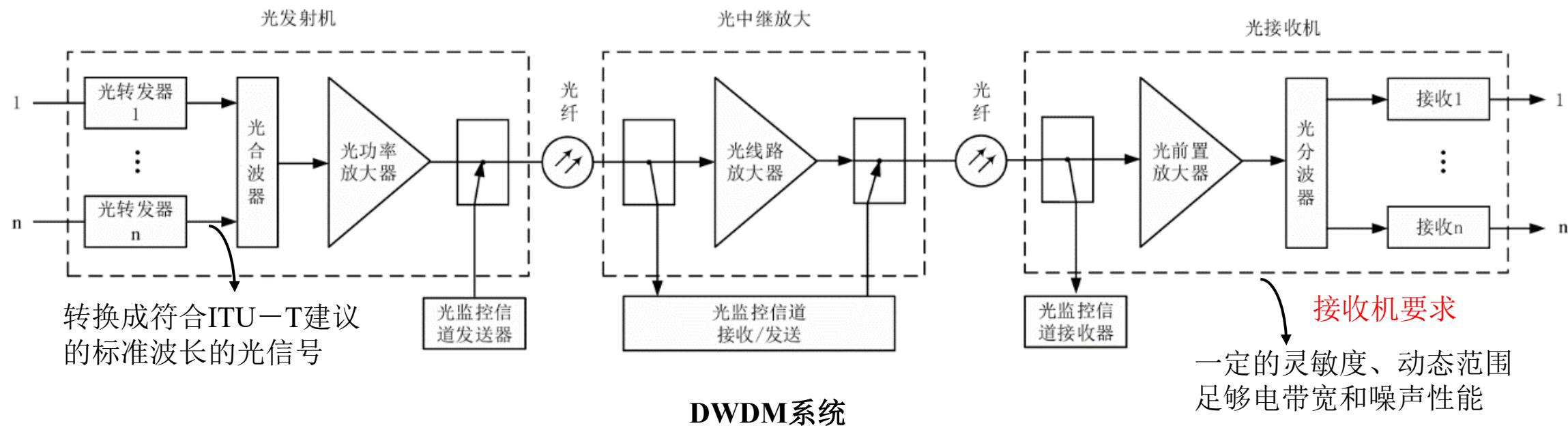
4.4.2 波分复用光纤通信系统



(2) DWDM光纤通信系统

① 组成结构

- 光发射机
- 光中继放大器
- 光接收机
- 光监控信道
- 网络管理系统



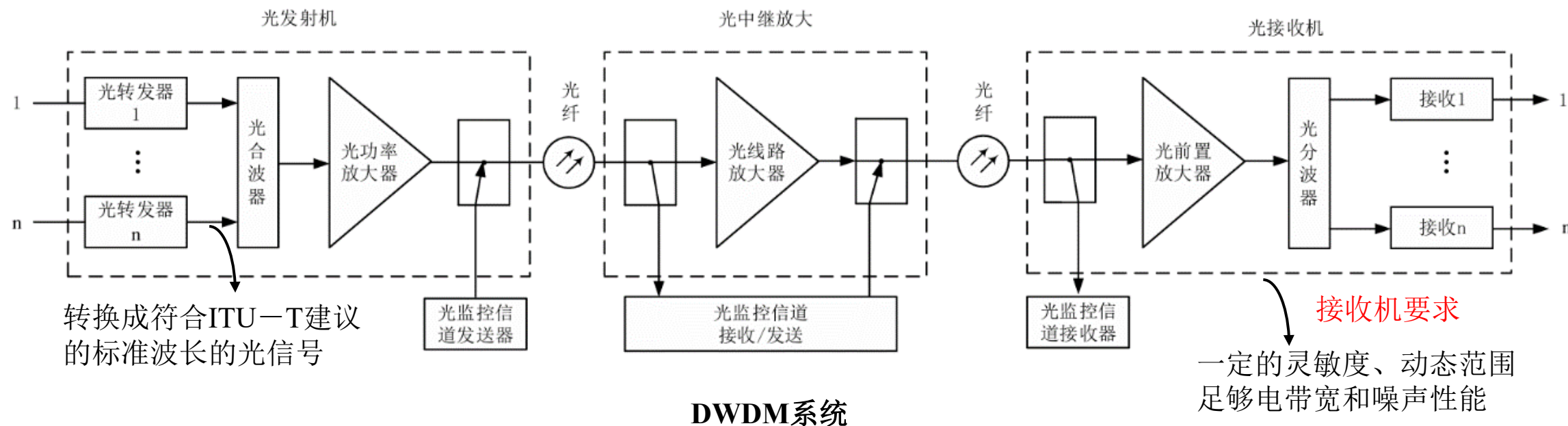
4.4.2 波分复用光纤通信系统



(2) DWDM光纤通信系统

② 基本原理

- 发送端复用不同波长的信号
- 送入同一根光纤中传输
- 接收端将多个波长的光信号解复用
- 光电变换后送入不同的终端



4.4.2 波分复用光纤通信系统



(3) DWDM光纤通信系统的核心器件

① 光源

作为光源的LD器件要求:

- 能够发射符合标准的波长
- 具有一定的光谱线宽

② 复用器与解复用器

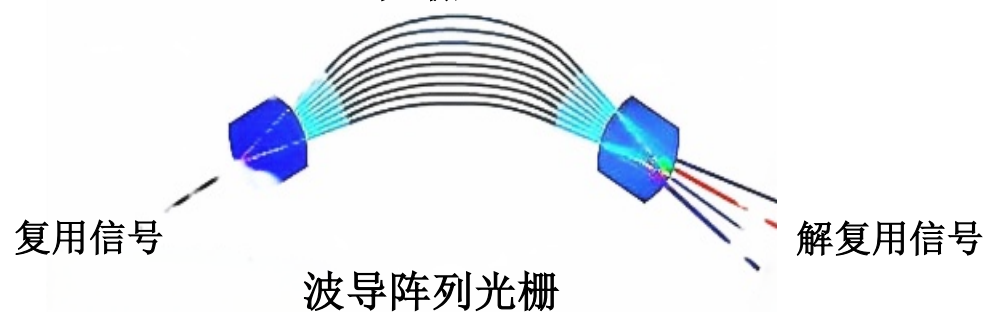
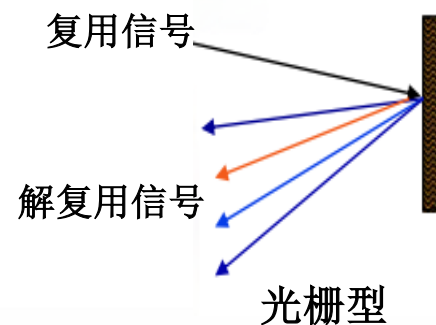
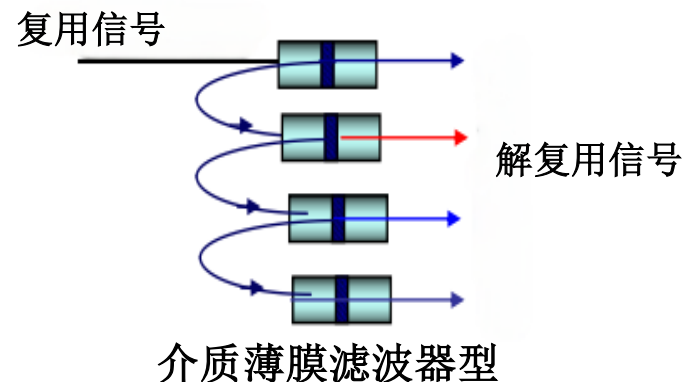
常用的种类:

- 介质薄膜滤波器型
- 光栅型
- 波导阵列光栅

③ 光放大器

依据位置与功能可分为:

- 光功率放大器
 - 光线路功率放大器
 - 光前置放大器
- } 一般采用EDFA



4.4.2 波分复用光纤通信系统



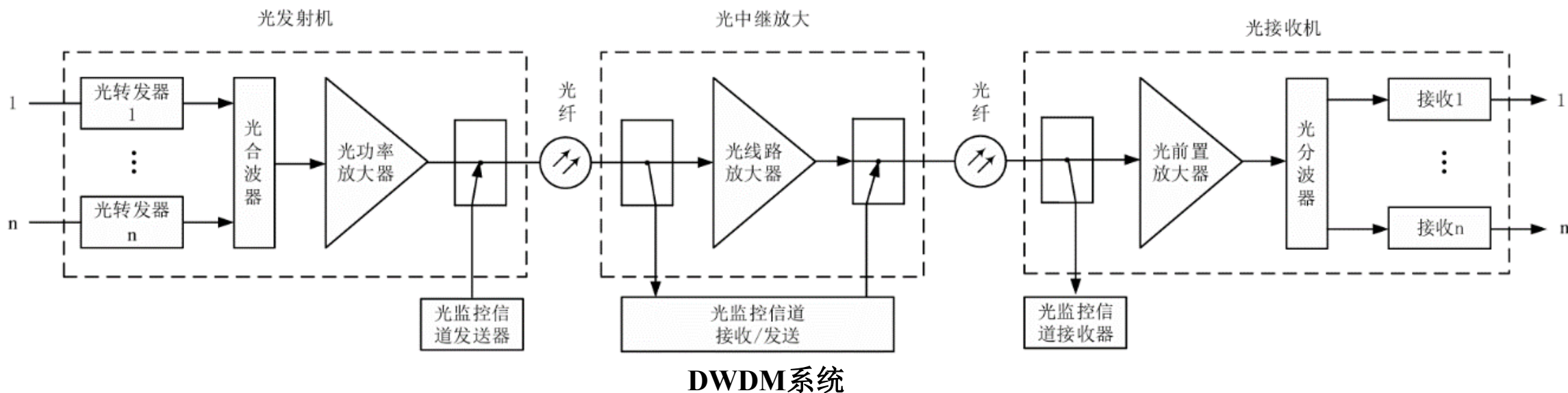
(4) DWDM光纤通信系统的优点

① 传输容量大

- 充分利用了光纤的巨大带宽资源 (特别是低损耗波段)

② 便于混合传输

- 各波长相互独立、彼此兼容
- 信号的速率、调制格式等透明



4.4.2 波分复用光纤通信系统



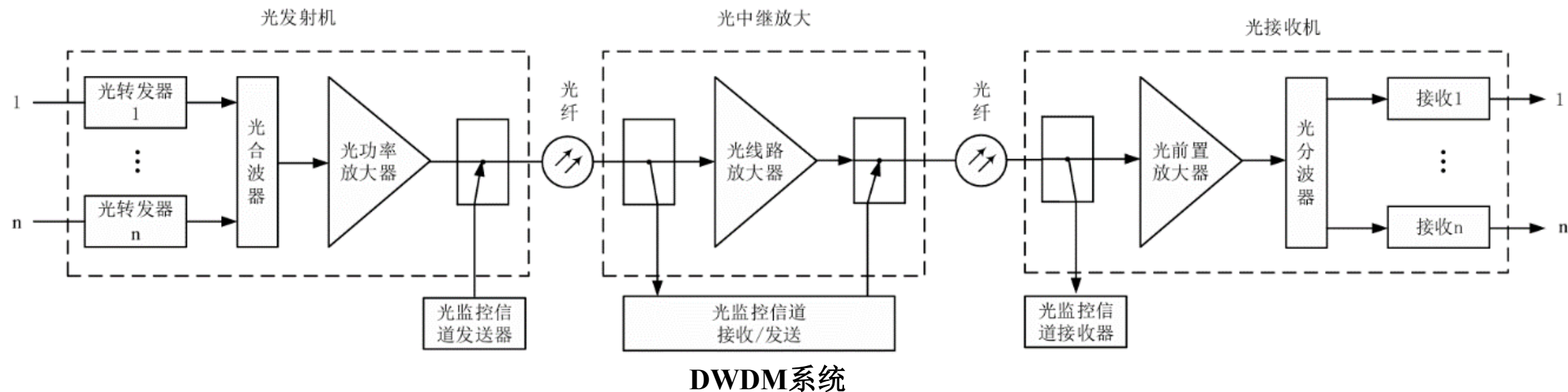
(4) DWDM光纤通信系统的优点

③ 成本低、易扩容

- 极大程度节省光纤和光中继器
- 通过增加波长信号来实现扩容

④ 提供波长选路技术

- 分配和调整波长保障组网灵活性
- 减少对额外光纤基础设施的需求保障经济性
- 故障时可通过快速路由保障可靠性



4.4.3 相干光通信系统



(1) 相干光通信系统

① 工作原理

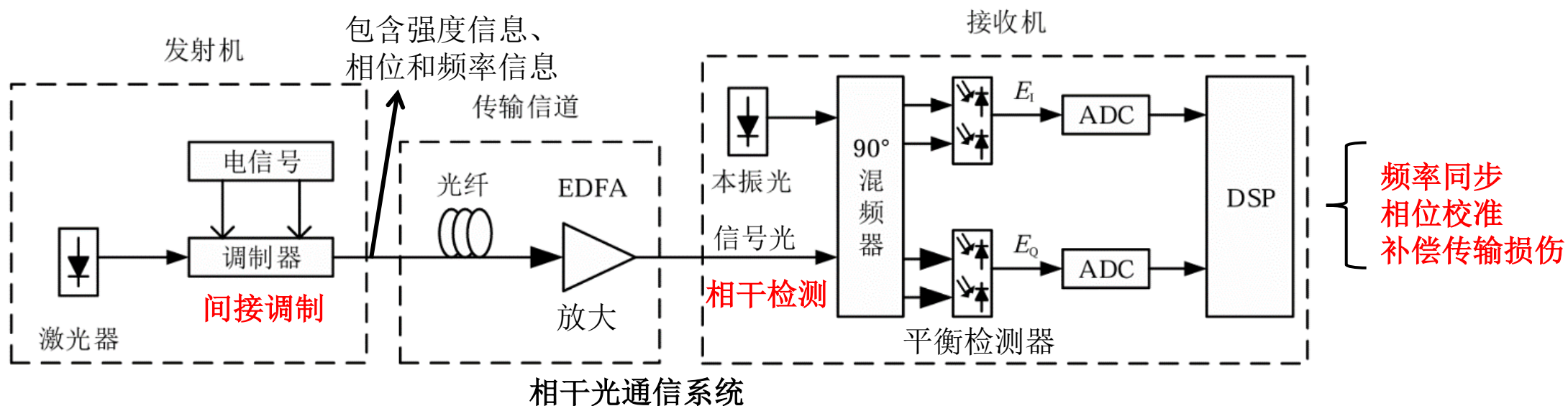
与IM/DD 光纤通信系统的主要差别:

- 发送端采用高阶矢量调制方式
- 接收端增加了本地光振荡器和混频器

② 数字信号处理(DSP)

功能:

- 降低对光源的谱线宽度和稳定性的要求
- 补偿光纤的各种传输损伤



4.4.3 相干光通信系统



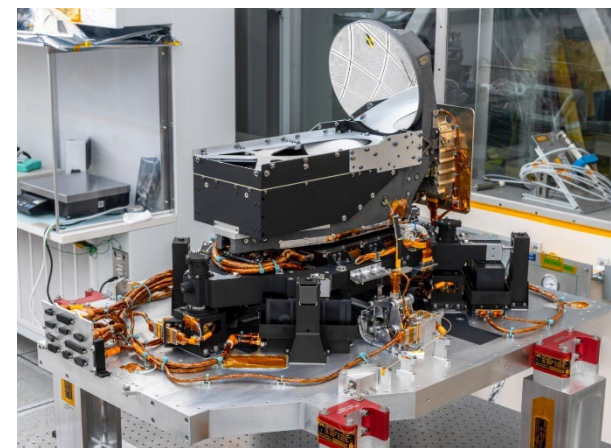
(1) 相干光通信系统

③ 相干检测

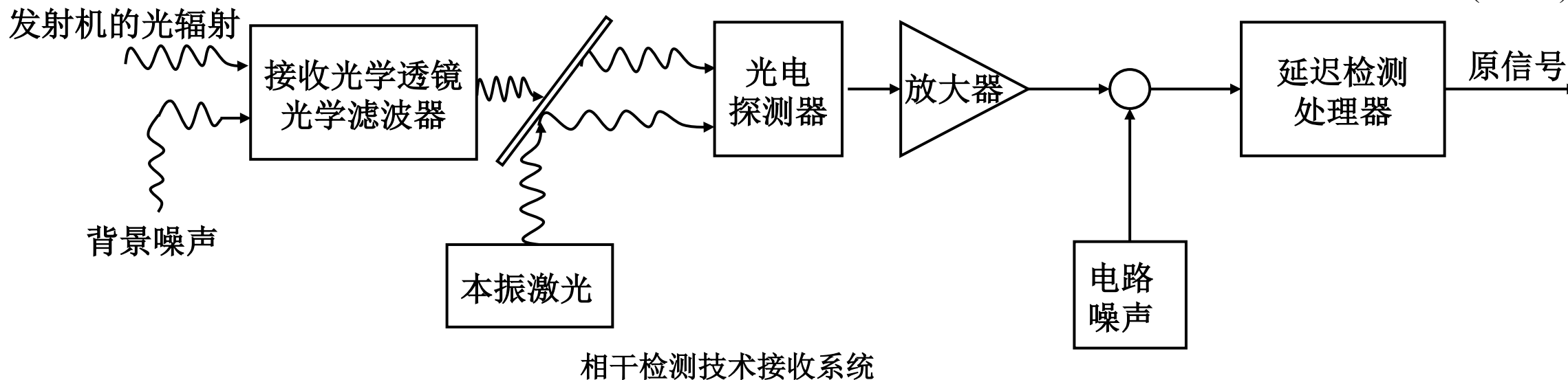
特点:

零差接收
外差接收

- 利用光载波的幅度、相位和频率进行调制
- 本振激光不需要和接收信号相位相同
- 抗干扰能力强



使用相干探测的DSOC系统上行接收机(NASA)



4.4.3 相干光通信系统



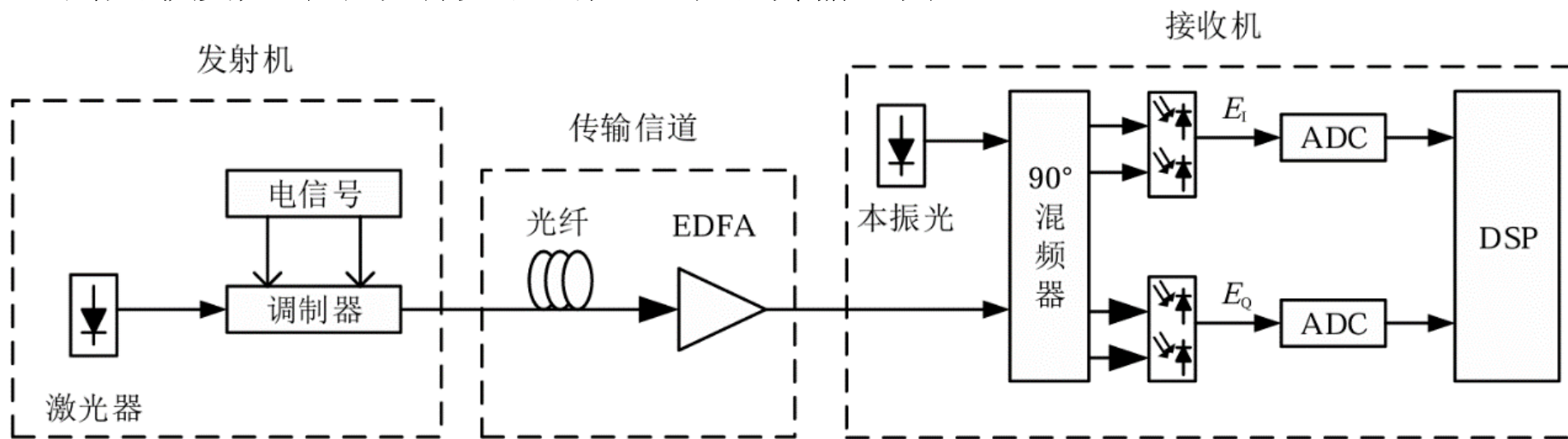
(2) 相干光通信系统的主要优点

① 单波速率提升，频谱效率高

- 高阶调制方式可有效提高单波长传输速率
- 传输速率的提高带来系统频谱效率的提升

② 灵敏度高，中继距离长

- 相干检测可大幅改善接收机的灵敏度
- 高灵敏度允许系统有更长的无电中继传输距离



相干光通信系统

4.4.3 相干光通信系统



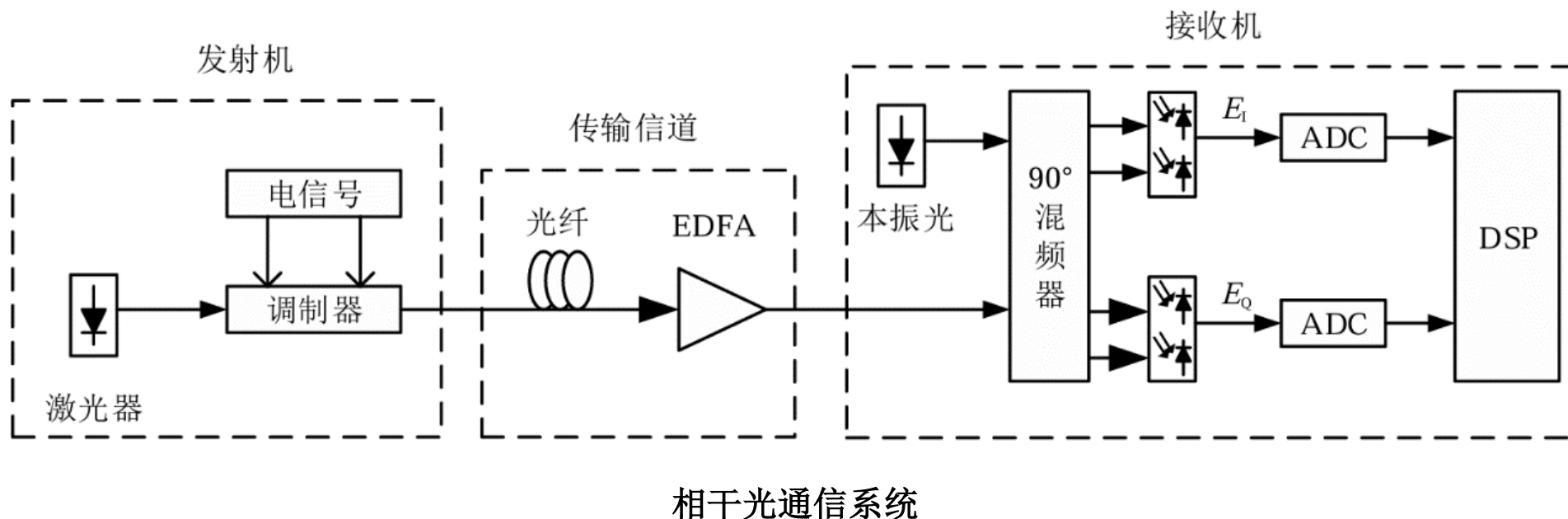
(2) 相干光通信系统的主要优点

③ 频率选择性好，潜在容量大

- 相干检测得到差频信号可有效滤除频带外的噪声
- 频率选择特性可使频分复用系统的频率间隔大大缩小，具有潜在的大容量优势

④ DSP技术有效补偿传输损伤

- 相干检测得出光信号信息可作为补偿的有效依据



北京邮电大学

谢谢观看

4.1 光纤通信的起源和发展

4.2 光纤的基本理论

4.3 光源和光检测器

4.4 光纤通信系统

4.5 光纤通信新技术



4.5 光纤通信新技术



4.5.1 光纤通信新技术

4.5.2 无线光通信基础



4.5.1 光纤通信新技术

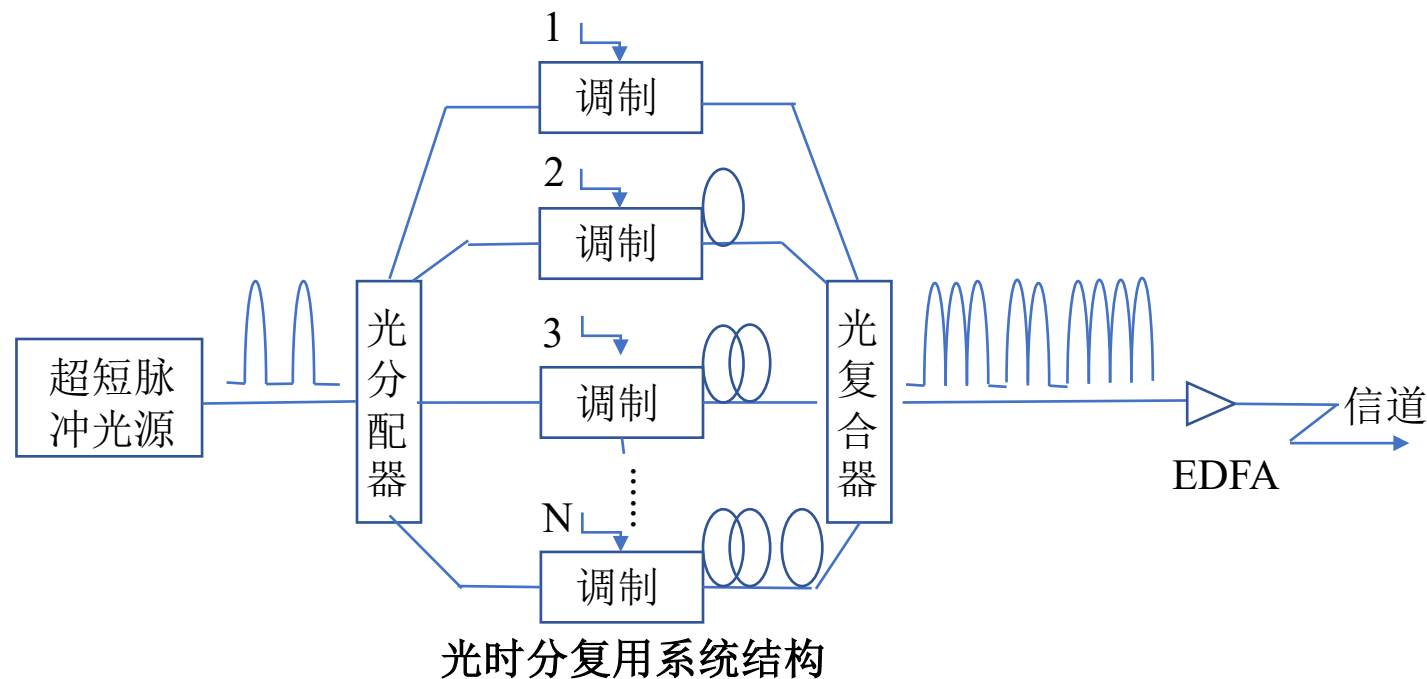


(1) 光时分复用技术(OTDM)

① 定义:

光时分复用技术是指在光域上进行时间分割复用，将速率低的光信号在时域上分割复用成高速光信号，其关键技术包括超短脉冲光源和超快时分解复用器件。

② 作用：提升单波长传输比特率



4.5.1 光纤通信新技术

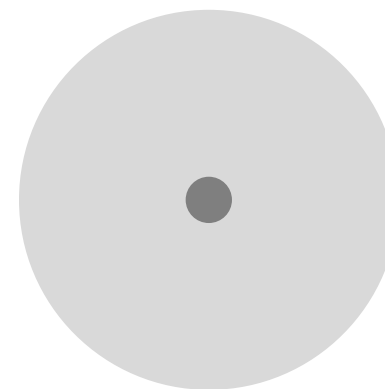


(2) 光模分复用技术(OMDM)

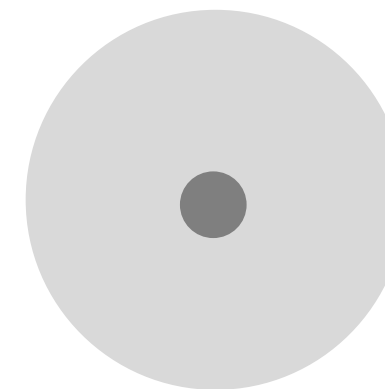
① 定义:

具有不同路径和模场分布、携带不同信息的多个正交模式，在同一多模光波导中共同传播的技术

② 作用: 提高了光纤的数据传输效率



单模光纤



少模光纤

多芯光纤和少模光纤的结合，如多芯少模光纤可以实现更多信道的复用

少模光纤可以实现模式分割复用

4.5.1 光纤通信新技术

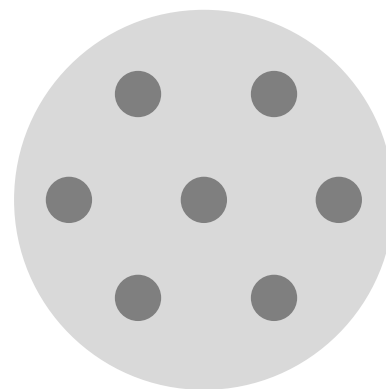
(3) 光空分复用技术(OSDM)

① 定义：不同空间位置传输不同信号的复用方式，对光纤芯线的复用。

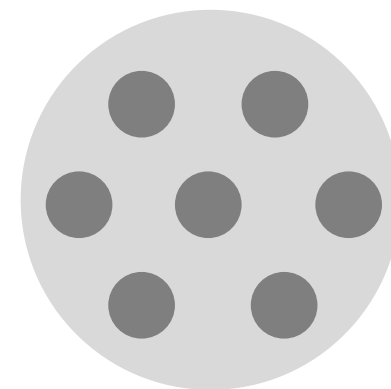
② 优点：

- 传输性能好
- 设计简单
- 引入多芯光纤提高性能
- 不够经济

③ 作用：通过增大复用信道数提高系统容量



多芯单模光纤



多芯少模光纤

多芯光纤可以实现空间分割复用

4.5.1 光纤通信新技术



(4) 拉曼光纤放大器FRA

① 特点:

- 密集波分复用 (DWDM) 通信系统的重要组成部分
- 工作频段灵活, 适合不同波段的光信号放大
- 非线性散射实现放大, 不需要能级间粒子数反转
- 噪声指数低
- 放大作用时间短, 可实现超短脉冲的放大

② 关键作用:

提升传输距离



OAM-DRA-C-X拉曼光纤放大器模块

4.5.1 光纤通信新技术



(5) 半导体光放大器SOA

① 原理:

与激光器类似——受激辐射

② 工作波段: 覆盖 1310nm 和 1550nm

③ 特点:

- 小体积高增益
- 微波调制响应速度快
- 温度稳定性好

④ 作用: 提升传输距离



半导体光放大器

*用于多芯光纤和少模光纤的光放大器也是颇受关注的一种新技术

4.5.1 光纤通信新技术



(6) 其他光纤通信新技术

① 光纤方面：

空芯光纤具有超低时延、超低非线性、超低损耗及更大带宽



空芯光纤

③ 光网络方面：

400G 全光省际骨干网
50G PON



400G省际网

② 光器件方面：

包括多波长可调谐激光器、铌酸锂高速光调制器、高速光开关等



可调谐激光器



铌酸锂高速光调制器

4.5.2 无线光通信基础



(1) 无线光通信

光通信领域主要可分为：

① 光纤通信技术

② 无线光通信技术

定义：

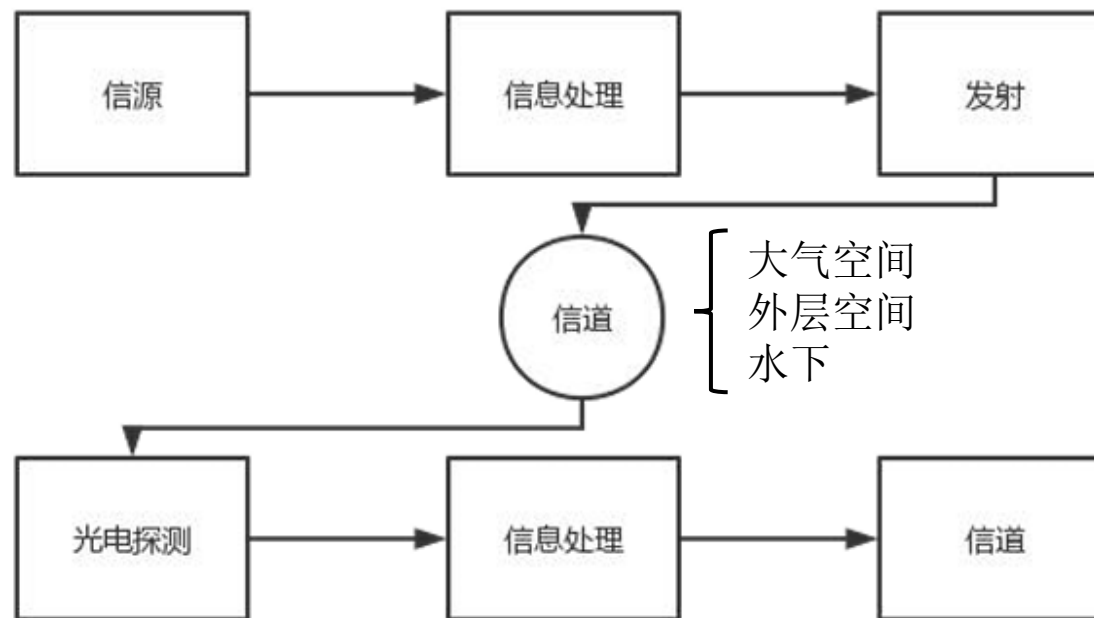
- 一种宽带无线接入技术
- 以光信号为载体通信
- 光通信技术和无线通信技术相结合

与光纤通信技术的主要差异：

- 两者传输信道的不同

无线光通信信道：

- 大气空间
- 外层空间
- 水下空间

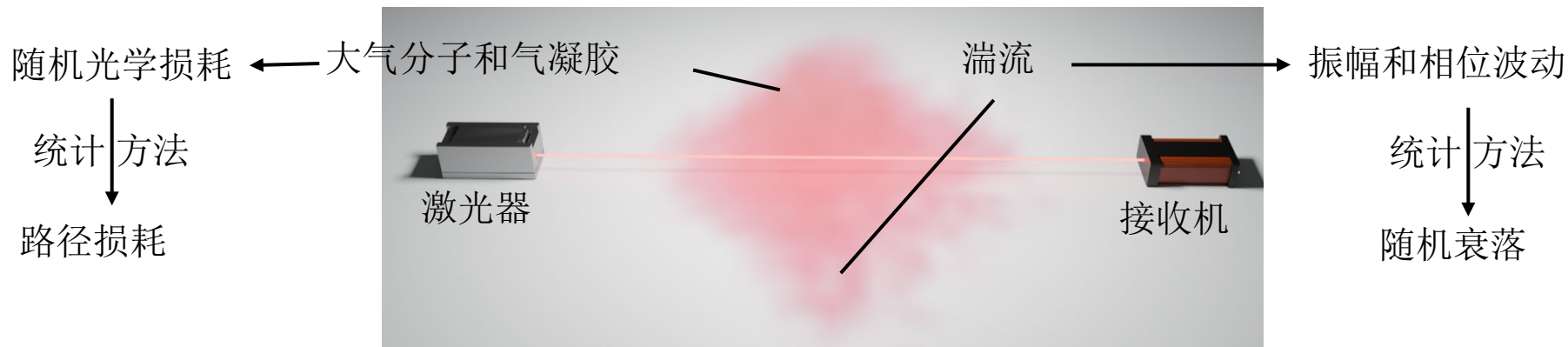


无线光通信系统模型

4.5.2 无线光通信基础



(2) 大气信道路径损耗



通常将大气信道的路径损耗定义为透射率，可以表示为

$$T_L(\lambda, r) = \exp(-\gamma_t(\lambda)r) \quad (1)$$

其中， λ 传输光信号的波长； r 为传输距离； $\gamma_t(\lambda)$ 为总衰减系数，用于刻画受大气中气体分子和气溶胶对光信号散射、吸收的影响，表示为

$$\gamma_t(\lambda) = \alpha_{ml}(\lambda) + \alpha_{al}(\lambda) + \beta_{ml}(\lambda) + \beta_{al}(\lambda) \quad (2)$$

其中， α_{ml} 以及 α_{al} 分别代表大气分子以及气溶胶对光信号的吸收； β_{ml} 以及 β_{al} 分别代表大气分子以及气溶胶对光信号的散射

4.5.2 无线光通信基础



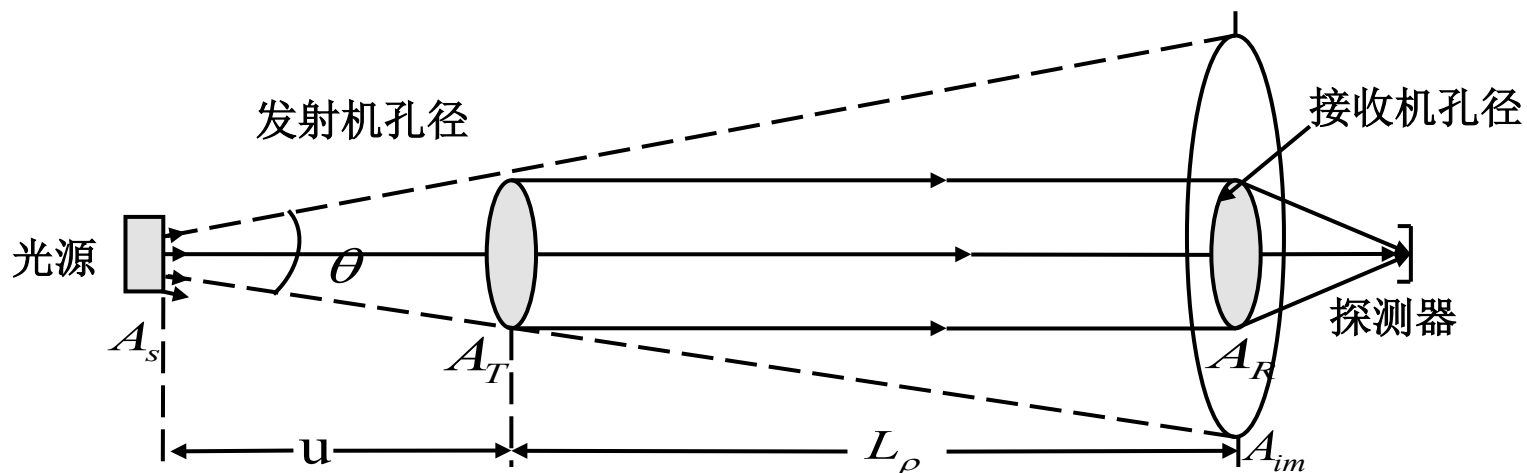
(3) 波束扩散引起的路径损耗

受大气的衍射作用，激光光束向外扩散，接收孔径仅能收集光束一小部分能量，导致接收功率降低。波束扩散引起的路径损耗为通常将大气信道的路径损耗定义为透射率，可以表示为

$$l_{BD} = \left(\frac{4}{\pi R \lambda}\right)^2 A_T A_R \quad (3)$$

其中：

A_T —— 发射天线孔径的面积 A_R —— 接收天线孔径的面积 R —— 路径长度



4.5.2 无线光通信基础



(4) 收发机天线指向误差引起的路径损耗

受发射机和接收机缺乏完美对准影响，接收光信号会产生额外的路径损耗。探测器为孔径半径为 α ，天线指向误差导致的路径损耗为 $L_p(d_{TR}, R)$ ，光束中心和探测器中心间的瞬时位移为 d_{TR} 条件下，路径损耗可以表示为

$$L_p(d_{TR}, R) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2d_{TR}^2}{w_{eq}^2}\right) \quad (4)$$

其中：

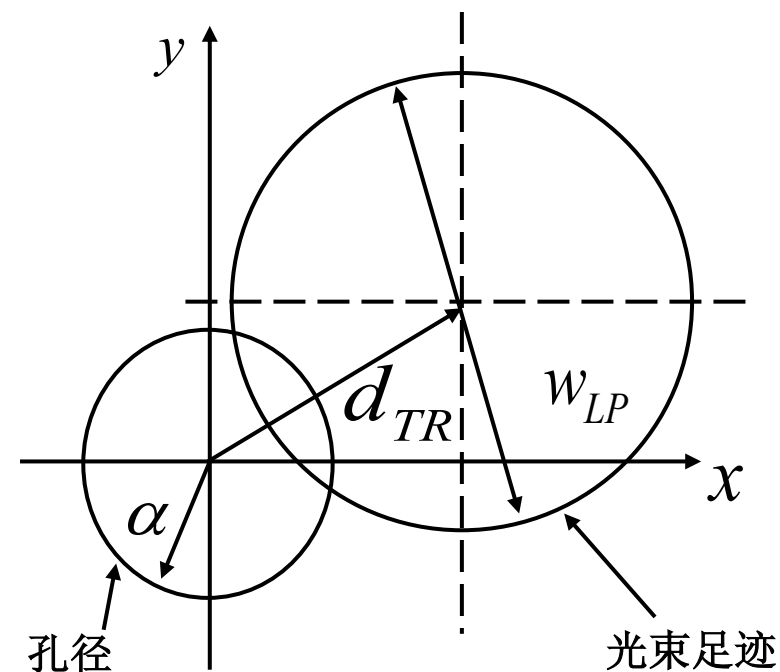
R —— 路径长度

$$w_{eq} = w_{LP}^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\nu)}{2\nu \exp(-\nu^2)} \quad \text{—— 接收机等效激光波束宽度}$$

w_{LP} —— 高斯光束宽度

A_0 —— 无指向误差时的路径损耗

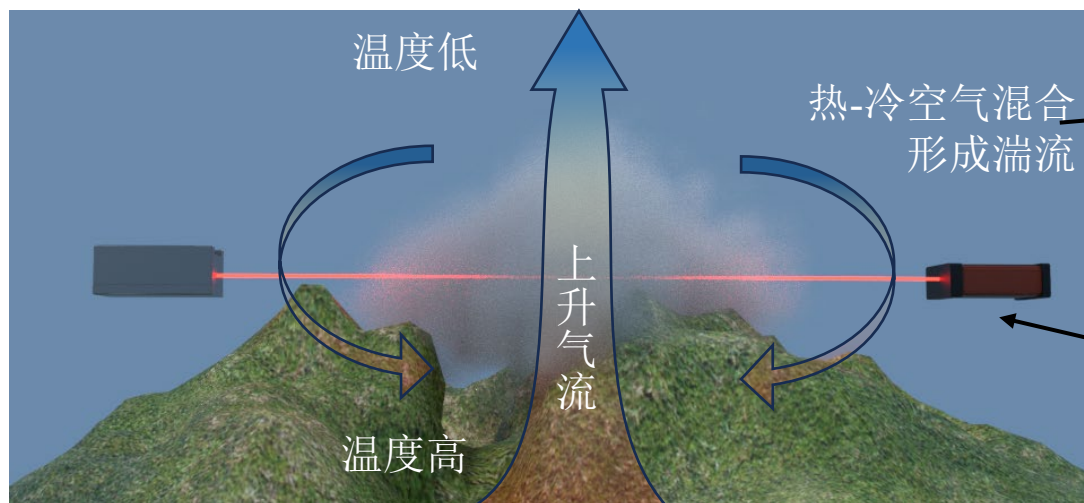
ν —— 发射天线孔径和高斯波束宽度比值



4.5.2 无线光通信基础



(5) 大气湍流形成机理与影响



湍流与激光相互作用

携带信号光

随机振幅变化

随机相位变换

导致系统性能下降

接收光功率衰落

大气湍流的影响可以使用Kolmogorov引入的折射率结构参数量化。最常用的模型是Hufnagel-Valley模型

$$C_n^2(h) = 0.00594(v_w / 27)^2 (10^{-5} h)^{10} \exp(-h / 1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h / 1500) + C_n^2(0) \exp(-h / 100) \quad (5)$$

其中， $C_n^2(0)$ 为近地面的结构常数值，单位为 $\text{m}^{-2/3}$ ； h 为海拔高度，单位为 m ； v_w 为风速，通常设为 21m/s

4.5.2 无线光通信基础



(6) 大气湍流模型

① 对数正态分布模型

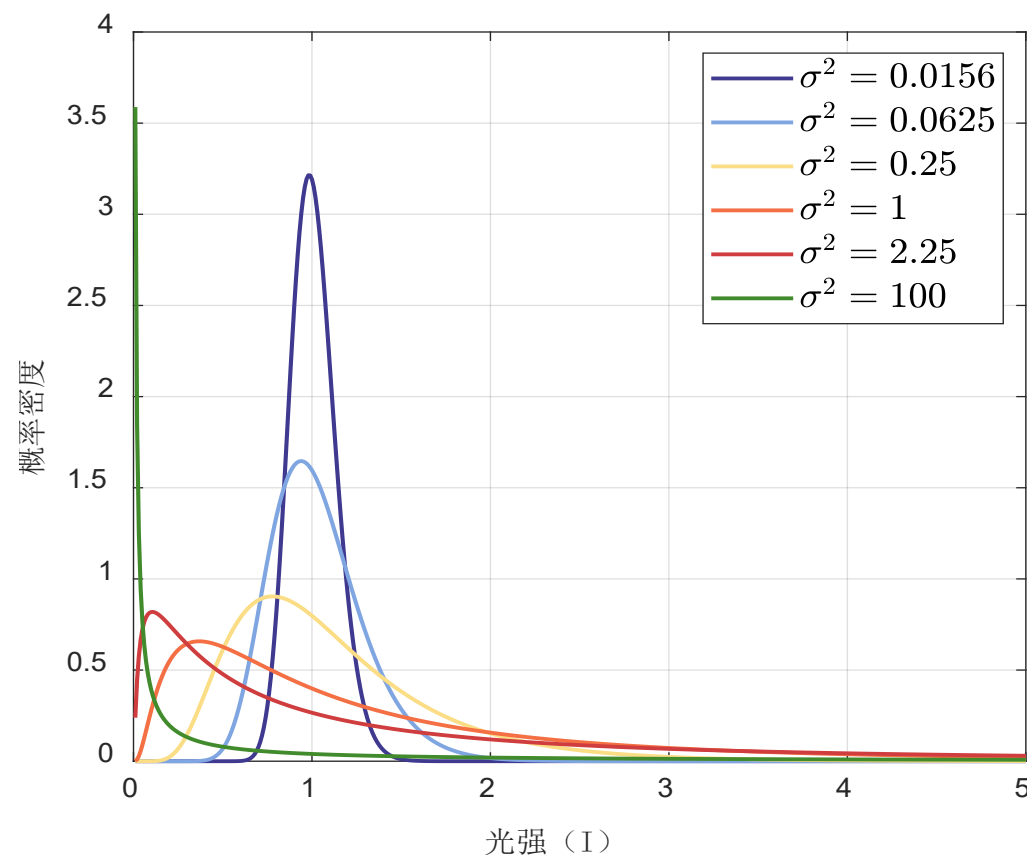
在弱湍流条件下，接收光强服从对数正态分布，其概率密度函数可以表示为

$$p(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{I}{E(I)} - \frac{1}{2}\sigma_{\ln I}^2\right)^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right\} \quad (6)$$

其中：

$E[I]$ ——为光强 I 的期望值

$\sigma_{\ln I}^2$ ——为光强对数值的方差
(可用Rytov方差近似为 $\sigma_{\ln I}^2 = e^{4\sigma_r^2 - 1}$)



4.5.2 无线光通信基础



(6) 大气湍流模型

② 伽马-伽马分布模型

在中强湍流条件下，接收光强服从伽马-伽马分布，其概率密度函数表示为

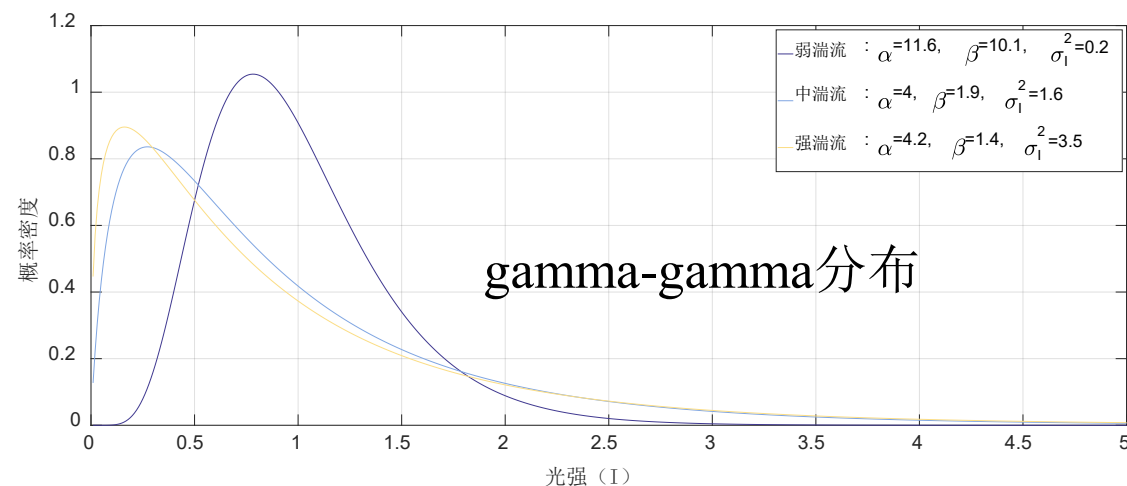
$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta I} \right); I > 0 \quad (7)$$

其中

$\alpha(\beta)$ ——散射和折射对接收光造成的影响

$K_n(\cdot)$ ——第二类n阶贝塞尔函数

$\Gamma(\cdot)$ ——伽马函数

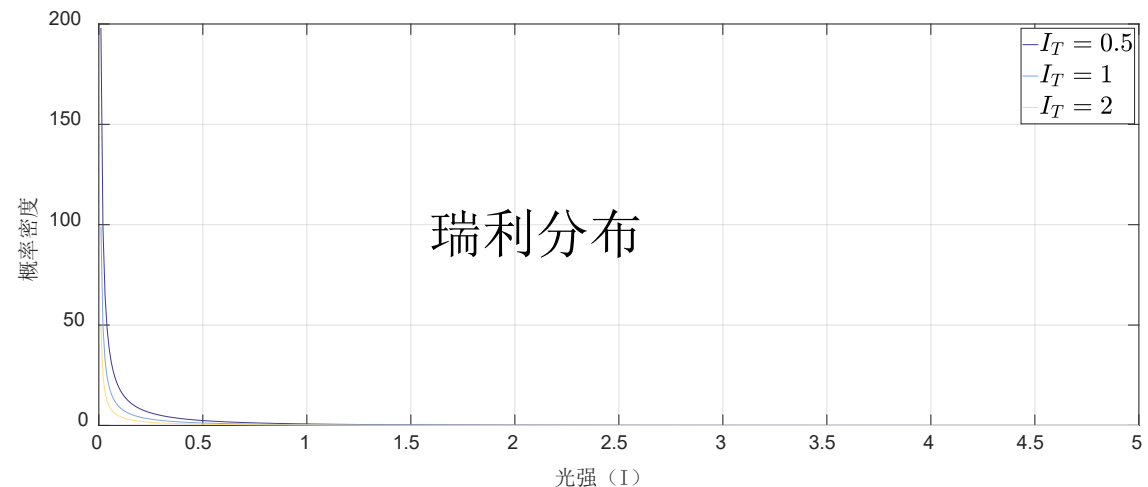


③ 瑞利分布模型

在饱和湍流条件下，接收光强服从瑞利分布，即

$$p(I) = \frac{1}{I_T I} \exp(-I), \quad I_T I > 0 \quad (8)$$

其中: I_T ——发射光强

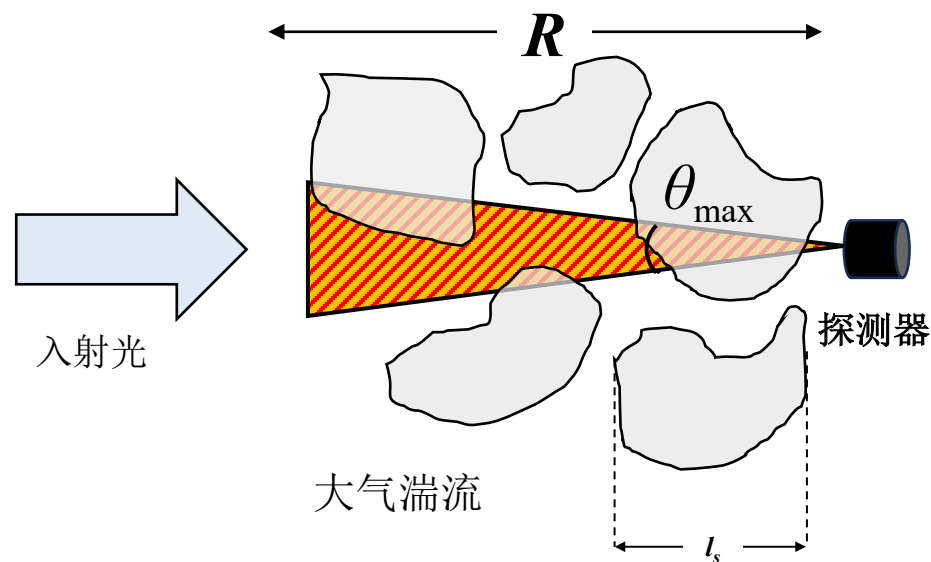


4.5.2 无线光通信基础



(7) 大气湍流补偿技术

① 孔径平均技术

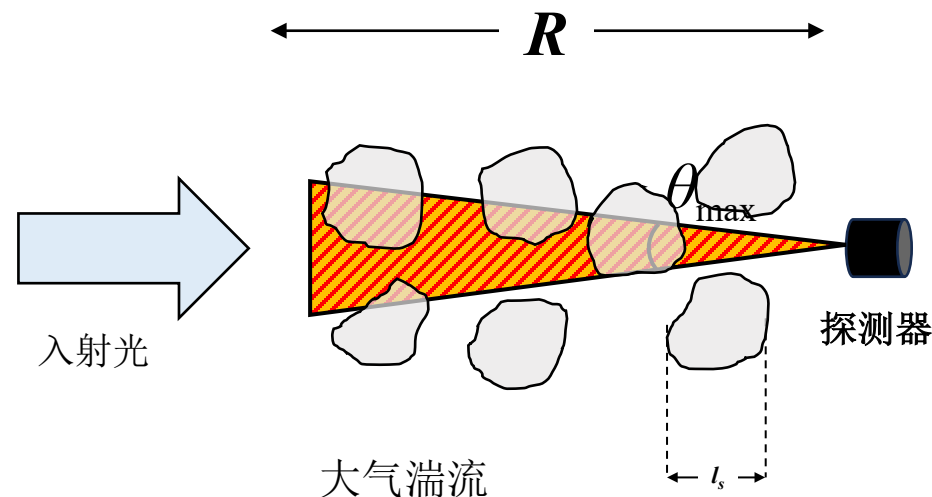


最大接收椎体角: $\theta_{\max} \approx \frac{\lambda}{l_0}$

接受效果良好条件

$$R\theta_{\max} \ll l_0$$

接收光路圆锥体最大宽度: $R\theta_{\max}$



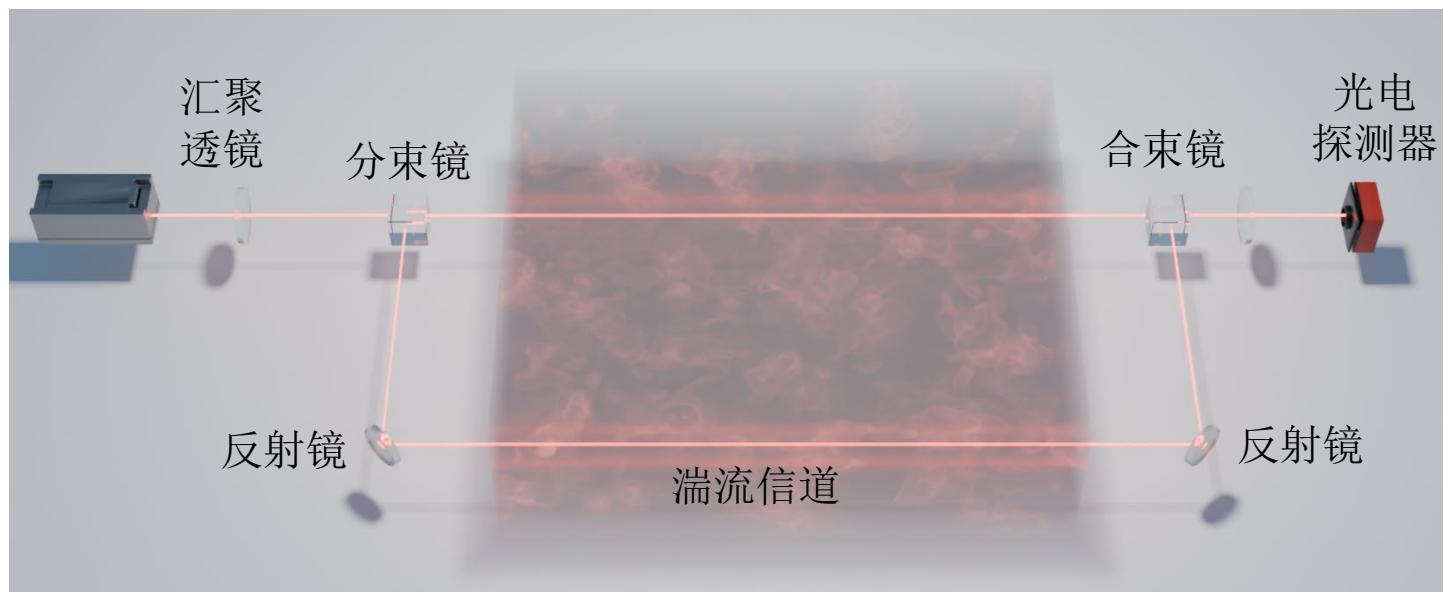
波长与湍流漩涡尺度关系: $\sqrt{\lambda R} < l_0$

4.5.2 无线光通信基础



(7) 大气湍流补偿技术

② 空间分集技术



若设初始发射光强为 I_0 ， n 条支路光强分别为 $I_i = \alpha_i I_0$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。在接收端采用等增益合并的条件下，接收信号为

$$y = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_0 = I_0 \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

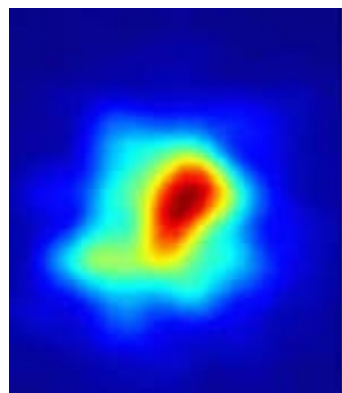
对湍流的影响进行平均

4.5.2 无线光通信基础

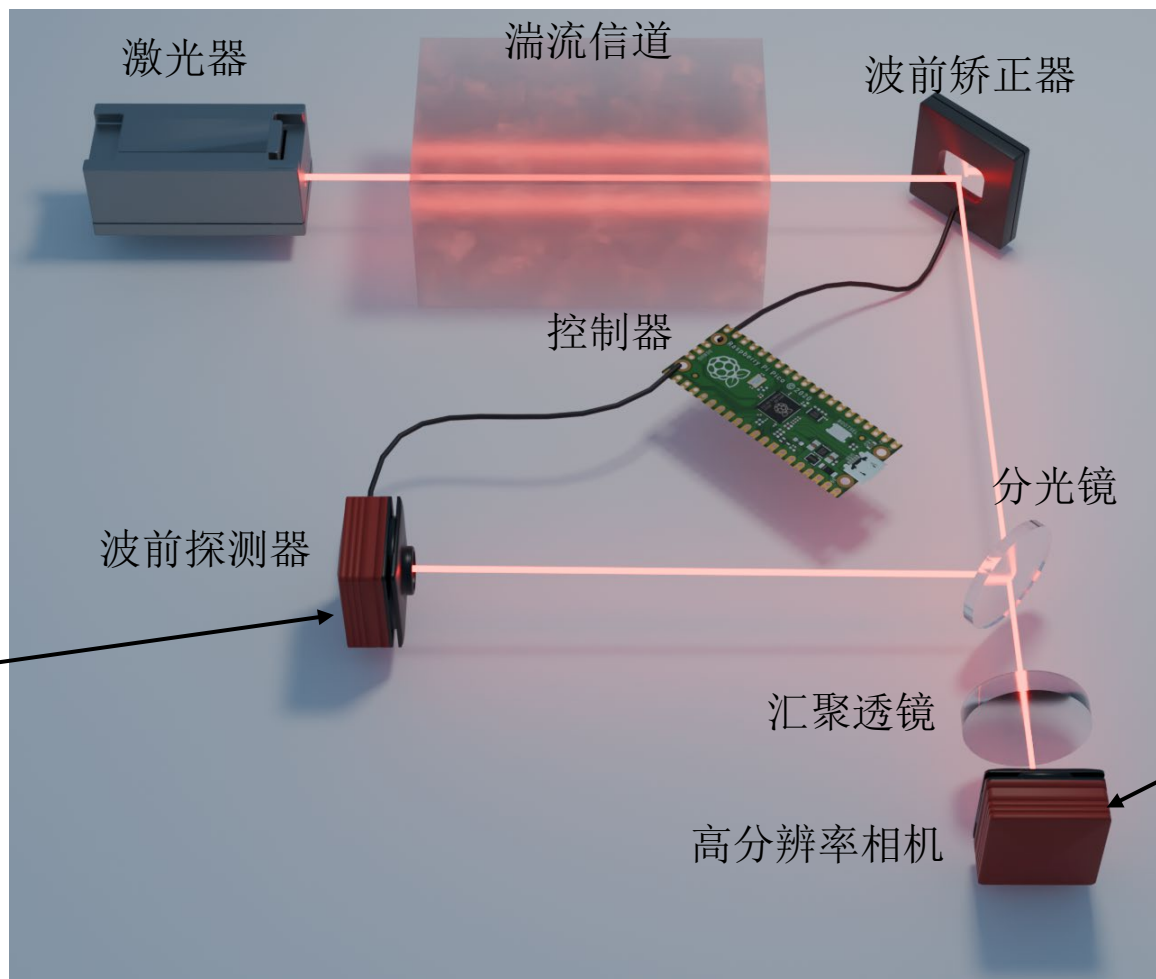


(7) 大气湍流补偿技术 ③ 自适应光学技术

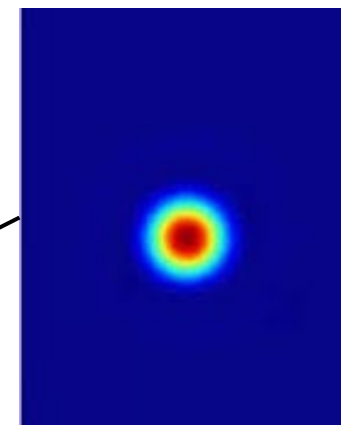
控制器根据波前探测器图像实时计算波前矫正器的镜面弯曲程度



波前探测器图像



高分辨率相机接收经过波前矫正器矫正后的分光信号



高分辨率相机图像

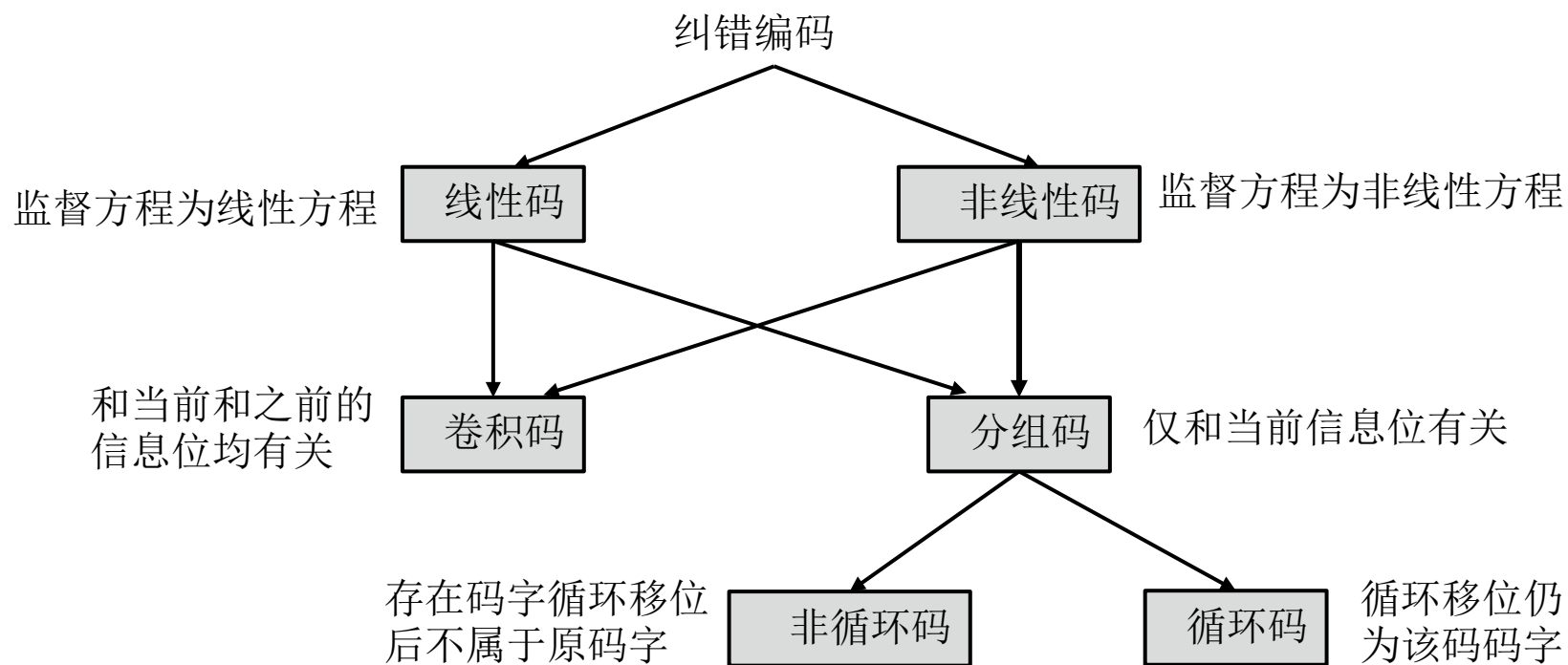
4.5.2 无线光通信基础



(7) 大气湍流补偿技术

④ 差错控制编码技术

在受湍流影响下的激光链路中，通过使用差错控制编码，即信道编码，实现湍流引起的误比特纠错。对于特定湍流强度和链路距离，选择合适的编码技术可以明显降低激光通信系统的误码率。



《光纤通信》第2版，顾畹仪著，人民邮电出版社, 2011

《现代通信技术》第5版，纪越峰著，北京邮电大学出版社，2020

《光纤通信》第5版，Joseph C. Palais著，王江平等译，电子工业出版社，2015

《光纤通信技术》第4版，强世锦等著，清华大学出版社，2011

北京邮电大学

谢谢观看