

Sistemas de comunicação óptica

Terceira parte
Receptores Ópticos

Receptores Ópticos

- Fotodiodos.

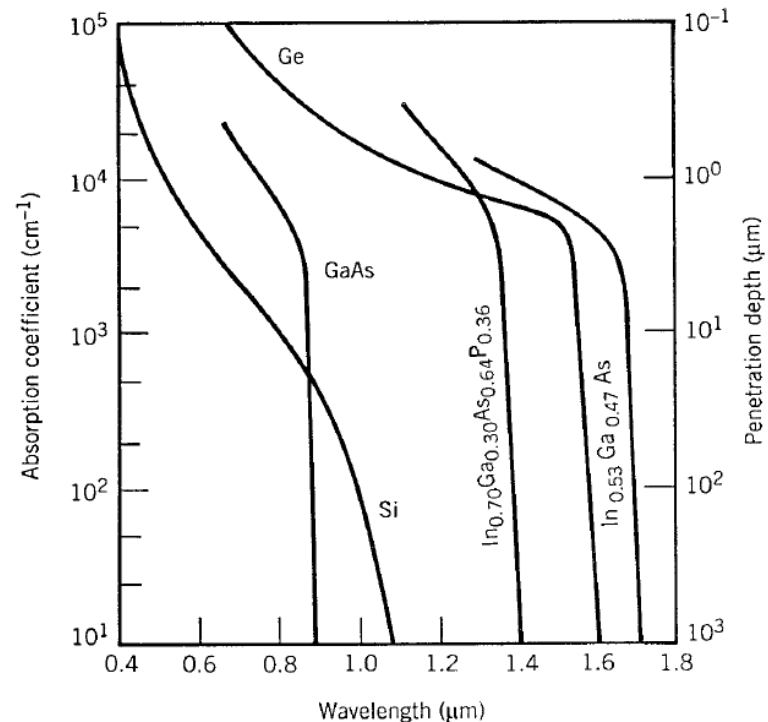
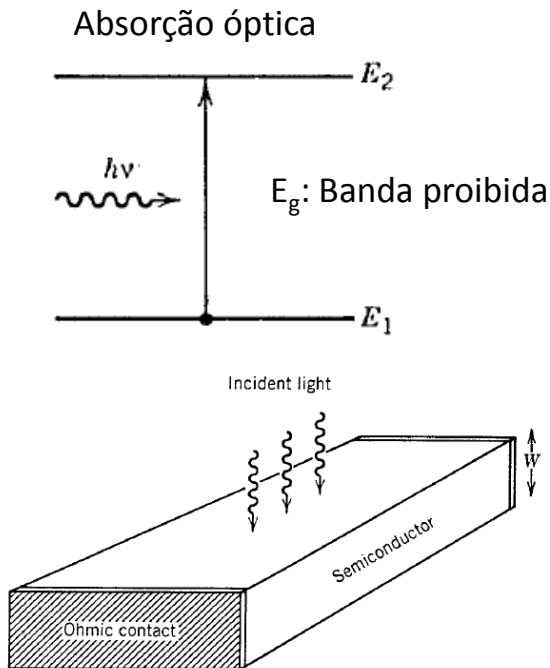
Fotodiodos PN

Fotodiodos PIN

Fotodiodos de avalanche (APD)

Dispositivos tipo SAM (separated absorption-multiplications regions)

Dispositivos tipo SAGM (separated absorption-grade-multiplication regions)



Espectro de absorção de vários semicondutores

Receptores Ópticos

Conceitos básicos

Foto corrente gerada:

$$I_p = R P_{in}$$

Responsividade (A/W)

Potência óptica incidente

Eficiência quântica:

$$\eta = \frac{\text{taxa de elétrons gerados}}{\text{taxa de fótons incidentes}} = \frac{I_p / q}{P_{in} / h\nu}$$

Responsividade:

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

Potência transmitida através da camada ativa do dispositivo: $P_{tr} = \exp(-\alpha W) P_{in}$

Potência absorvida na camada ativa do dispositivo: $P_{abs} = P_{in} - P_{tr} = [1 - \exp(-\alpha W)] P_{in}$

Eficiência quântica: $\eta = P_{abs} / P_{in} = 1 - \exp(-\alpha W)$

Em vários semicondutores: $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow \eta \cong 100 \% \Leftarrow W = 10 \text{ } \mu\text{m}$

Receptores Ópticos

Conceitos básicos

Tempo de subida e largura da banda

Semelhante ao de um circuito RC
Tempo de subida:

$$T_r = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC})$$

Tempo de trânsito pela camada ativa

Constante de tempo associada a
elementos resistivos e capacitivos do
sistema

Semelhante ao de um circuito RC
Largura de banda:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$$

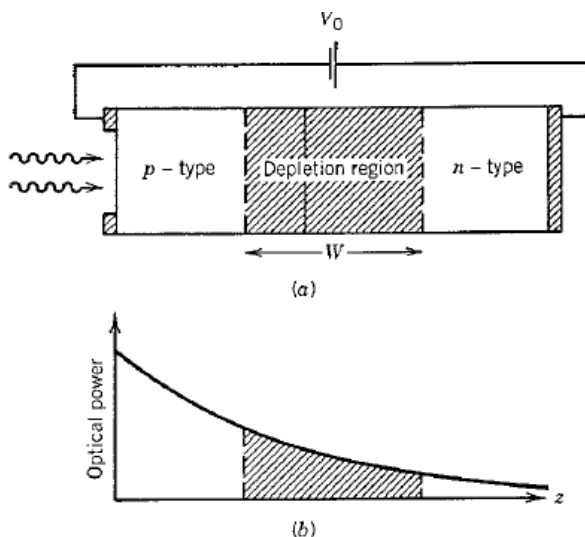
$$\tau_{tr} = \tau_{RC} = 100 \text{ ps} \Rightarrow 1 \text{ GHz}$$

Corrente escura: $I_d < 10 \text{ nA}$ (um bom fotodetector)

Receptores Ópticos

Fotodiodos P-N

$$R \cong 1 \text{ A/W}$$



Perfil da potência óptica através do dispositivo

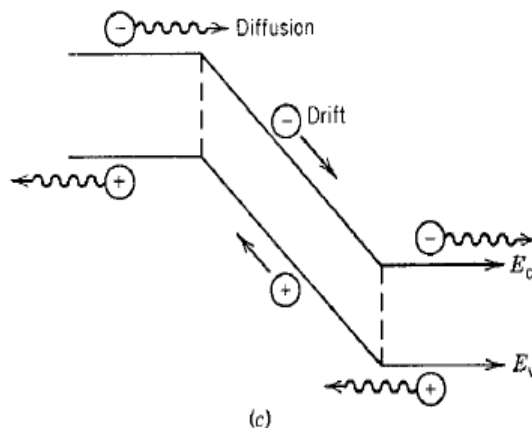
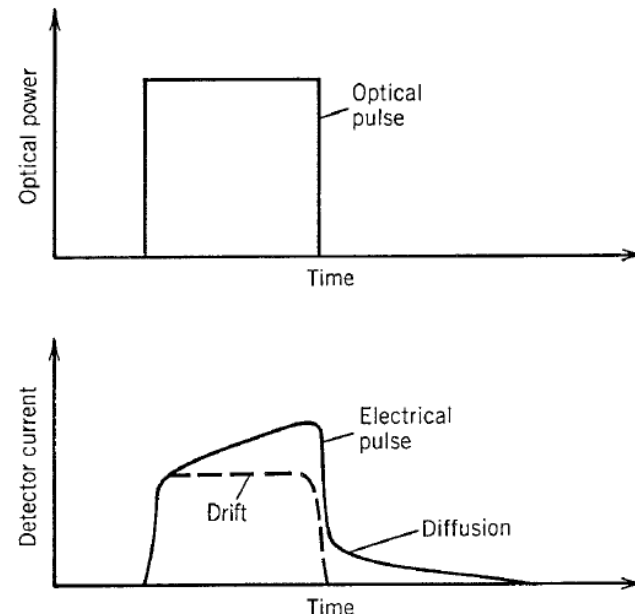


Diagrama de bandas de energia junção P-N inversamente polarizada



Perfil da potência incidente e da foto corrente no dispositivo P-N.

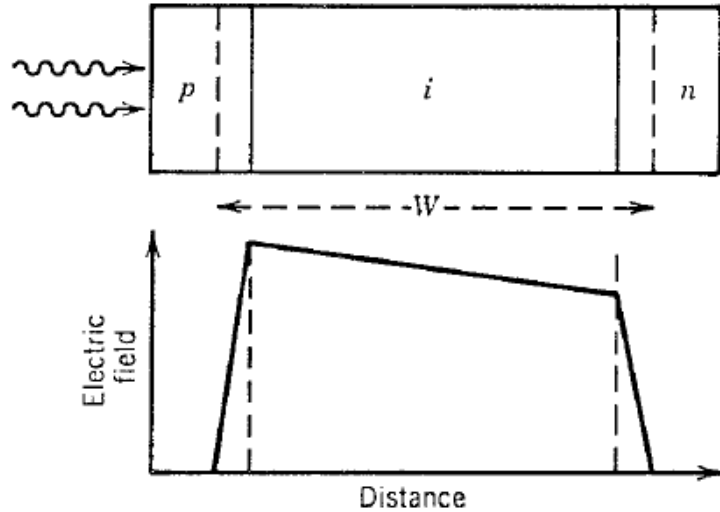
$$\tau_{tr} = W/v_d \rightarrow \begin{cases} \bullet W = 10 \mu\text{m} \\ \bullet v_d = 10^5 \text{ m/s} \end{cases} \rightarrow \tau_{tr} = 100 \text{ ps}$$

Diodos P-N: $\tau_{RC} = 100 \text{ ps}$ $\rightarrow f_c = 1,6 \text{ GHz}$

Dispositivos P-N modernos:
 $f_c = 40 \text{ GHz}$

Receptores Ópticos

Fotodiodos P-I-N



Perfil do campo elétrico da junção P-I-N

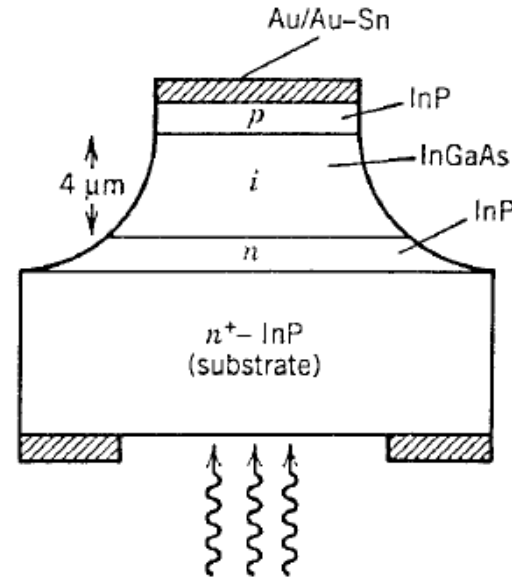


Diagrama esquemático do dispositivo P-I-N

- Dispositivos de Si e Ge: $\longrightarrow$ Para $w = 20\text{-}50\ \mu\text{m}$, $\tau_{\text{tr}} > 200\ \text{ps}$
- Dispositivos de InGaAs: $\longrightarrow$ $w = 2\text{-}5\ \mu\text{m}$, $\tau_{\text{tr}} \cong 10\ \text{ps}$ $\longrightarrow$ $f_c = 10\ \text{GHz}$

Receptores Ópticos

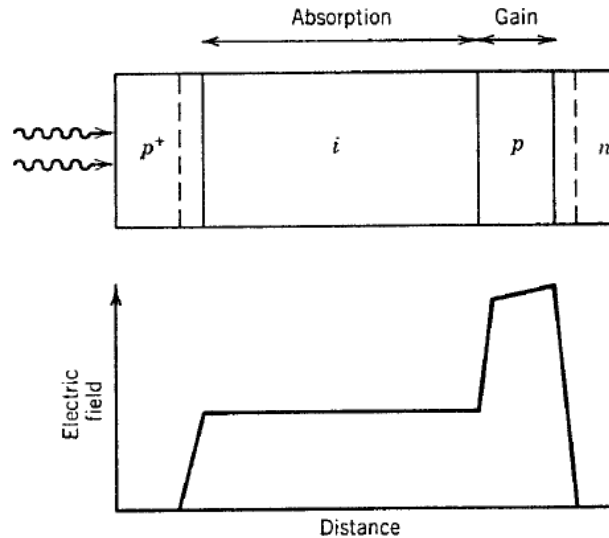
Fotodiodos P-I-N

Características de fotodiodos tipo P-I-N

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Quantum efficiency	η	%	75–90	50–55	60–70
Dark current	I_d	nA	1–10	50–500	1–20
Rise time	T_r	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	V_b	V	50–100	6–10	5–6

Receptores Ópticos

Fotodiodos de Avalanche (APD)



Perfil do campo elétrico do fotodiodo de avalanche

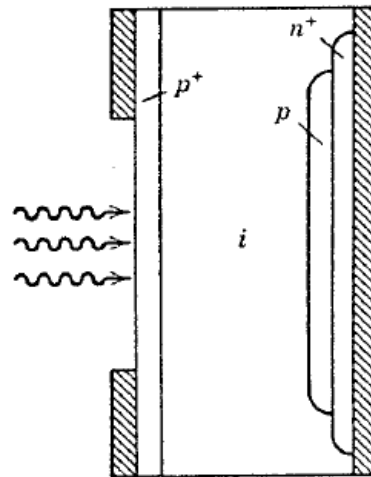
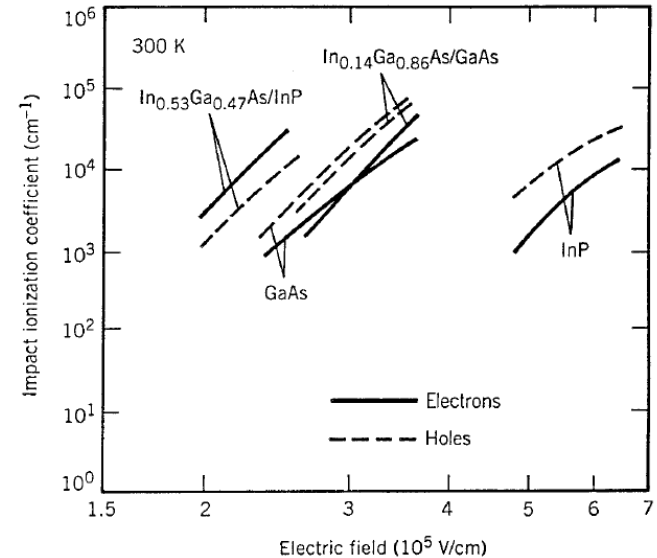


Diagrama esquemático do fotodiodo de avalanche



Coeficientes de ionização de impacto de lacunas e elétrons para vários semicondutores

Equação do ganho de corrente devido à avalanche

$$\begin{aligned} \frac{di_e}{dx} &= \alpha_e i_e + \alpha_h i_h \\ -\frac{di_h}{dx} &= \alpha_e i_e + \alpha_h i_h \end{aligned}$$

α_e : coeficientes de ionização por impacto de elétrons

α_h : coeficientes de ionização por impacto lacunas

Corrente total através do dispositivo

$$I = i_e(x) + i_h(x)$$

Receptores Ópticos

Fotodiodos de Avalanche (APD)

Fator de multiplicação (M): A melhor condição quando um dos coeficiente de ionização é dominante

$$M = i_e(d)/i_e(0)$$



$$M = \frac{1 - k_A}{\exp[-(1 - k_A)\alpha_e d] - k_A}$$

Onde:

$$\alpha_e > \alpha_h$$

$$k_A = \alpha_h / \alpha_e$$

Intensificação da responsividade:


$$R_{APD} = MR = M(\eta q / h\nu)$$

Problemas dos dispositivos APD:

- Dispositivos com ruídos intrínsecos , o ganho flutua significativamente
- A largura de banda depende do ganho “M” já que: $\tau_{tr} = \tau_{tr(i)} + \tau_{tr(s)}$

- Em geral o fator de multiplicação depende da frequência:

$$M(\omega) = M_0 [1 + (\omega \tau_e M_0)^2]^{-1/2}$$

Onde:

M_0 : ganho em frequência baixa
 τ_e : tempo de transito efetivo

Receptores Ópticos

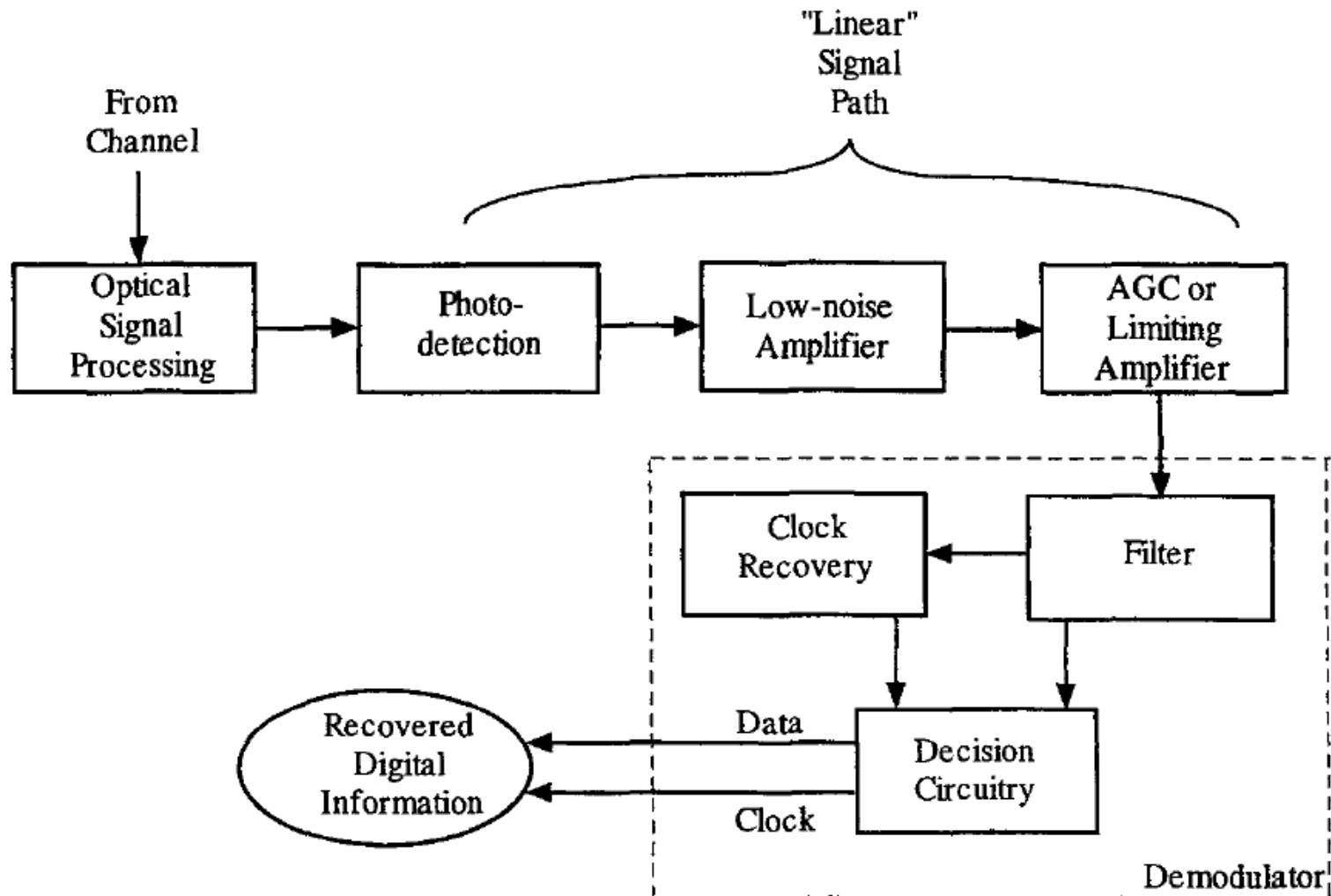
Fotodiodos de Avalanche (APD)

Características de dispositivos APDs convencionais

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R_{APD}	A/W	80–130	3–30	5–20
APD gain	M	—	100–500	50–200	10–40
k -factor	k_A	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Dark current	I_d	nA	0.1–1	50–500	1–5
Rise time	T_r	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.2–1	0.4–0.7	1–10
Bias voltage	V_b	V	200–250	20–40	20–30

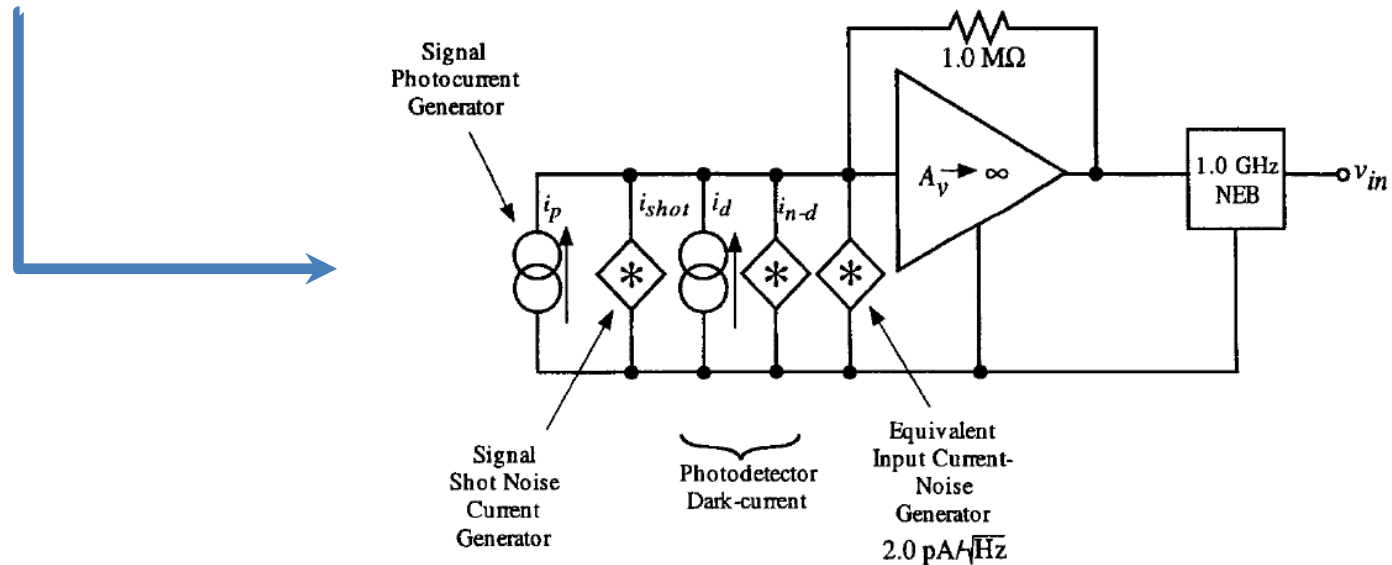
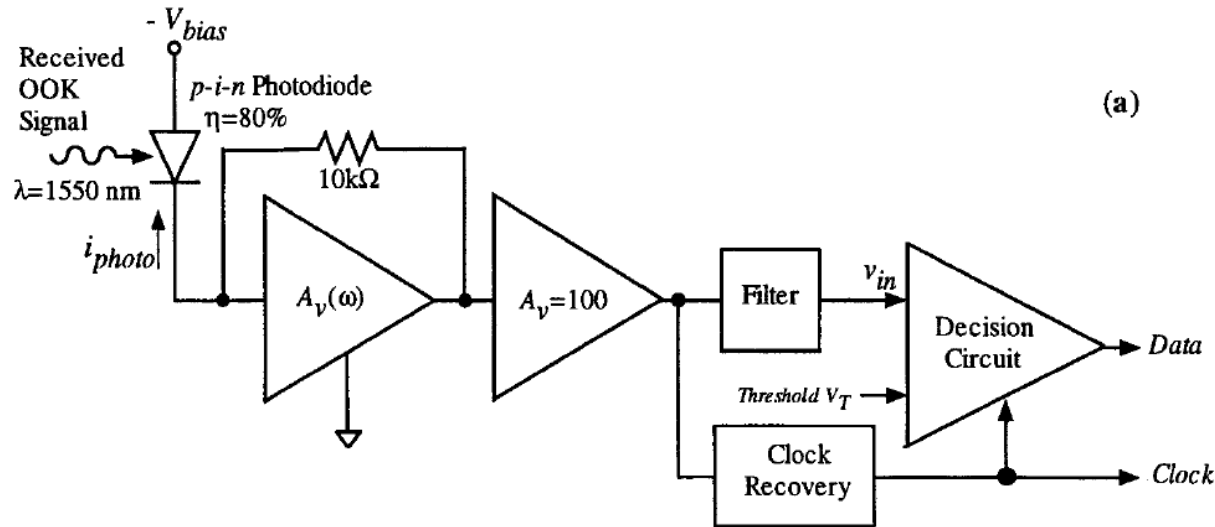
Representação Frontal dos Receptores Ópticos

“Front-End”



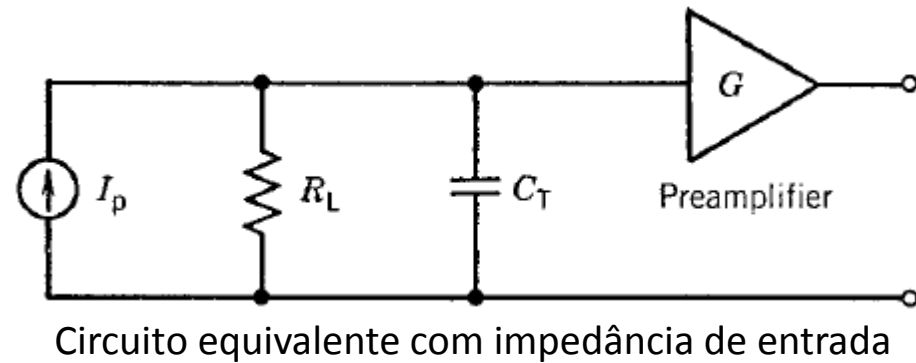
Representação Frontal dos Receptores Ópticos

“Front-End”

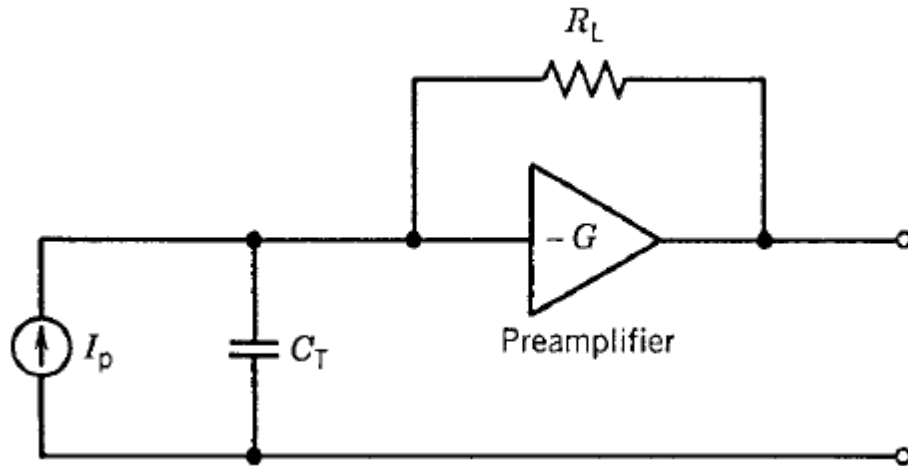


Representação Frontal dos Receptores Ópticos

“Front-End”



- Ganho elevado para R_L elevado
- R_L alto largura de banda estreita



- Ganho elevado para R_L elevado
- Retroalimentação negativa
- Impedância de entrada reduzida em G vezes
- Largura de banda elevada

Representação Frontal dos Receptores Ópticos

Modelo linear

A restrição do projeto é minimizar a interferência entre bits próximos (ISI)

Tensão de saída do sinal recuperado: $V_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} z_T(t-t')I_p(t') dt'$



Transformada de Fourier

$$\tilde{V}_{\text{out}}(\omega) = Z_T(\omega)\tilde{I}_p(\omega)$$



Impedância considerando todos os estágios

$$Z_T(\omega) = G_p(\omega)G_A(\omega)H_F(\omega)/Y_{\text{in}}(\omega)$$



Função de transferência do receptor

$$H_{\text{out}}(\omega) = H_T(\omega)H_p(\omega)$$



Considerando a frequência de corte do filtro como sendo menor que dos outros estágios

$$H_{\text{out}}(f) = \begin{cases} \frac{1}{2}[1 + \cos(\pi f/B)], & f < B \\ 0, & f \geq B \end{cases}$$



Transformada inversa de Fourier

Instantes do toma de decisão
 $t = m/B$

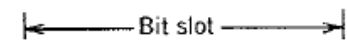


$$h_{\text{out}}(t) = \frac{\sin(2\pi Bt)}{2\pi Bt} \frac{1}{1 - (2Bt)^2}$$

Diagrama do Olho para Analisar o desempenho do Sistema de Comunicação Óptica



Caso ideal



Experimental



Decision
Sample
Times

Receptores Ópticos

Ruído nos Receptores P-I-N

Ruído Shot

Flutuação da fotocorrente:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(t) = I_p + i_s(t) \\ \sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} \text{RMS da corrente do ruído shot} \\ \Delta f: \text{largura de banda do ruído shot} \end{array}$$

Ruído Térmico

Flutuação da fotocorrente:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t) \\ \sigma_T^2 = (4k_B T / R_L) F_n \Delta f \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} \text{RMS da corrente do ruído térmico} \\ \Delta f: \text{largura de banda do ruído térmico} \\ F_n: \text{ruído do amplificador} \end{array}$$

Contribuição de ambos sinais de ruído na flutuação da fotocorrente

$$\Delta I = I - I_p = i_s(t) + i_T(t)$$
$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4k_B T / R_L) F_n \Delta f$$

Indicador de desempenho dos receptores ópticos Razão sinal ruído (SNR)

$$SNR = \frac{\text{potência média do sinal óptico}}{\text{potência do ruído}} = \frac{I_P^2}{\sigma^2}$$

$$SNR = \frac{R^2 P_{in}^2}{2q(RP_{in} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L)F_n \Delta f}$$

No limite do ruído térmico

$$SNR = \frac{R_L R^2 P_{in}^2}{4k_B T F_n \Delta f}$$

Potência equivalente de ruído (NEP)

$$NEP = \frac{P_{in}}{\sqrt{\Delta f}} = \left(\frac{4k_B T F_n}{R_L R^2} \right)^{1/2} = \frac{h\nu}{\eta q} \left(\frac{4k_B T F_n}{R_L} \right)^{1/2}$$

Detetividade: $(NEP)^{-1}$

No limite do ruído shot

$$SNR = \frac{R P_{in}}{2q \Delta f} = \frac{\eta P_{in}}{2h\nu \Delta f}$$

Receptores Ópticos: Fotodiodos de avalanche (APD)

Foto corrente: $I_p = MRP_{in} = R_{APD}P_{in}$



Intensificação do ruído shot:

$$\sigma_s^2 = 2qM^2 F_A (RP_{in} + I_d) \Delta f$$

(F_A : Fator de ruído em excesso)

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M)$$



Razão sinal ruído nos dispositivos APD

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \frac{(MRP_{in})^2}{2qM^2 F_A (RP_{in} + I_d) \Delta f + 4(k_B T / R_L) F_n \Delta f}$$

Limite do ruído térmico

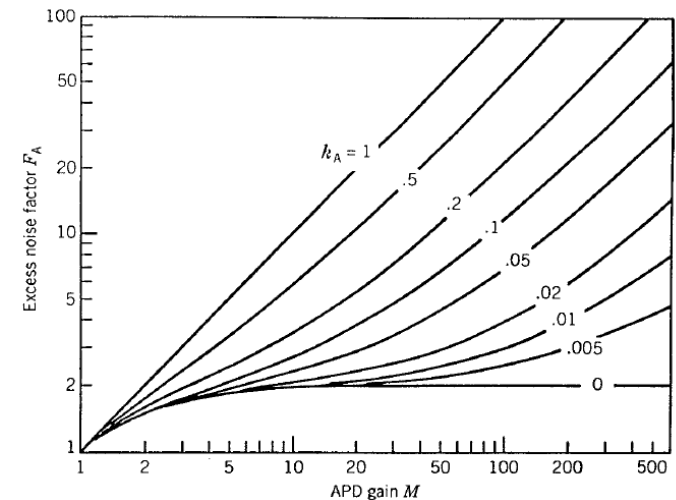
$$SNR = (R_L R^2 / 4k_B T F_n \Delta f) M^2 P_{in}^2$$

Limite do ruído shot

$$SNR = \frac{RP_{in}}{2qF_A \Delta f} = \frac{\eta P_{in}}{2h\nu F_A \Delta f}$$



O fator F_A compromete a razão sinal ruído



Fator do ruído em função do ganho

Sensibilidade dos Receptores Ópticos

Taxa de Erro de Bit (BER)

Probabilidade de erro

$$\text{BER} = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0)$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2}[P(0/1) + P(1/0)]$$

Aproximação Gaussiana para os ruídos térmico e shot

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \left[\text{erfc} \left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \text{erfc} \left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right]$$

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy.$$

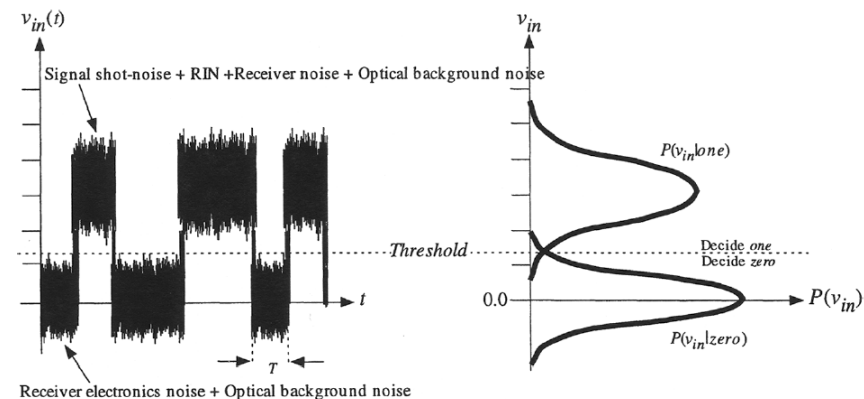
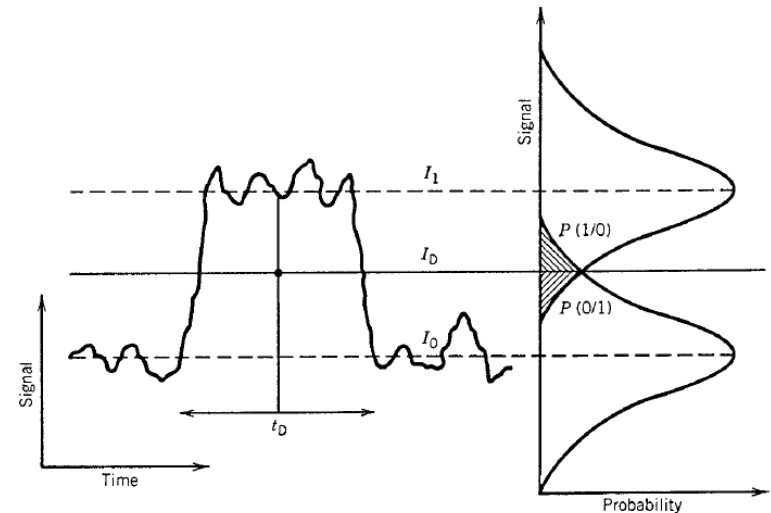
I_1 : foto corrente do estado "1"

I_0 : foto corrente do estado "0"

I_D : foto corrente do estado de decisão

σ_1 : RMS do bit de estado "1"

σ_0 : RMS do bit de estado "0"



Taxa de Erro de Bit (BER)

Condição de otimização do BER em função de I_D

$$\frac{(I_D - I_0)^2}{2\sigma_0^2} = \frac{(I_1 - I_D)^2}{2\sigma_1^2} + \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)$$

↓ Considerando $\sigma_0 \cong \sigma_1$

$$(I_D - I_0)/\sigma_0 = (I_1 - I_D)/\sigma_1 \equiv Q$$

↓ Nível otimizado da corrente de decisão

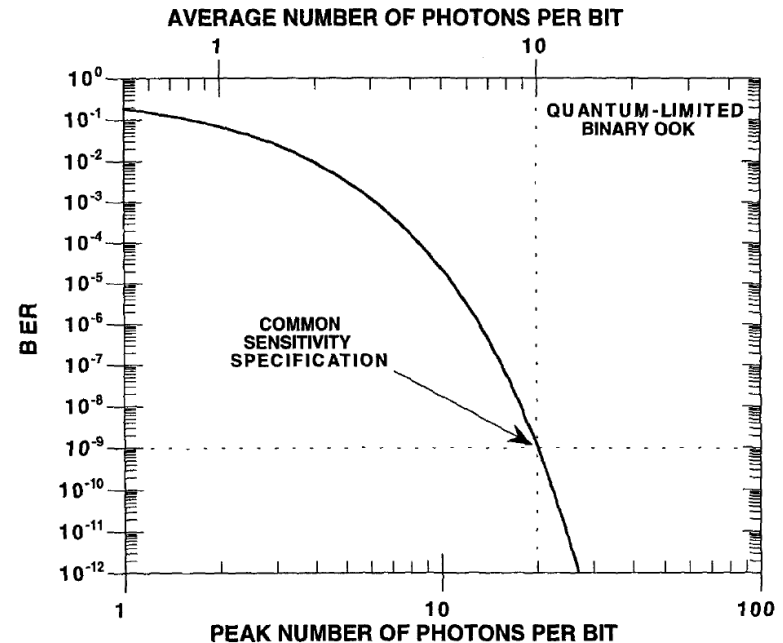
$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$



$$\text{BER} = 10^{-9} \text{ para } Q=6$$



Resumo das características de foto detectores

	<i>Si PIN</i>	<i>Si APD</i>	<i>Ge APD</i>	<i>InGaAs PIN</i>	<i>InGaAs APD</i>
Useful λ Region (nm)	400 - 1150 nm	400 - 1150 nm	800 - 1750 nm	900 - 1700 nm	900 - 1700 nm
QE	60 - 90%	70 - 80%	50 - 80%	70 - 90%	60 - 90%
Gain	1	50 - 300	10 - 100	1	10 - 40
Carrier Ionization Ratio (k_{eff})	-	0.01 - 0.10	0.6 - 0.9	-	0.2 - 0.5
Unmultiplied Dark-current (nA)	1 nA	0.1 nA	1 - 50 nA	1 - 10 nA	0.5 - 5 nA
Multiplied Dark-current (nA)	-	0.1 - 1.0 nA	5 - 100 nA	-	0.5 - 5 nA
Detector Capacitance (pF)	1 - 5 pF	1 - 5 pF	1 - 5 pF	0.2 - 2 pF	0.2 - 2 pF
Response Time (ns)	0.3 - 3 ns	0.5 - 5 ns	0.3 - 3 ns	0.05 - 1 ns	0.1 - 1 ns