

# 光纤通信与数字传输

南京邮电大学  
通信与信息工程学院

## 概述

光接收机是光纤通信系统的主要组成部分，它的性能是整个光纤通信系统性能的综合反映。由光发送机发出的光信号在光纤线路中传输时，不仅会受到损耗的影响而造成幅度衰减，同时光纤色散和非线性效应等可能会引起脉冲波形展宽，由此造成的信号质量下降会增加接收机接收信号的难度，这些都对接收机的性能提出了较高的要求。

光接收机的主要作用是将经光纤传输后幅度被衰减，波形被展宽的微弱光信号转变为电信号，并经放大处理，恢复为原来的信号。

## 4.1 半导体光检测器件

光检测器的作用是将光纤输出的微弱光信号转变为电信号，它是影响光接收机性能的重要器件。

光纤通信系统对光检测器的基本要求是：

- 波长段内响应度或灵敏度要高
- 具有足够的带宽和响应速度
- 由检测器引入的附加噪声必须最低，暗电流、漏电流和并联电导必须最小
- 较低的偏压或偏流，具有高可靠性和长寿命
- 较小的几何尺寸，便于与光纤及其他电路组装

## 响应度

响应度是表示光检测器能量转换效率的一个参数，是光检测器的平均输出电流与平均输入光功率之比。表示为

$$R_0 = I_p / P_0 \text{ (A/W)} \quad (4-1)$$

式中： $R_0$ ——光检测器的响应度

$I_p$ ——光检测器的平均输出电流

$P_0$ ——入射在检测器光敏面上的平均光功率

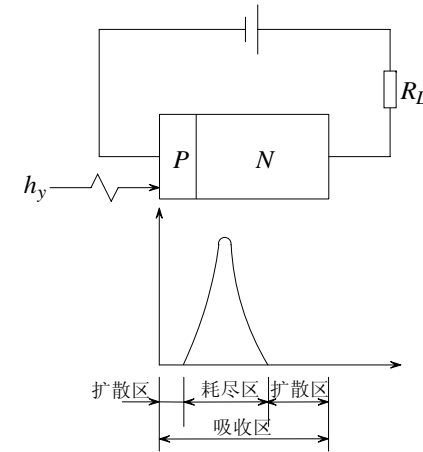
### 4.1.1 光电二极管的工作原理

最基本的半导体光检测器是由反向偏置的PN结构成的。

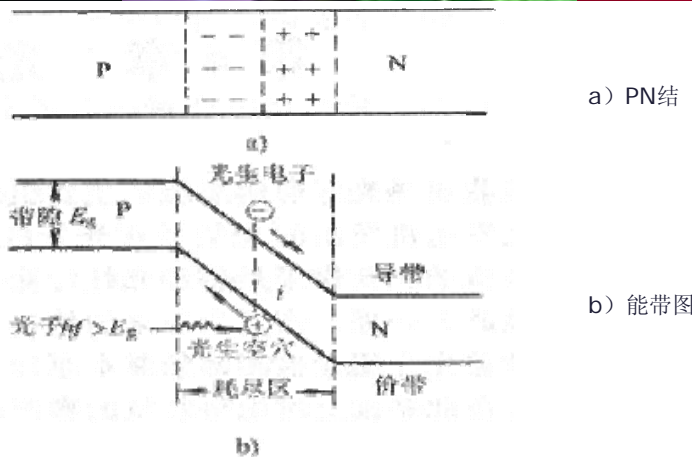
自建场的作用使电子和空穴产生了与扩散方向相反的漂移运动。在PN结界面附近形成了高电场的耗尽区。在耗尽区两边，电场基本为0，称为扩散区。

耗尽区和扩散区均为光子的吸收区，在入射光照射下，要吸收光能量产生光生载流子。

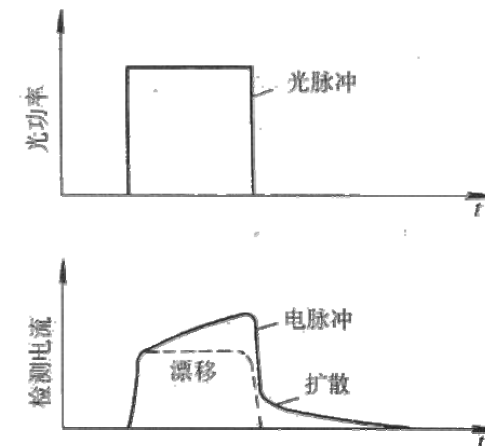
### 图4-1 PN结光电二极管



### 图4-2 PN结光电二极管工作原理



### 图4-3 光生载流子慢扩散使响应变慢



## 反向偏压工作的光电二极管

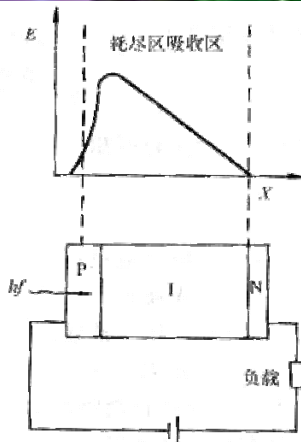
为了克服由于光生载流子扩散速度慢于漂移速度而引起的响应变慢现象，对光电二极管采用反向偏压。

反向偏压增加了耗尽区的宽度，从而减少了光生电流中的扩散分量，同时增强的电场也会加快光生载流子的漂移速度，有利于加快光生载流子的响应时间。

## 4.1.2. 光电二极管PIN

在上述的光电二极管的PN结中间掺入一层浓度很低的N型半导体，就可以增大耗尽区的宽度，达到减小扩散运动的影响，提高响应速度的目的。由于这一掺入层的掺杂浓度低，近乎本征（Intrinsic）半导体，故称I层。因此这种结构称为PIN光电二极管。I层较厚，几乎占尽了整个耗尽区。绝大部分的入射光在I层内被吸收并产生大量的电子-空穴对。在I层两侧是掺杂浓度很高的P型和N型半导体，P层和N层很薄，吸收入射光的比例很小。因而光生电流中漂移分量占了主导地位，这就大大加快了响应速度。

图4-4 PIN光电二极管结构及各层电场分布



## PIN光电二极管的主要特性

- 截止波长和吸收系数
- 响应度和量子效率
- 响应速度
- 线性饱和
- 暗电流
- 噪声

## 截止波长和吸收系数

只有入射光子的能量  $hf$  大于半导体材料的禁带宽度  $E_g$ ，才能产生光电效应。因此对一种特定材料的检测器存在着一个下限频率  $f_c$  和相应的上限光波长  $\lambda_c$ 。

或写成

$$hf_c = E_g$$

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = 1.24 / E_g$$

式中  $h$  为普朗克常数， $c$  为光速，波长  $\lambda_c$  单位为微米，禁带宽度  $E_g$  单位为电子伏特。

可见，只有波长小于  $\lambda_c$  的光才能用由这种材料做成的器件检测。  $\lambda_c$  称为器件的截止波长。

## 穿透效应

半导体的吸收作用随光波长的减小而迅速增强。即  $\alpha$  随光波长减小而变大。因此光波长很短时，光在半导体表面就被吸收殆尽，使得光电转换效率很低。这限制了半导体检测器在较短波长上的应用。

由上分析可见：要检测某波长的入射光，必须要选择由适当材料做成的检测器。一方面由其禁带宽度决定的截止波长要大于入射光波长，否则材料对光透明，不能进行光电转换。另一方面，吸收系数不能太大，以免降低光电转换效率。

## 响应度和量子效率

响应度和量子效率是表示光电二极管能量转换效率的参数。若入射光功率为  $P_0$  时产生的光电流为  $I_p$ ，则响应度  $R_0$  定义为：

$$R_0 = I_p / P_0 \quad (\text{A/W}) \quad (4-3)$$

量子效率定义为

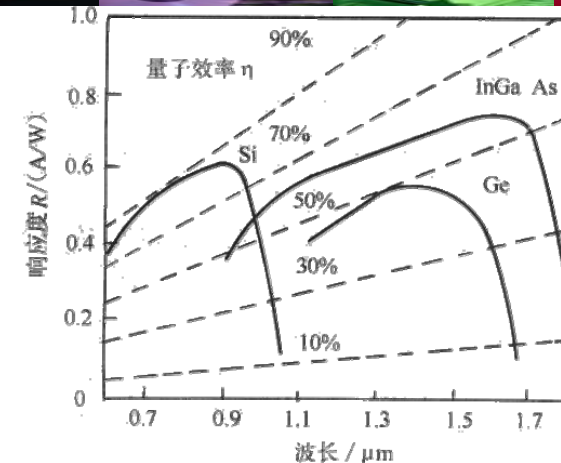
$$\eta = \frac{\text{光电转换产生的电子-空穴对数}}{\text{入射光子数}} = \frac{I_p / e}{P_0 / hf} = \frac{I_p}{P_0} \frac{hf}{e} \quad (4-4)$$

由4-3、4-4可知：

$$R_0 = \frac{\eta e}{hf} = \frac{e\lambda}{hc} \cdot \eta (\text{A/W}) \quad (4-5)$$

式中  $e$  为电子电量， $\lambda$  为光波长， $h$  为普朗克常数， $c$  为光速。

图4-5 几种材料的PIN管  $R_0$ ,  $\eta$ ,  $\lambda$  的关系曲线



## 响应速度

PIN 光电二极管的响应速度可以用响应时间或截止频率来表示。

响应时间取决于光检测电路的上升时间、载流子在耗尽层中的渡越时间和耗尽区外载流子的扩散时间。

## 线性饱和

光检测器电路有一定的光功率检测范围。当入射光功率太大时，光电流和光功率将不成正比，从而产生非线性失真。

随着输入光功率和输出电流的增大，检测电路中负载电阻上的压降增大，光电管上实际压降减小，耗尽区内电场减弱，继而会引起单位光功率产生的光电流变小。此时光电转换不再满足线性关系，称为线性饱和。

## 暗电流

处于反向偏压下的半导体光电二极管，在无光照时仍有电流流过，这部分电流称为暗电流。光电二极管的暗电流分为两部分：一部分为反向偏压下二极管的反向饱和电流，称为体暗电流，是由载流子的热扩散形成的，体暗电流由半导体材料及掺杂浓度决定。另一部分是由半导体表面缺陷引起的表面漏电流，称为表面暗电流。

暗电流的存在限制了光电二极管所能检测的最小光功率，也就是降低了接收机的灵敏度。

## 噪声

噪声是光电二极管的一个重要参数。噪声的存在同样也限制了光电二极管所能检测的最小光功率，直接影响了接收灵敏度。

光电二极管的噪声包括散粒噪声（又称量子噪声）和热噪声。噪声通常用均方噪声电流（在 $1\Omega$ 负载上消耗的噪声功率）来描述。



### 4.1.3 雪崩光电二极管APD

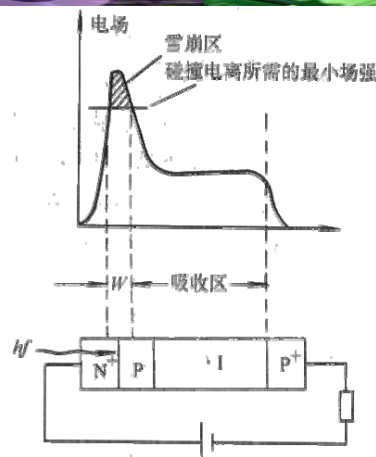
光接收机的灵敏度主要由接收机的信噪比决定。因此可以采用减小噪声或增大信号电流的方法来提高接收机的灵敏度。PIN光电二极管的量子噪声很小，所以采用PIN光电二极管为检测器的光接收机的噪声主要由负载电阻和后级放大器决定。如果采用自身对光生电流具有放大作用的光检测器，即使检测器在电流放大过程中会产生附加噪声，但只要附加噪声小于负载电阻和后级放大器的噪声，则这样的检测器必定会改善接收机的信噪比，从而提高了接收机的灵敏度。雪崩光电二极管（APD）就是这样的一种具有内部电流增益的光电转换器件。

### APD的工作原理

处于反向偏置的耗尽层光电二极管，当外加的反向偏压不断增强时，耗尽层内产生的光生载流子在强电场作用下得到加速，获得很大的动能。高能的载流子与半导体晶体内的原子相碰撞，将束缚在价带中的电子激发到导带，从而在耗尽层内产生新的电子-空穴对，这种现象称为碰撞电离。碰撞电离的第二代载流子在耗尽层的强电场的加速下再次引起碰撞电离而产生第三代载流子。碰撞电离的反复循环使耗尽层内的载流子数雪崩似的急剧增加，通过二极管的电流也就猛增，这就是雪崩倍增效应。

雪崩光电二极管（APD）就是利用雪崩倍增效应实现内部电流增益的半导体光电转换器件。

### 图4-9 APD光电二极管的工作原理



### APD倍增因子 $g$ 和平均倍增

倍增因子是APD内部的电流增益系数。倍增因子 $g$ 定义为APD雪崩放大后的输出电流 $I_M$ 和初始光生电流 $I_P$ 的比值。

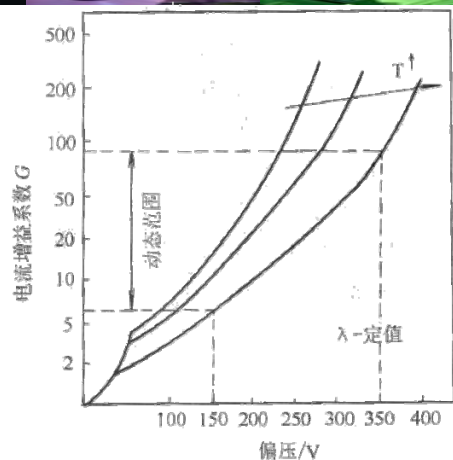
$$g = \frac{I_M}{I_P} \quad (4-14)$$

雪崩倍增过程是一个随机过程，即每一电子-空穴对与半导体晶体内的原子碰撞电离产生的初始电子-空穴对的数目是随机的，因而倍增因子 $g$ 也是随机变化的。一般所称的倍增因子是指平均倍增（电流增益系数） $G$ 。

$$G = \langle g \rangle \quad (4-15)$$

式中 $\langle g \rangle$ 是表示随机量 $g$ 的平均值。

### 图4-10 电流增益—偏压、温度关系



### 过剩噪声

当雪崩光电二极管的雪崩增益为 $G$ 时，它的信号电流比无倍增时增大了 $G$ 倍，信号功率增大了 $G^2$ 倍。由式可以看出噪声功率增大了 $G^2F$ 倍。由于 $F > 2$ ，所以噪声功率增大的速率大于信号功率增大的速率\*。

\*此处分析过程请参阅教材

### APD响应度和量子效率

由于在APD中光生电流被倍增了 $G$ 倍，所以它的响应度比PIN管提高了 $G$ 倍。因为量子效率只与初始载流子数目有关，与倍增无关，所以不管PIN还是APD，量子效率总是小于1。

### APD 线性饱和及暗电流

APD 适宜检测微弱的光信号，当输入光功率较强时，入射光功率和输出电流之间的线性关系会被破坏。

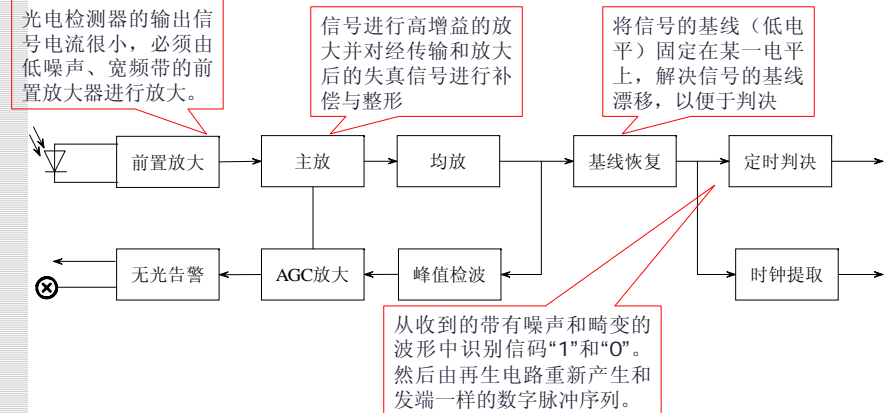
APD 中产生非线性光电变换的原因是器件上的偏压不能保持恒定，继而会引起雪崩区的变窄和倍增因子的下降。

APD 暗电流随倍增因子的增大而增大。

## 4.2 光接收机

直接检测数字光接收机主要由光接收电路和输出接口电路组成。接收机的组成框图如图4-11所示。

## 图4-11 直接检测数字光接收机框图



## 光接收机性能

光接收机的性能直接影响光纤通信系统的传输距离、误码率和通信质量。光接收机性能的优劣的主要技术指标是接收灵敏度、误码率或信噪比、带宽和动态范围等。

接收机灵敏度是接收机的关键指标，它表示在给定的误码率（或信噪比）条件下，接收机接收微弱信号的能力。它与整个系统的许多因素有关，如系统噪声、信号波形等。

接收机的动态范围表示接收机适应输入信号变化的能力。光接收机的输入信号是不能任意调整的，它将随着许多因素的变化而变化，所以光接收机必须能适应输入信号在一定范围内变化。

## 4.2.1 光接收电路

光接收电路由检测器、前置放大器、主放大器、自动增益控制和均衡电路组成。它将光信号转换成一定幅度的、波形好的电信号，供后续电路进行再生判决。



## 1. 光检测和前置放大器

光电检测器完成光电转换。由发送端发出的光信号经过光纤线路传输后，到达接收端已经很微弱。检测器输出的电流仅在 $nA$ 数量级。所以必须采用多级放大将微弱的电信号放大至判决电路能正确识别。

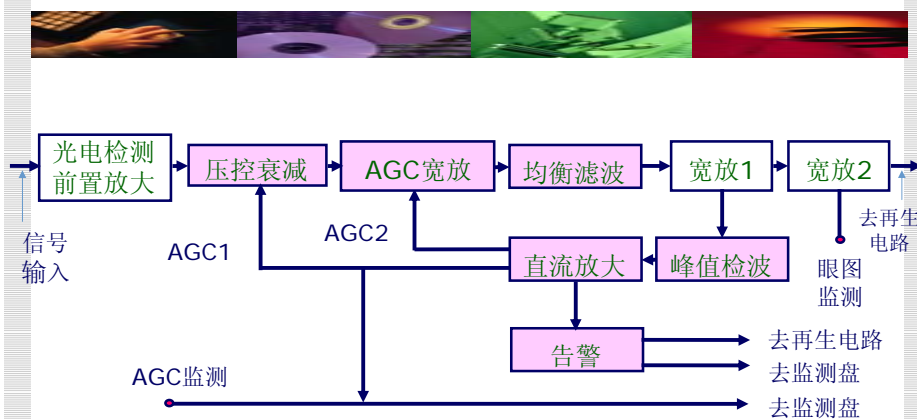
由于信号微弱又带有噪声，如果采用一般的放大器进行放大，放大器本身就会将前一级放大器所引入的噪声也进行放大，信噪比并没有得到改善。因此多级放大器的前级必须满足低噪声、高增益的要求，才能得到较大的信噪比。

## 2. 主放和均放

信号经前置放大器输出仍然比较微弱，不能满足幅度判决的要求，因此还必须加以放大。由于光接收机的入射光功率有一个可变化的动态范围，因此放大器增益也应随入射光功率的变化得到相应的调整，以适应在不同输入信号情况下仍能保持输出电平稳定。即实现自动增益控制。在光接收机中，把实现自动增益控制的放大级称为主放大器。

均放电路的主要作用是对接收到的信号进行均衡以利于定时判决。

### 图4-13 主放和均放构成框图

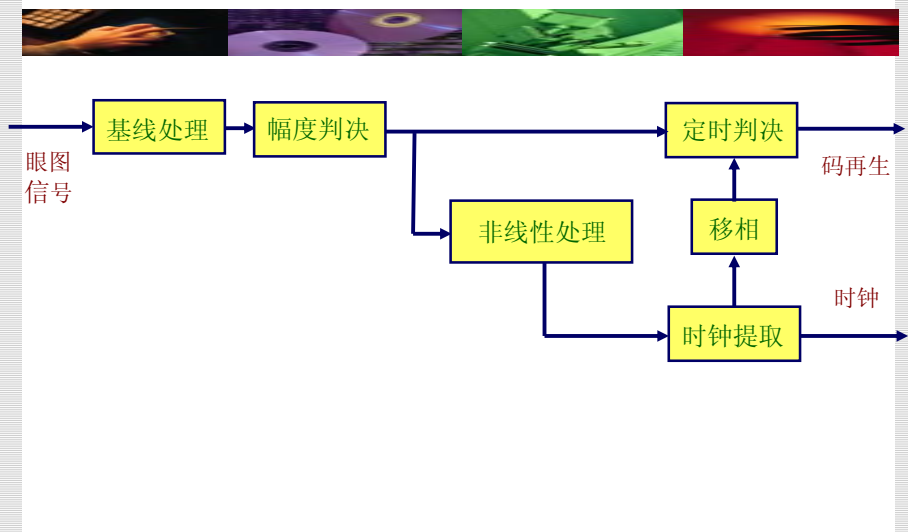


## 3. 基线处理与定时再生

由于传输线路上所传送的码流中“0”、“1”分布并不均匀，并不可避免地有连续的“0”或连续的“1”出现，使得信号中的直流成分有起伏变化，这种信号在接收机中处理时，因各级间的耦合均为交流耦合，即RC耦合，这会使信号的基线随直流成分的变化而漂移。

这种漂移严重时，会使判决产生误码。在发送端虽已进行了线路码型变换，以使码流中的“0”、“1”分布尽可能均匀使信号中的直流分量尽可能恒定，但是由于种种原因，难以达到理想程度。因此在定时再生电路中，首先要对基线漂移进行处理，即将信号的基线（低电平）固定在某一电平上。

### 图4-16 基线处理与定时再生框图



## 定时再生

经过基线处理的信号，首先要进行幅度判决，然后再经过时钟提取，还原出幅度和时钟准确的再生信号。

## 4.2.2 输出电路

输出电路是光端机接收部分在定时再生之后的信号处理部分。通常包括线路码型反变换、输出接口两大部分。低中速率的光端机，则将这两部分安装在一块机盘中，称为输出盘。在“光电合架”设备中，取消了输出接口电路，则码型反变换部分和光接收电路装在同一块机盘中。

## 4.2.3 其他电路

- 告警电路
- 倒换电路
- 公务电路
- 电源电路

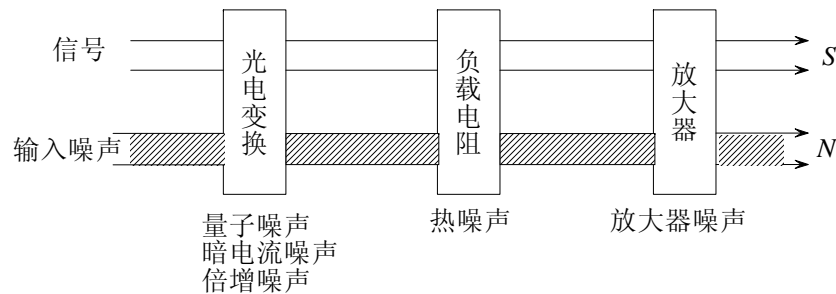
## 4.3 光接收机噪声分析

光接收机的作用是将接收到的微弱的数字光信号通过光电二极管转换为光电流，并经放大、整形、判决等信号处理，完成信号的准确检测。一个性能优良的光接收机应具有尽可能高的接收灵敏度。但灵敏度的提高受到了接收机中存在的噪声的影响。噪声的存在将会降低接收机的灵敏度。

### 4.3.1 光接收机的主要噪声

光接收机中存在各种噪声源，根据噪声产生的不同机理，噪声可分为两类：散粒噪声和热噪声。接收机中的噪声源及其引入部位如图4-20所示。其中散粒噪声包括光检测器的量子噪声、暗电流噪声、漏电流噪声和APD倍增噪声；热噪声主要指负载电阻产生的热噪声，放大器噪声（主要是前置放大器噪声）中，既有热噪声，又有散粒噪声。

### 图4-20 接收机噪声及其分布



### 4.3.2 光检测器的噪声分析

对于光检测器的噪声，采用的主要方法是从建立噪声的数学模型着手进行分析。（此处推导过程不作要求）

如果规定误码率指标为不超过 $P_e = 10^{-9}$ ，则最小必须接收的光脉冲能量应为

$$E_{\min} = 21 \frac{hf}{\eta} \quad (4-26)$$

如果量子效率 $\eta = 1$ ，则最小检测的光脉冲能量必须等于 $21hf$ ，也就是说最小必须接收21个光子，才能保证误码率不大于 $10^{-9}$ 。如发送端发出的“1”码和“0”码等概率出现（数目相等）每位码持续时间为 $T$ ，那么平均检测光功率必须至少为

$$P_{\min} = \frac{21hf}{2T} \quad (4-27)$$

这就是接收机灵敏度对规定误码率 $P_e = 10^{-9}$ 的基本极限，即所谓量子极限。

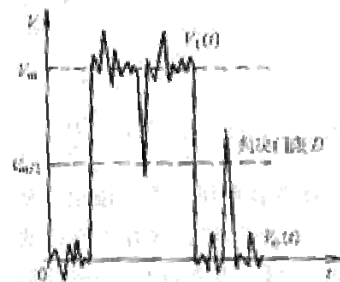
4.3.3和4.3.4节不作要求。

## 4.4 光接收机的误码率\*

光接收机的误码主要由散粒噪声、倍增噪声、热噪声等综合的总噪声引起。误码的多少及分布不仅和总噪声的大小有关，还与总噪声的分布有关。入射光子在PIN内产生的电子或在APD内产生的一次电子通常服从泊松分布。但经过电子倍增，再经放大、均衡后，噪声分布变得很复杂。所以要精确计算误码率及灵敏度就比较困难。

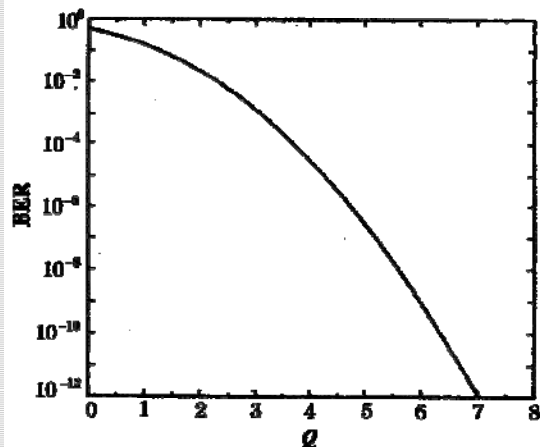
\*详见教材理论分析

## 判决点上的噪声电压



由于噪声的存在，接收机放大器的输出是一个随机过程，判决时的取样值也是随机变量。所以在判决时可能会发生误码。把接收的“1”码误判为“0”码，或把接收的“0”码误判为“1”码

## 图4-30 误码率和Q值的关系



Q值表示判决点门限值与噪声电压（电流）有效值的比值，称为超扰比，含有信噪比的概念。不同的Q值对应不同的误码率值。

## 4.5 接收机灵敏度

接收机灵敏度是光接收机最主要的性能指标之一，可以直观地衡量接收机在一定条件下接收微弱信号的能力。

### 4.5.1 灵敏度定义和表示方法

光接收机灵敏度是表征光接收机调整到最佳状态时，接收微弱光信号的能力。它可用下列三种物理量表示。

在保证达到所要求的误码率（或信噪比）条件下，接收机所需的：

- 输入的最小平均光功率  $P_R$ ;
- 每个光脉冲的最低平均光子数  $n_0$ ;
- 每个光脉冲的最低平均能量  $E_d$ 。

### 三种表示方法之间的关系

$$P_R = \frac{E_d}{2T} = \frac{n_0 hf}{2T} \quad (4-61)$$

式中： $T$ 为脉冲码元时隙， $T=1/f_b$

$hf$ 是一个光子能量

$P_R$  的单位为  $W$ ，常用  $mW$ 。若用  $dB_m$  来表示灵敏度  $S_r$ ，则可写为：

$$S_r = 10 \lg \frac{P_R}{1mW} (dBm) \quad (4-62)$$

### 灵敏度换算示例

例如，某接收机在保证误码率  $P_e=10^{-9}$  的条件下，所需接受的最小光功率为  $15.8nW$ ，则灵敏度为：

$$S_r = 10 \lg \frac{15.8 \times 10^{-9}}{10^{-3}} = -48 (dBm) \quad (4-63)$$

对于不同的误码率要求，接收机的灵敏度也不同。而产生误码的主要原因是噪声。光信号通过接收机时，受到各种噪声影响，降低接收机的灵敏度。因此，对接收机噪声的研究分析是光接收机的主要课题。

### 接收机的动态范围

动态范围表征的是光接收机适应输入信号变化的能力，也即光接收机灵敏度和过载功率之间的差值。即

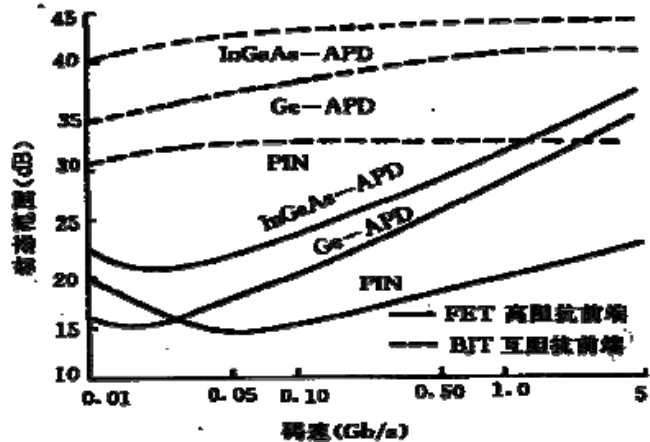
$$D = 10 \lg \frac{P_{\max} (mW)}{1 (mW)} - 10 \lg \frac{P_{\min} (mW)}{1 (mW)} = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} (dB)$$

如对于某接收机在保证  $P_e=10^{-9}$  的条件下，所需接受的最小光功率为  $15.8nW$ ，而正常工作时最大接收功率为  $1\mu W$ ，则其动态范围

$$D = 10 \lg \frac{1 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3}} - 10 \lg \frac{15.8 \times 10^{-9}}{1 \times 10^{-3}} = 18 (dB)$$



## 长波长接收机的典型动态范围



## 4.5.2 灵敏度计算

### 理想接收机灵敏度

所谓理想光纤通信系统，即是假设系统的频带无限宽，系统无噪声。对这样的系统，我们可认为，发送端调制信号是矩形脉冲，光脉冲信号经过光纤传输到接收端，经过光电检测器检测得到的电信号还是矩形脉冲。那在这种系统中，接收机的灵敏度将受到什么限制呢？最大可能的值是多少呢？

## 1. 理想接收机灵敏度的计算

根据 
$$P_e = P_{(N=0)} = e^{-\eta E_d / hf} \quad (4-64)$$

在误码率要求为  $P_e = 10^{-9}$  时，即可求出  $E_d$ ，即为理想光纤通信系统接收灵敏度

$$E_d = 21hf / \eta \quad (4-65)$$

由上式可见，理想光纤通信系统的灵敏度 ( $P_e = 10^{-9}$  时) 为 21 个光子的能量。

或者用下式表示

$$P_R = 10.5hcf_b / \lambda \eta \quad (4-66)$$

由此可知，理想接收机的灵敏度与光信号速率、光波频率（或波长）、检测器的量子效率  $\eta$  有关。

## 4. 工程中灵敏度的计算

在实际工程应用中，接收机所需的最小接收光功率可按如下近似公式计算。

当光电检测器为 PIN 时：

$$P_e = 10^{-9}, P_R = 3.25 \times 10^{-8} \left( \frac{f_b}{f_{b0}} \right)^{3/2} \quad (W) \quad (4-71)$$

当光电检测器为 APD 时：

$$P_e = 10^{-9}, P_R = 1.64 \times 10^{-9} \left( \frac{f_b}{f_{b0}} \right)^{7/6} \quad (W) \quad (4-72)$$

式中  $f_b$  为系统码速 Mbit/s，  
 $f_{b0}$  为基准计算码速， $f_{b0} = 25$  Mbit/s。

### 4.5.3 影响灵敏度的因素

由上述计算接收机最小接收光功率的公式中看出，在一定误码率条件下，影响接收机灵敏度的因素有：码间干扰、消光比、暗电流、量子效率、光波波长、信号速率、各种噪声等。下面只对码间干扰、消光比、暗电流的影响进行分析。

### 码间干扰的影响

在光纤通信系统中，光接收机的输入光脉冲信号宽度与光发送脉冲及光纤的带宽有关。在光纤色散较大的情况下，光脉冲通过光纤时将被展宽，产生码间干扰，降低光接收机的灵敏度。

### 消光比的影响

光源在直接强度调制下，由于要考虑一定的偏置电流，使得无信号脉冲时仍会有一定的输出功率。这种残留的光将在接收机中产生噪声，影响接收机灵敏度。定义参数消光比(EXT)为：

$$EXT = \frac{\text{全“0”码时平均输出光功率}}{\text{全“1”码时平均输出光功率}}$$

一般要求 $EXT \leq 10\%$ 。

当 $EXT \neq 0$ 时，光源的残留光使检测器产生噪声。EXT越大时对灵敏度的影响也越大，其值与使用的光检测器有关。

### 暗电流的影响

光电检测器中的暗电流对光接收机灵敏度的影响与消光比的影响相似。暗电流与光源无信号时的残留光一样，在接收机中产生噪声，降低接收机的灵敏度。

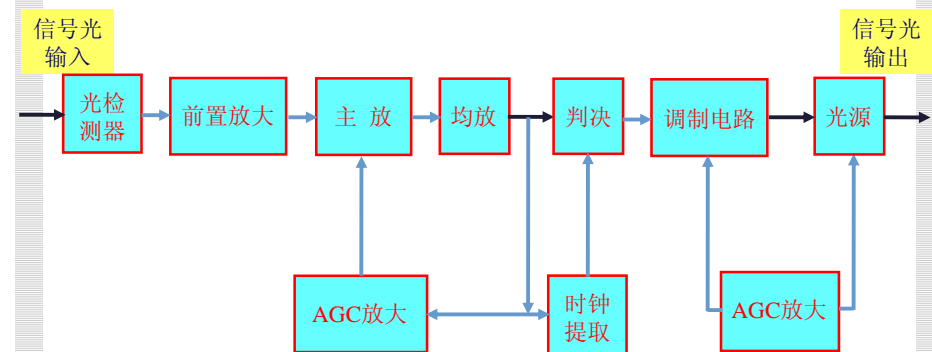
在APD光电检测器中，有两种暗电流，一种是无倍增的，一种是有倍增的，后者对灵敏度的影响要比前者更大一些。

## 4.6 光中继机

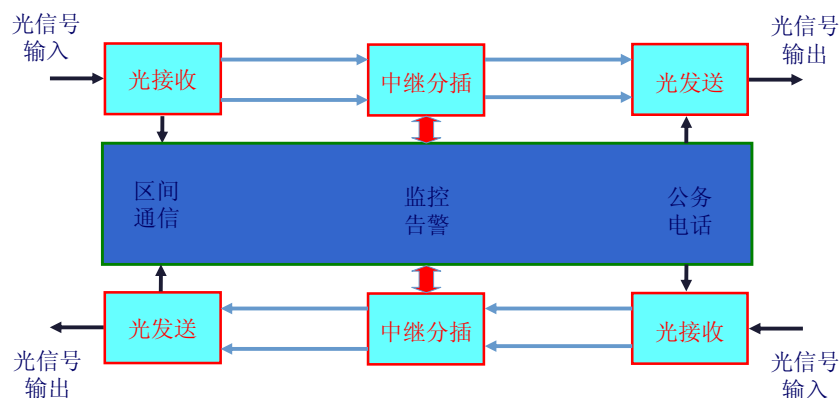
光发送机输出的光脉冲信号，经过光纤传输后，因光纤的吸收和散射而产生衰减，又因光纤材料和结构上引起的色散影响，导致信号脉冲的失真。这些失真会使传输线路的噪声、误码率增加，且失真程度随距离增加而加剧。因此，为了补偿光信号的衰减，对波形失真的脉冲进行整形，为延长光纤通信距离，必须在传输线路中每隔一定距离设置一个光中继机。

传统的光纤通信系统中，由于无法实现全光通信和有效地光放大也，因此光中继机采用了所谓的背靠背的光-电-光转换方式。光中继机包括光接收、再生判决和光发送部分。

## 图4-31 光中继机组成框图



## 图4-32 光中继机功能框图



## 本章小结

- 光电检测器基本要求
- 光电二极管及雪崩光电二极管的工作原理
- 光接收机噪声和误码率
- 灵敏度和动态范围
- 影响灵敏度的主要因素