

# Fotodetectores

## - Características desejáveis -

- Elevada sensibilidade para os comprimentos de onda de interesse, i.e os utilizados pelo laser;
- Largura de banda e tempos de resposta adequados aos ritmos binários usados;
- Introdução de pouco ruído;
- Fraca sensibilidade a variações de temperatura;
- Acoplamento fácil à fibra;
- Tempos de vida médio longos;
- Custo.



Fotodíodos de semicondutor:

- PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*)
- APD (*Avalanche Photo-Diodes*)

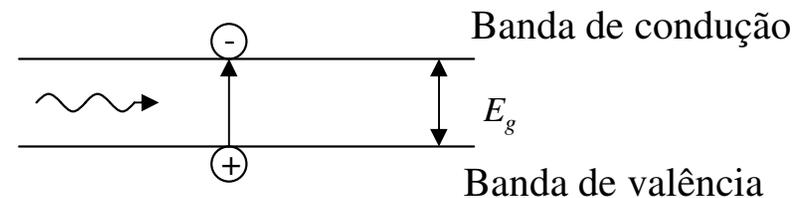
Díodos com  
polarização inversa

## O processo de fotodeteccção e os materiais utilizados

- No processo de fotodeteccção os fotões absorvidos pelo material semiconductor fazem transitar electrões da banda de valência para a de condução desde que o comprimento de onda seja inferior a um valor crítico.

$$\lambda < \lambda_c = \frac{hc}{E_g}$$

( $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )



- Os valores críticos de alguns materiais são os seguintes:

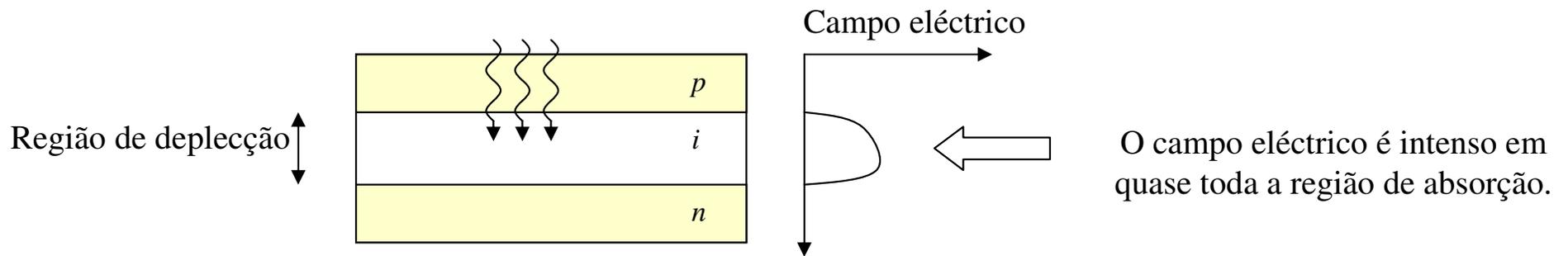
Material	Si	Ge	GaAs	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-x}\text{P}_{1-y}$
$E_g(\text{eV})$	1,1	0,72	1,43	1,43-0,36	1,35-0,36
$\lambda_c(\mu\text{m})$	1,1	1,7	0,87	0,87-3,44	0,92-3,44

1ª janela

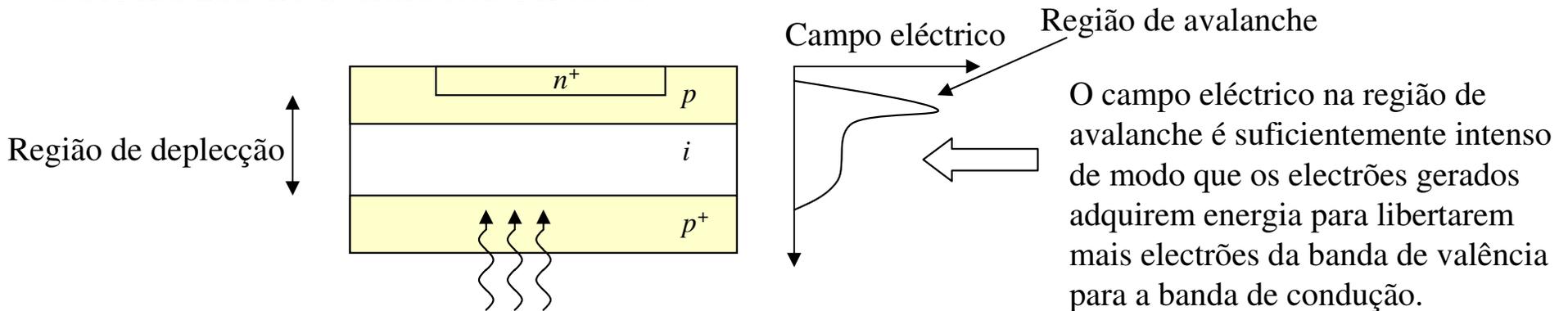
# Estrutura dos fotodetectores

- **Fotodíodos PIN**

- são baseados numa junção  $pn$  com material intrínseco  $i$  colocado entre os dois tipos de semicondutor. A junção é polarizada inversamente.

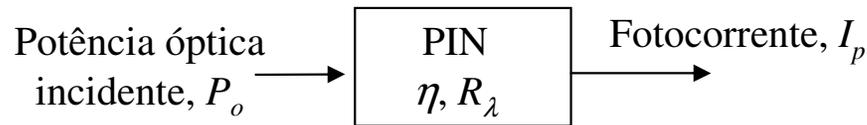


- **Fotodíodos de avalanche ou APD**



# Caracterização dos fotodetectores

- Num fotodíodo ideal por cada fóton incidente na região de absorção seria originado um par electrão-lacuna na região de deplecção.
  - Num fotodetector **PIN** real a eficiência da conversão  $\eta$  (designada por eficiência quântica) é inferior a 1.



$$\eta = \frac{\text{ritmo de geração de pares electrão - lacuna}}{\text{ritmo dos fótons incidentes}} = \frac{I_p / q}{P_{\text{opt}} / h\nu}$$

Vantagem em trabalhar na 2ª e na 3ª janela ( $\lambda$  superior)! (Mas isto só é válido até um limite em que a energia do fóton já não é suficiente)

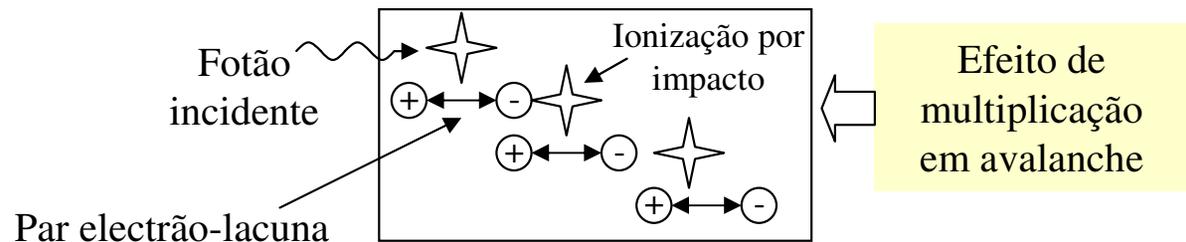
$$\text{Respostividade (A/W)} \Rightarrow R_\lambda = \frac{I_p}{P_{\text{opt}}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \eta \frac{\lambda_{[\mu\text{m}]}}{1,24}$$

- Num fotodetector **APD** o processo de multiplicação por avalanche é caracterizado por um ganho  $m(t)$  aleatório com valor médio  $M$ .

Corrente média no APD :

$$I_M = M I_p = R_\lambda M P_{\text{opt}}$$

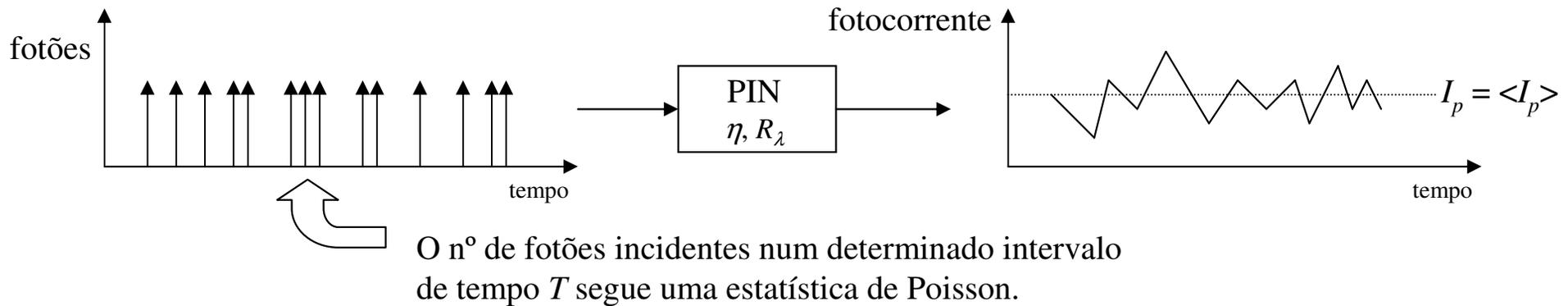
$M$  é um ganho médio pois o fenómeno de avalanche é aleatório!



# Ruído associado ao processo de fotodeteccção

## - Ruído quântico -

- A um feixe de luz com potência  $P_{\text{ópt}}$  corresponde a um fluxo médio de  $P_{\text{ópt}}/h\nu$  fótons por segundo. Porém o número de fótons incidentes num fotodetector num determinado intervalo de tempo é uma grandeza aleatória.



- A fotocorrente gerada aos terminais do fotodetector apresenta uma componente média  $I_p$  à qual aparece sobreposta uma componente aleatória  $i_q(t)$ , designada por **ruído quântico** (*shot noise*):

$$\text{PIN: } i(t) = I_p + i_q(t) = R_\lambda P_{\text{ópt}} + i_q(t)$$

$$\text{APD: } i(t) = MI_p + i_q(t) = R_\lambda MP_{\text{ópt}} + i_q(t)$$

Ruído próprio dos sistemas de comunicação óptica

## Ruído associado ao processo de fotodetecção (cont.)

Pela definição de factor de ruído

$$F(M) = \frac{\left( \frac{S_i}{n_i} \right)}{\left( \frac{S_o}{n_o} \right)} = \frac{\left( \frac{\overline{i_p^2}}{\sigma_{q,p}^2} \right)}{\left( \frac{M^2 \overline{i_p^2}}{\sigma_q^2} \right)} \longrightarrow \sigma_q^2 = F(M) M^2 \sigma_{q,p}^2 = 2qR_\lambda P_{\text{ópt}} F(M) M^2 B_{e,n}$$

Variância (= potência) da foto-corrente primária:

$$\sigma_{q,p}^2 = 2qR_\lambda P_{\text{ópt}} B_{e,n}$$

Assim, a densidade espectral de potência unilateral do ruído quântico é dada por

$$\text{PIN : } \frac{d \langle i_q^2 \rangle}{df} = 2qI_p = 2qR_\lambda P_{\text{ópt}}$$

$$\text{APD : } \frac{d \langle i_q^2 \rangle}{df} = 2qM^2 F(M) I_p = 2qM^2 F(M) R_\lambda P_{\text{ópt}}$$

O ruído depende da potência óptica do sinal recebido!

# Receptores ópticos

## Parâmetros importantes:

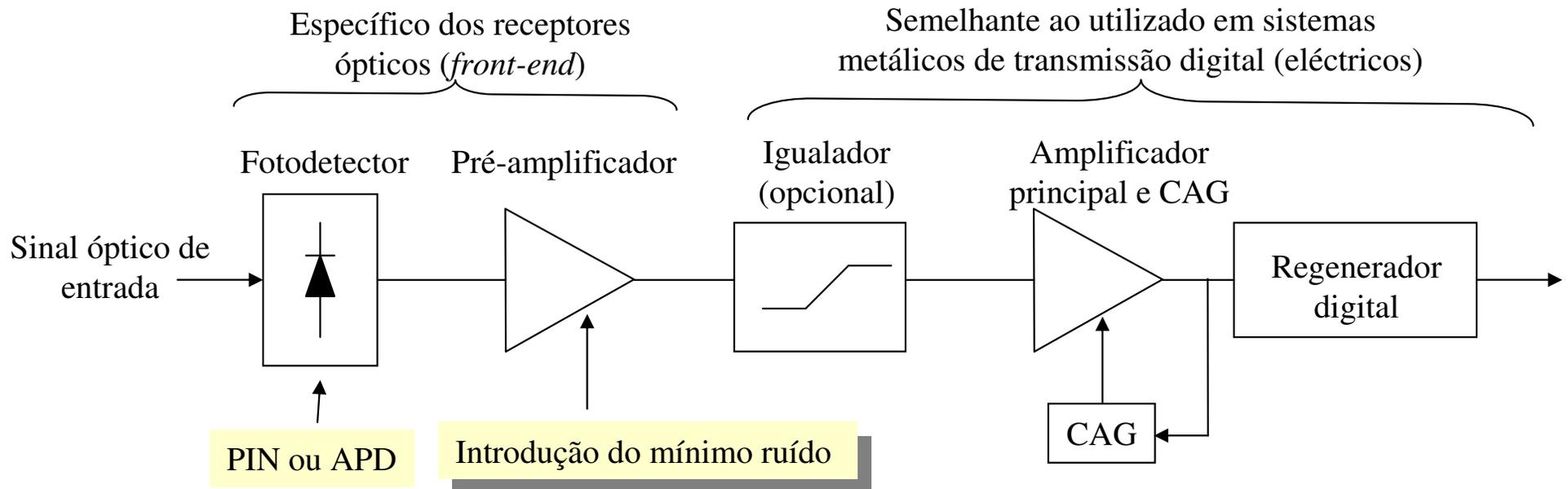
Largura de banda; Sensibilidade; Gama dinâmica; Custo.

$$\text{Factor de ruído num APD: } f(M) \approx M^x$$

(Válido para para o PIN fazendo  $M=1$ )

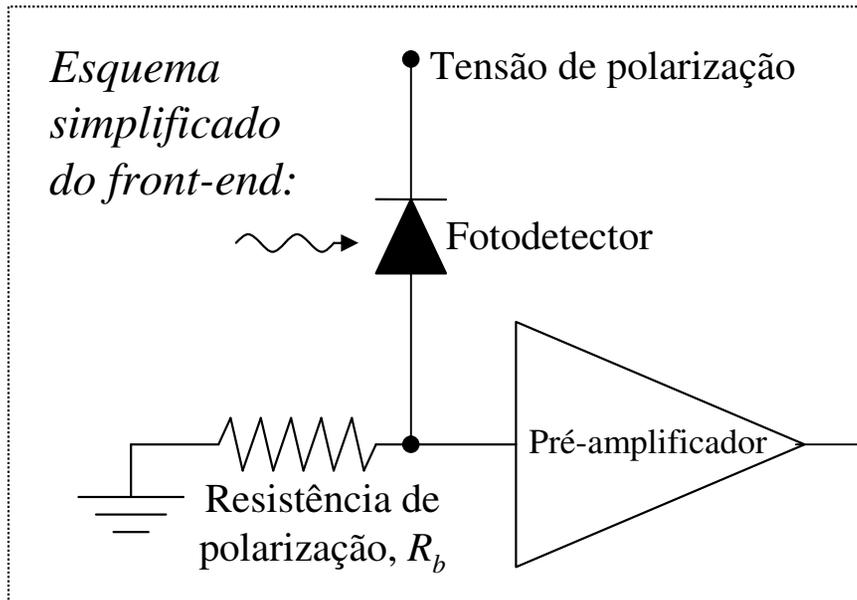
$x = 0.3 - 0.5$ (Si)
$x = 0.5 - 0.8$ (InGaAs)
$x = 1$ (Ge)

- Diagrama de blocos de um receptor óptico para um sistema de transmissão digital com detecção directa:



# Ruído associado ao circuito eléctrico do receptor

## - Ruído de circuito -



Corrente de ruído quântico

Corrente de ruído de circuito

$$i_n(t) = i_q(t) + i_c(t)$$

$$i(t) = I_p + i_n(t) = R_\lambda P_{\text{ópt}} + i_n(t)$$

- Valor quadrático médio do ruído de circuito na resistência  $R_b$ :  $\langle i_c^2 \rangle = \frac{4K_B T}{R_b} B$
  - Densidade espectral de potência de ruído de circuito:  $\frac{d \langle i_c^2 \rangle}{df} = \frac{4K_B T}{R_b} \text{ [A}^2 \text{ / Hz]}$
  - Raíz da densidade espectral de potência do ruído da corrente de circuito:  $\sqrt{\frac{d \langle i_c^2 \rangle}{df}} \text{ [A / } \sqrt{\text{Hz}} \text{]}$
- $T$ : temperatura em K
  - $K_B$ : constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
  - $B$ : largura de banda do receptor

# PIN versus APD

## **Vantagens do APD vs PIN:**

- ✓ Existência de uma ganho elevado na conversão óptico-eléctrica.

## **Desvantagens do APD vs PIN:**

- ❖ A limitação do desempenho pode dar-se pelo ruído quântico. (No PIN este é desprezável sendo a limitação geralmente imposta pelo ruído de circuito.)
- ❖ Estrutura mais complexa (necessita da estrutura onde ocorre a multiplicação em avalanche). → Mais caro
- ❖ O desempenho fica limitado pelo ruído de circuito e não pelo ruído quântico.
- ❖ Sensibilidade elevada das suas propriedades (como o ganho) à temperatura
- ❖ Menor fiabilidade
- ❖ Requer tensões de polarização muito superiores (para garantir a multiplicação em avalanche)

# Tipos de pré-amplificadores

**A. Baixa-impedância** (Resistência de polarização,  $R_b$ , de baixo valor:  $\approx 50 \Omega$ ):

- largura de banda elevada;
- ruído elevado;
- utilização para distâncias curtas.

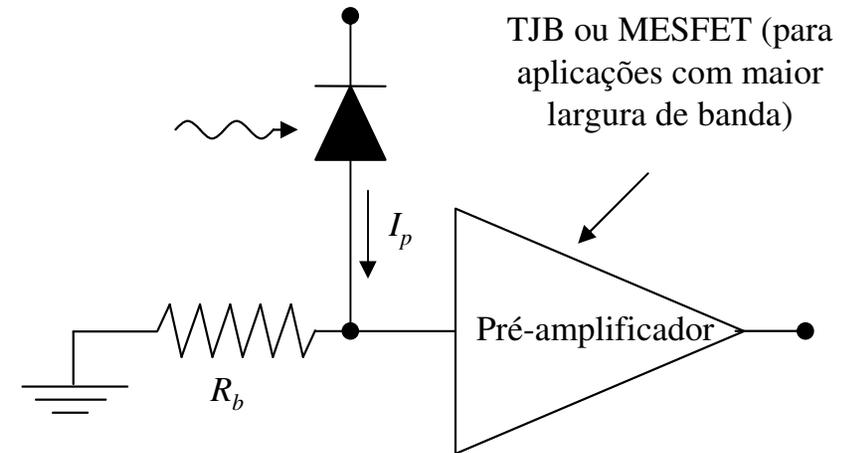
**B. Alta-impedância** ( $R_b$  elevada: ordem do  $k\Omega$ ):

- largura de banda baixa;
- ruído reduzido;
- necessidade de igualação para sinais de elevada largura de banda.

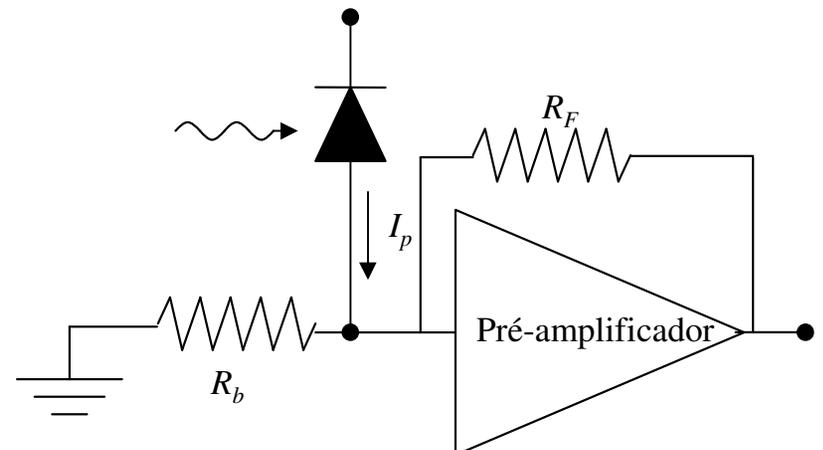
**C. Transimpedância:**

- resolve o problema da reduzida largura de banda do pré-amplificador de alta-impedância;
- instabilidade para algumas frequências.

*Esquema (simplificado)  
para A ou B:*

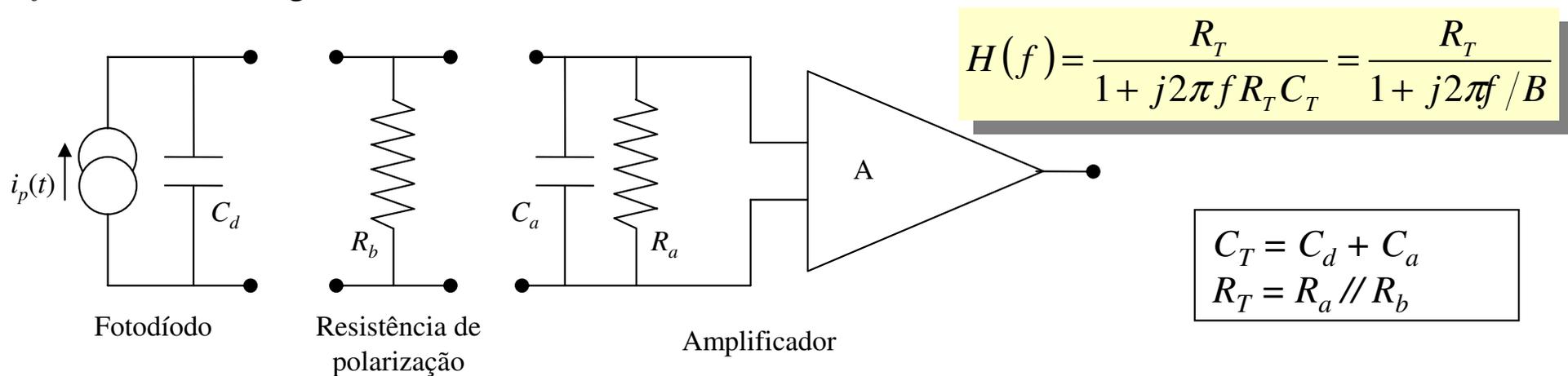


*Esquema (simplificado) de C:*



## Tipos de pré-amplificadores (cont.)

O **circuito equivalente** do conjunto fotodetector + pré-amplificador de baixa/alta-impedância (*front-end*) é o seguinte:



- A largura de banda eléctrica a -3 dB do *front-end* é dada por:

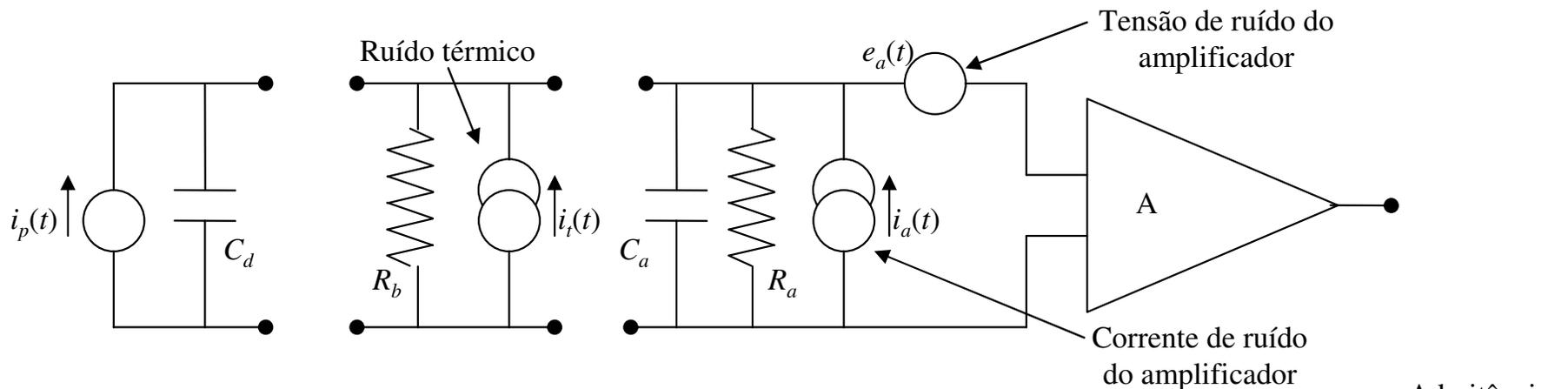
$$B = \frac{1}{2\pi R_T C_T}$$

- Nos pré-amplificadores de transimpedância a largura de banda vem aproximada por:

$$B = \frac{1 + A}{2\pi R_F C_T}$$

# As componentes do ruído de circuito

- As fontes de **ruído de circuito** são:
  - o **ruído térmico** (já visto atrás) dos elementos resistivos ( $R_b$ ) e **fontes adicionais de ruído** devidas aos elementos activos.



- A corrente de ruído de circuito (total) resulta das diferentes contribuições:

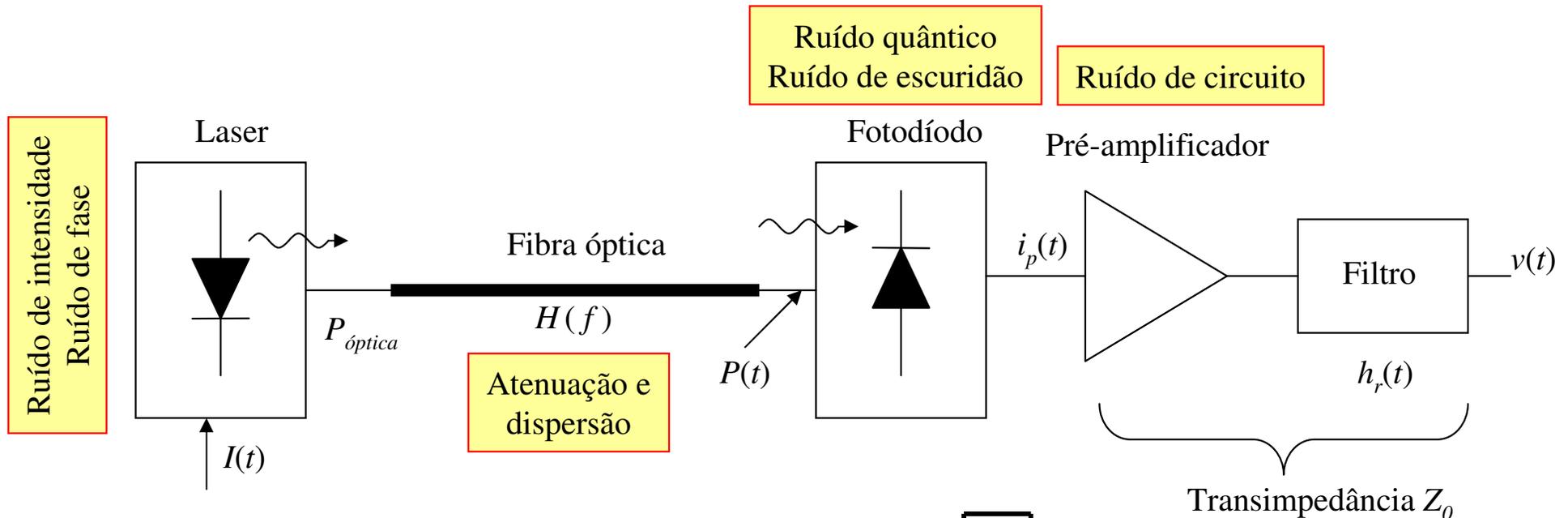
$$i_c(t) = i_t(t) + i_a(t) + y_a(t) * e_a(t) \quad y_a(t) = TF^{-1}(Y_a(f)) \quad Y_a(f) = \frac{1}{R_T} + j2\pi f C_T$$

- A densidade espectral de potência da corrente de ruído (note-se que é colorido) é dada por:

$$\frac{d \langle i_c^2 \rangle}{df} = S_0 + f^2 S_2 \quad S_0 = \frac{d \langle i_t^2 \rangle}{df} + \frac{d \langle i_a^2 \rangle}{df} + \frac{1}{R_T^2} \frac{d \langle e_a^2 \rangle}{df} \quad S_2 = (2\pi C_T^2) \frac{d \langle e_a^2 \rangle}{df}$$

# Princípios da transmissão digital óptica

- Sistema de transmissão digital óptico:



- Razão de extinção:  $r = P_s(0)/P_s(1)$
- O filtro do receptor deverá minimizar a interferência inter-simbólica (IIS).

## Caracterização do sinal recebido

- Admitindo que o fotodíodo é um PIN a corrente na sua saída tem a contribuição do **sinal** e do **ruído quântico**. Essa corrente é dada para o nível lógico 1,  $i_1(t)$ , e para o nível 0,  $i_0(t)$ , por:

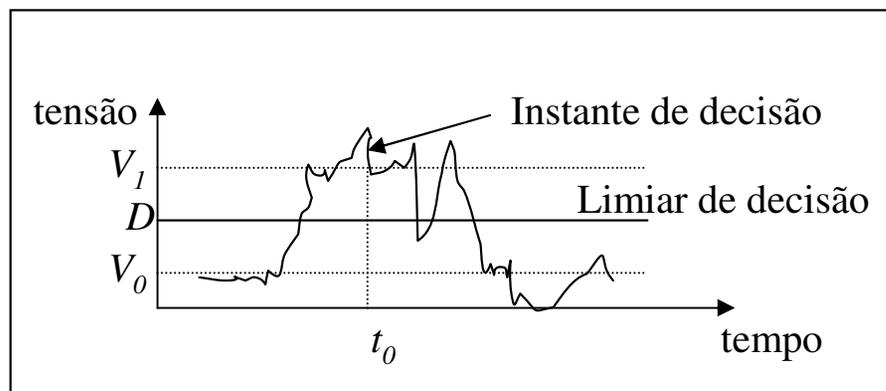
$$i_1(t) = R_\lambda P_r(1) + i_{q1}(t) \quad i_0(t) = R_\lambda P_r(0) + i_{q0}(t)$$

- A tensão na saída do filtro receptor relaciona-se com a corrente na saída do fotodíodo através da transimpedância. O receptor introduz o **ruído de circuito**, logo a tensão na saída do filtro é dada por:

$$v_1(t) = V_1 + n_1(t)$$

Valor médio da  
tensão para o  
nível 1

Tensão de ruído para o  
nível 1



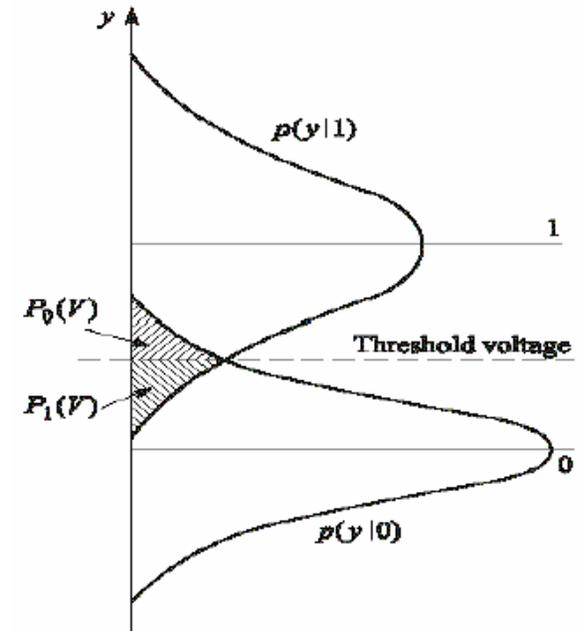
$$v_0(t) = V_0 + n_0(t)$$

Valor médio da  
tensão para o  
nível 0

Tensão de ruído  
para o nível 0

# Estadística do sinal amostrado

- O sinal  $v(t)$  é aplicado à entrada de um regenerador (amostragem + circuito de decisão + recuperação de relógio):
  - $v(t_0) > D \Rightarrow$  símbolo 1;
  - $v(t_0) < D \Rightarrow$  símbolo 0.
- Admite-se que a amostra  $v(t_0)$  tem uma distribuição Gaussiana com média  $V_1$  e variância  $\sigma_1^2 = \langle n_1^2 \rangle$  para o nível lógico 1 e média  $V_0$  e variância  $\sigma_0^2 = \langle n_0^2 \rangle$  para o nível lógico 0.



$$\sigma_1^2 = \overline{n_q^2} |_1 + \overline{n_c^2}$$

$$\sigma_0^2 = \overline{n_q^2} |_0 + \overline{n_c^2}$$

- $r_b$  - ritmo binário;
- $I_2$  e  $I_3$  - integrais de Personick;
- $Z_0$  - transimpedância do receptor.

$$\langle n_q^2 \rangle |_1 = 2Z_0^2 q R_\lambda P_r(1) I_2 r_b$$

$$\langle n_q^2 \rangle |_0 = 2Z_0^2 q R_\lambda P_r(0) I_2 r_b$$

$$\langle n_c^2 \rangle = 2Z_0^2 [S_0 I_2 r_b + S_2 I_3 r_b^3]$$

# Avaliação do desempenho

- A probabilidade média de erro é dada por:

$$P_e = P(1)P_e(0|1) + P(0)P_e(1|0)$$

- Admitindo a equiprobabilidade dos símbolos, obtém-se para a probabilidade média de erro (BER) a seguinte expressão:

$$P_e = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{D - V_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \frac{V_1 - D}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right]$$

$$\operatorname{erfc}(x) \stackrel{\Delta}{=} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda$$

$$= 2Q(\sqrt{2}x)$$

- O limiar de decisão óptimo ( $D_{opt}$ ) que minimiza a BER, corresponde a fazer  $P_e(0|1) = P_e(1|0)$ :

Só aqui se refere à função  $Q(x)$ !

$$\frac{D_{opt} - V_0}{\sigma_0} = \frac{V_1 - D_{opt}}{\sigma_1} = Q \quad \Rightarrow \quad D_{opt} = \frac{\sigma_0 V_1 + \sigma_1 V_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{V_1 - V_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \Rightarrow \quad P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right]$$

# Sensibilidade

Ver [J.Pires, Sec. 6.3.4]

- A **sensibilidade** do receptor,  $P_{\text{opt}}^{(\text{mín})}$ , é definida como a **potência óptica mínima necessária para obter um valor de BER especificado**, normalmente 10<sup>-12</sup> ( $Q \approx 7$ )
- Para um **receptor baseado num fotodíodo PIN** o ruído de circuito é dominante. A sensibilidade do receptor é dada por (para uma razão de extinção  $r = 0$ )

$$P_{\text{opt}}^{(\text{mín})} = \frac{1}{2} P_{\text{opt}} (1) = \frac{Q \sqrt{\langle i_c^2 \rangle}}{R_\lambda} \quad \xrightarrow{\text{Ruído do circuito branco}} \quad P_{\text{opt}}^{(\text{mín})} \propto \sqrt{R_b}$$

- A sensibilidade dum **receptor baseado num fotodíodo APD** ( $r = 0$ ) é dada por

Note-se como a expressão com PIN é um caso particular desta.

$$P_{\text{opt}}^{(\text{mín})} = \frac{Q}{R_\lambda} \left[ \frac{\sqrt{\langle i_c^2 \rangle}}{M} + qQF(M)I_2R_b \right]$$

**Ganho ótimo:** Existe um valor de  $M$  que maximiza a sensibilidade.

- Num **receptor com um PIN e um amplificador ideal** (limitado pelo ruído quântico) a sensibilidade diminui com o aumento do ritmo binário.

Note-se como a expressão é um caso particular da anterior.

$$P_{\text{opt}}^{(\text{mín})} = \frac{qQ^2 I_2 R_b}{R_\lambda}$$

Caso de ruído de circuito desprezável e  $M = 1$  (PIN)

## NOTAS:

- Para o limite quântico deve utilizar-se a estatística de Poisson.
- $R_b$  é o ritmo binário! Não confundir com a resistência no circuito do receptor! Usa-se a mesma notação pois são separáveis no contexto.

## Sensibilidade (cont.)

- Sensibilidade de receptores que operam a 1550 nm (@ BER =  $10^{-12}$ );

ritmo binário	tipo	sensibilidade (dBm)	sobrecarga (dBm)
155 Mbit/s	PIN	-36	-7
622 Mbit/s	PIN	-32	-7
2,5 Gbit/s	APD	-34	-8
10 Gbit/s	PIN	-20	0

- a sobrecarga é o valor máximo da potência óptica de entrada;
- a gama dinâmica é a diferença entre a sobrecarga e a sensibilidade.

