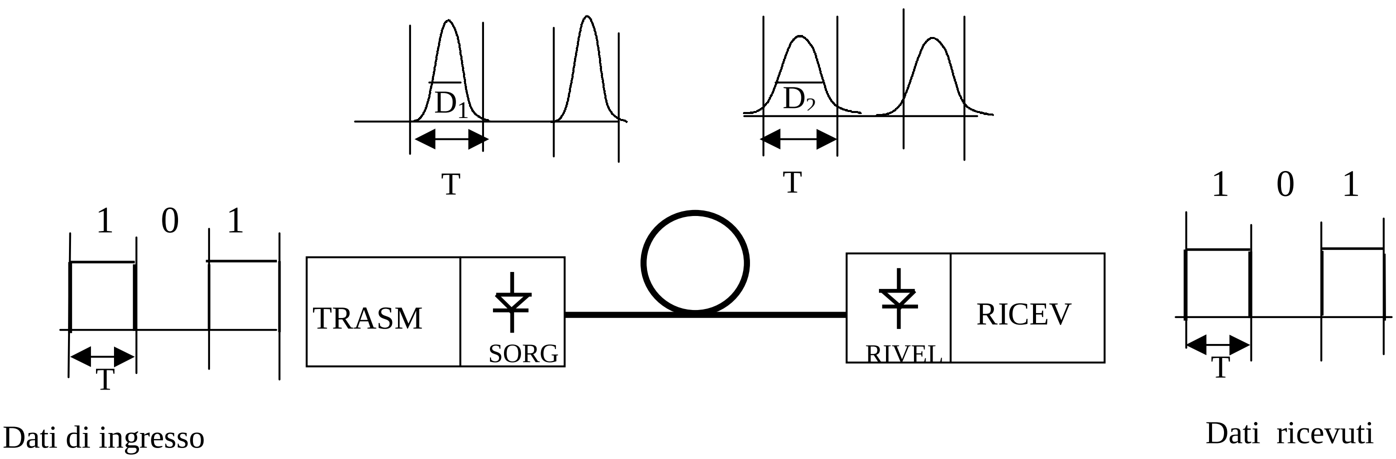
OTTICA TERZA PARTE

SISTEMI a INTENSITA' di MODULAZIONE
e a DEMODULAZIONE DIRETTA (IMDD)

Prof. Elvio Valentinuzzi

SISTEMA A MODULAZIONE DI INTENSITA’ E DEMODULAZIONE DIRETTA (IMDD)

La sequenza numerica comanda l’emissione della potenza di un Laser o di un Led che vengono accesi e spenti ogni T secondi modulando così il fascio ottico nel modo più semplice. In ricezione un fotodiodo riceve la potenza ottica e genera impulsi di corrente.
Gli impulsi indicati rappresentano l’andamento della potenza della portante ottica negli intervalli di tempo T.



I principali elementi di progetto del sistema sono

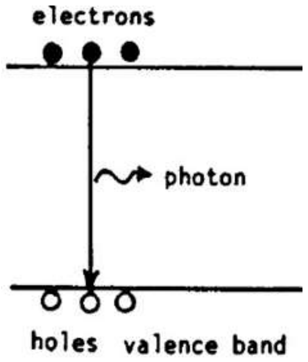
- La velocità di trasmissione (bit rate)
- La lunghezza del collegamento

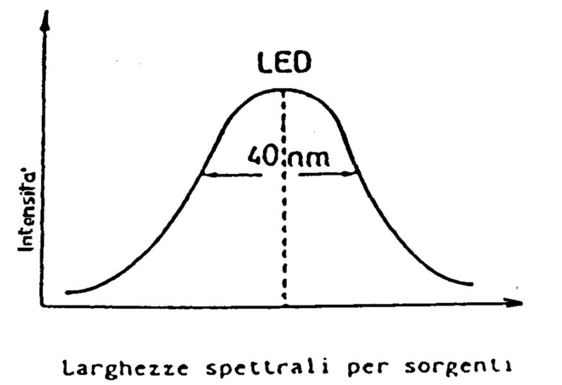
Da essi dipende la scelta dei componenti del sistema e le loro caratteristiche

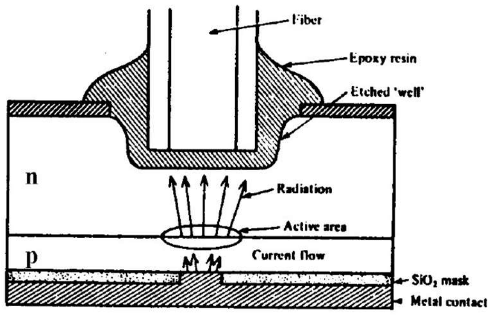
- Finestra ottica
- Tipo di sorgente
- Tipo di fibra
- Tipo di rivelatore (fotodiodo)
- Caratteristica del ricevitore

SORGENTI OTTICHE

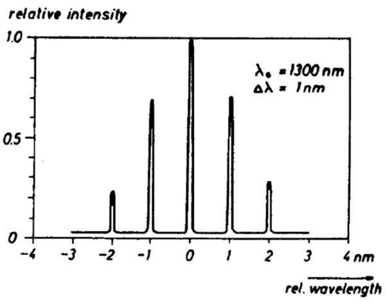
Le sorgenti più economiche sono i **LED** (Light Emitting Diodes)
Quando sono percorsi da una corrente diretta gli elettroni della banda di conduzione possono passano nella banda di valenza, ricombinandosi con le lacune. La differenza di energia fra i due livelli viene emessa come quanti di luce o fotoni

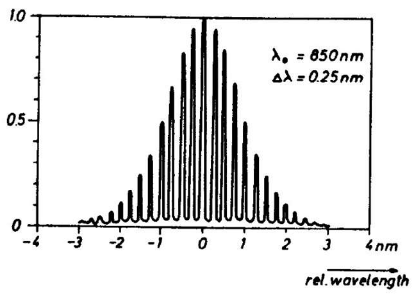


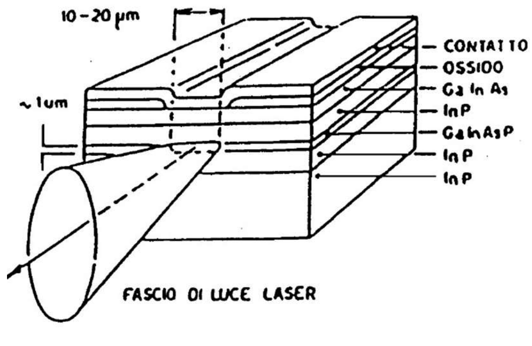




Se l'emissione è stimolata ho il **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)







I Laser generano modi longitudinali. Lo spettro di emissione è composto da più modi (linee)
Con particolari accorgimenti si ottengono laser monomodo (Distributed Feedback).

Una caratteristica dei Laser è la coerenza della radiazione emessa: si ha coerenza temporale se la fase delle onde è stabile nel tempo e coerenza spaziale se le onde hanno la stessa fase in tutti punti della sezione del fascio

La larghezza di banda di modulazione dei Laser è molto maggiore di quella dei LED (150MHz) e arriva ad acuni GHz
La larghezza di banda di emissione si riduce ad alcuni nm .

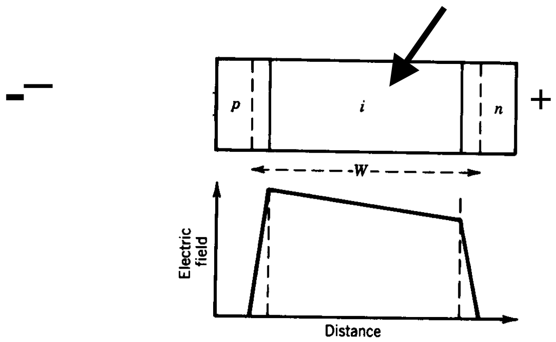
FOTODIODI

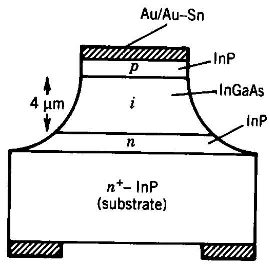
Si usano come rivelatori del segnale ottico due tipi di dispositivi

- Diodi PIN (Positive-   Intrinsic- Negative)
- Diodi APD (Avalanche Photodiodes)

FOTODIODO PIN (p-i-n)

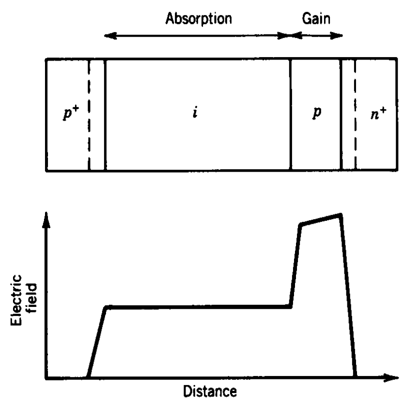
E’ un diodo polarizzato inversamente con una zona intrinseca fra quelle drogate p e n. La radiazione ottica entra da una finestra sulla zona intrinseca e se l’energia è sufficiente, fa passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione.

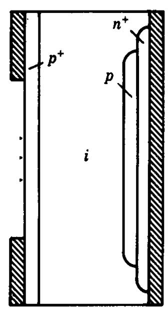




FOTODIODO   A VALANGA

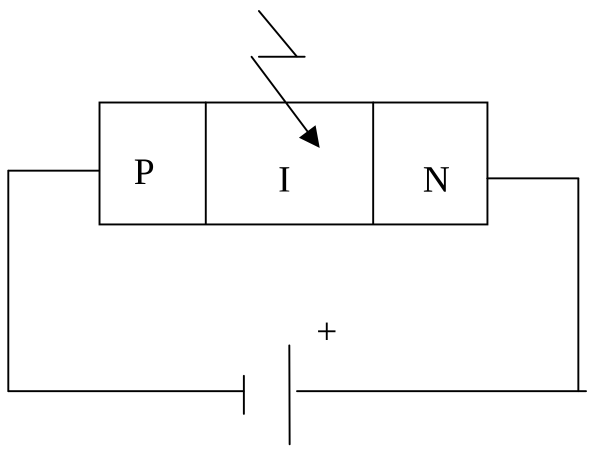
Polarizzando inversamente il diodo si stabilisce nella zona i-p-n un forte campo elettrico che causa la ionizzazione a impatto. Lavorando vicino alla tensione di breakdown della giunzione p-n.i portatori generano altri portatori dando origine a una moltiplicazione di cariche. Si genera tuttavia un rumore interno legato al processo di moltiplicazione.





FOTODIODI

La fotorivelazione è basata sull'effetto fotoelettrico .



Una radiazione luminosa incidente nella regione intrinseca di un diodo semiconduttore drogato PIN e polarizzato inversamente produce dei portatori liberi. Ogni coppia di portatori generata dopo un certo tempo di transito all'interno della giunzione produce degli impulsi in determinati istanti. La distribuzione degli arrivi segue la legge di Poisson per cui la probabità di avere n portatori al tempo t è

$$P(t) = \frac{(\chi t)^n}{n!} e^{-\chi t}$$

χ è il ritmo statistico della generazione delle coppie elettrone lacuna che sarà

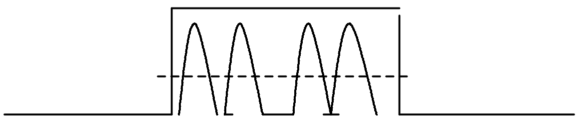
$$\chi = \eta \frac{P}{hf} \qquad \eta = \frac{N° \, elettr \; generati}{N° \, fotoni \; incidenti}$$

rappresenta gli elettroni generati per fotone $(0-1)$

P è la potenza incidente, h la costante di Plank , f (o ν) la frequenza

Se la trasmissione è numerica si può ragionare in termini di fotoni per bit introducendo così il concetto di velocità di trasmissione Rb

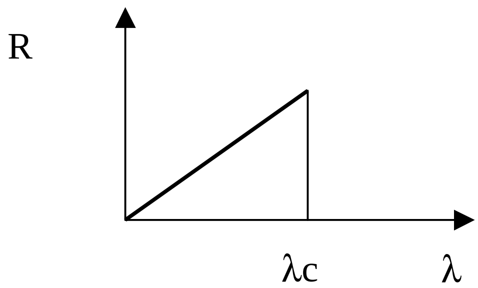
TRASDUZIONE ELETTRO- OTTICA



Il segnale di corrente che si ottiene è pari al valor medio. La fluttuazione rispetto a tale valor medio è il rumore quantico (q carica elettrone)

$I_p = \chi\, q =$ R P dove R è chiamata RESPONSIVITY

sostituendo χ ho $R = \eta \frac{q}{hf} = \eta \frac{q\lambda}{h\ c}$



L'energia del fotone hf deve essere superiore a Eg che dipende dal materiale per far passare le cariche dalla banda di valenza a quella di conduzione per cui si ha una frequenza di taglio λc

L'attenuazione ammissibile dipende dalla bit rate Rb infatti

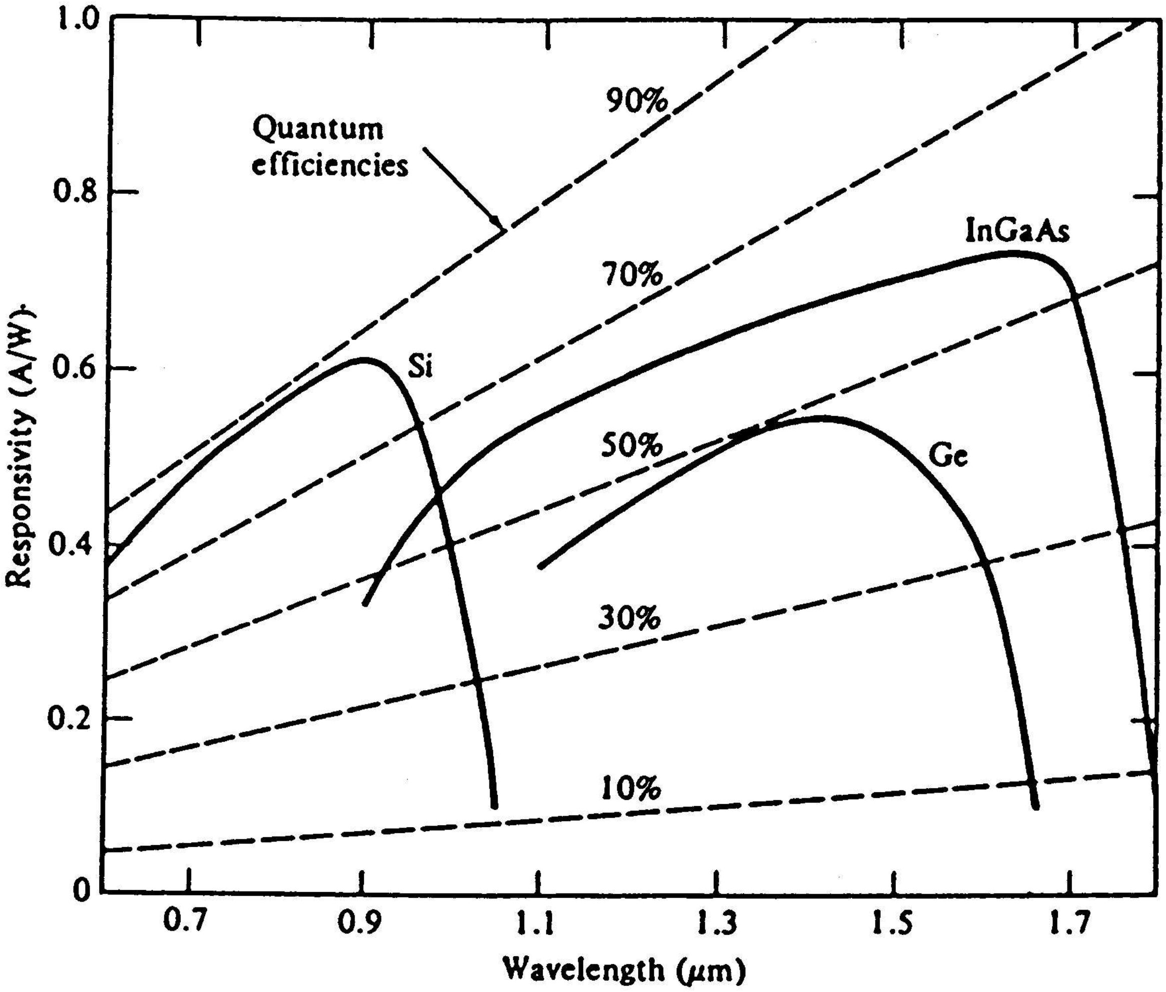
$\alpha_{dB} d = 10 \log(\frac{P_T}{P_R})$ ma $\frac{P_R}{R_b} = E_b$ $\frac{E_b}{h\ f} = N_p$

Np è il numero medio di fotoni per bit richiesti dal ricevitore
Per cui P_R=Np h f R_b

$$d = \frac{10}{\alpha_{dB}} \log(\frac{P_T}{N_p h\, f\, R_b})$$

Al crescere della velocità di trasmissione diminuisce in maniera logaritmica d

RESPONSIVITY



The *quantum efficiency* η is the number of electron-hole carrier pairs generated per incident photon of energy $h\nu$ and is given by

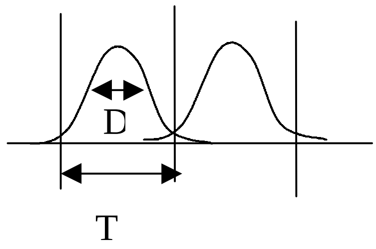
$$\eta = \frac{\text{Number of electron-hole pairs generated}}{\text{Number of incident photons}} = \frac{I_p/q}{P_0/h\nu}$$

Here I_p is the average photocurrent generated by a steady-state average optical power P_0 incident on the photodetector.

LIMITI SISTEMISTICI IMPOSTI DALLA DISPERSIONE

Sorgente luminosa a spettro ampio

$$D \le \frac{T}{4} \qquad R_b = \frac{1}{T} \qquad D = S(\lambda_o)\, d\, \Delta\lambda$$

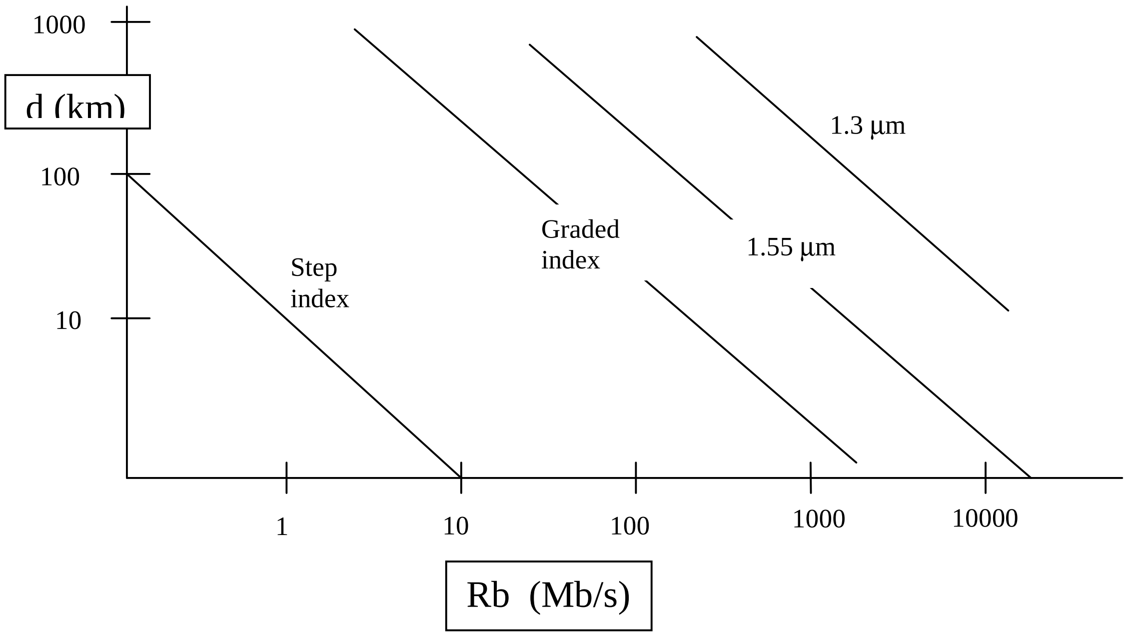


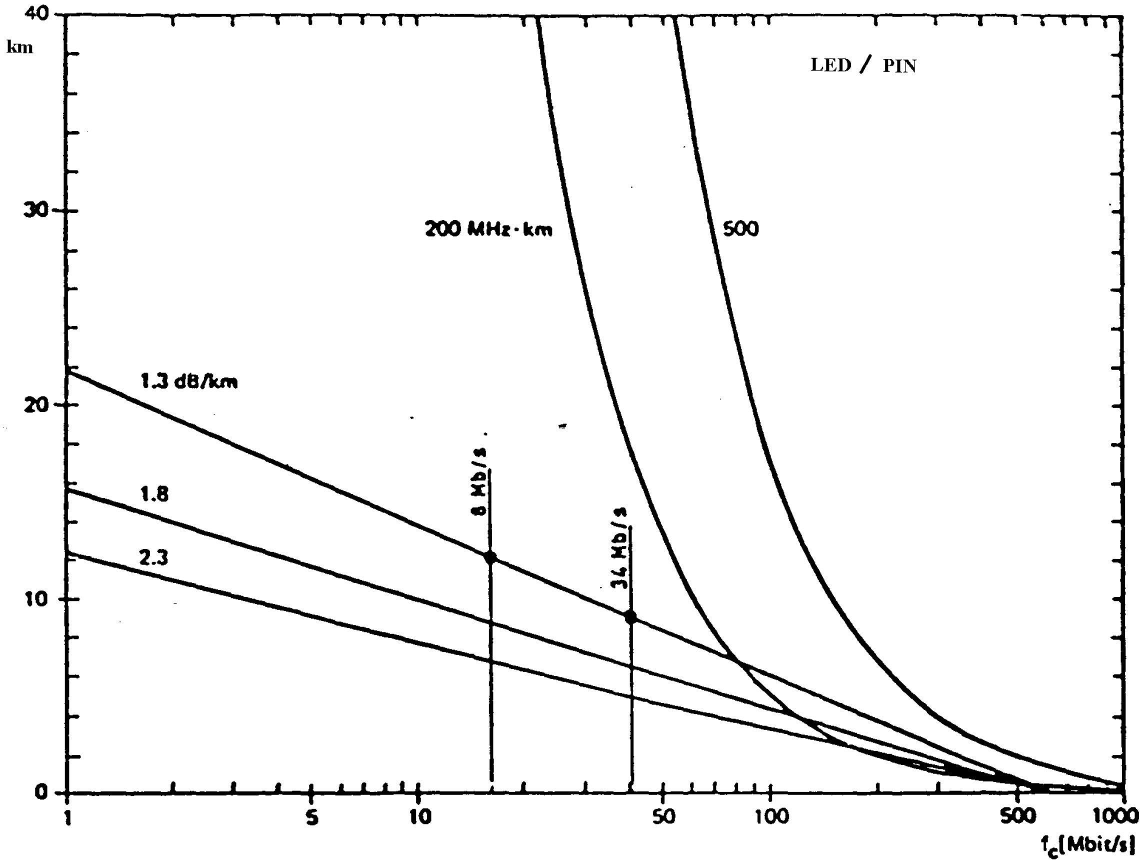
Da cui $\quad R_b \le \dfrac{1}{4D} = \dfrac{1}{4S(\lambda_o)\, d\, \Delta\lambda} \quad$ per cui $\quad R_b d \le \dfrac{1}{4S(\lambda_o)\, \Delta\lambda}$

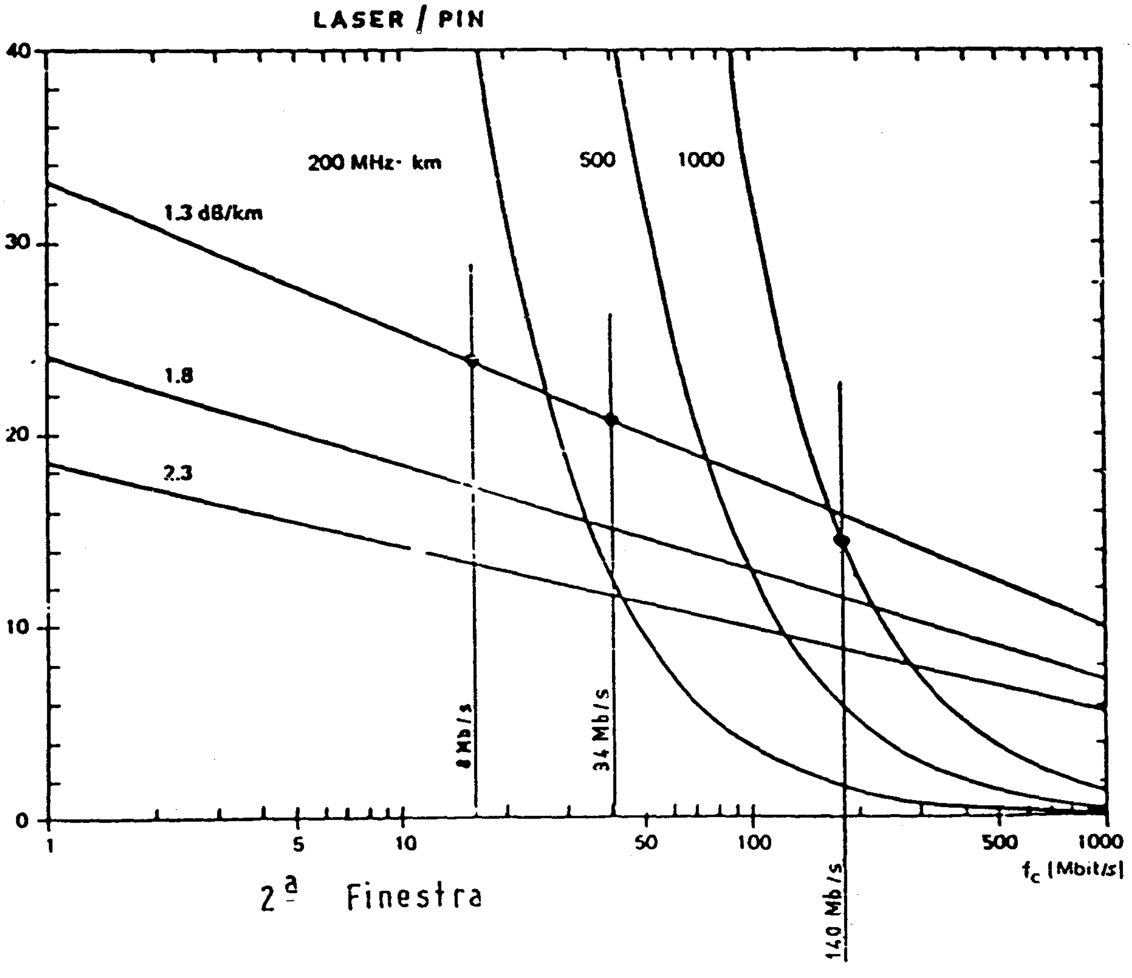
Sorgente a banda stretta
$\Delta\lambda$ è legata alla velocità di modulazione
se Δf è la larghezza spettrale del segnale in frequenza

$$\Delta f \cong \frac{1}{2T} \qquad \Delta f = \left.\frac{df}{d\lambda}\right|_{\lambda=\lambda_o} \Delta\lambda \; per\, cui \qquad \Delta f = \frac{c}{{\lambda_o}^2}\Delta\lambda \qquad \text{e} \qquad \Delta\lambda = \frac{{\lambda_o}^2}{2c} R_b$$

$$R_b{}^2 d \le \frac{c}{2S(\lambda_o)\,{\lambda_o}^2}$$




LED / PIN
km
200 MHz·km
500
1.3 dB/km
1.8
2.3
8 Mb/s
34 Mb/s
f_c [Mbit/s]


LASER / PIN
200 MHz· km
500
1000
1.3 dB/km
1.8
2.3
8 Mb/s
34 Mb/s
140 Mb/s
f_c [Mbit/s]

2ª Finestra

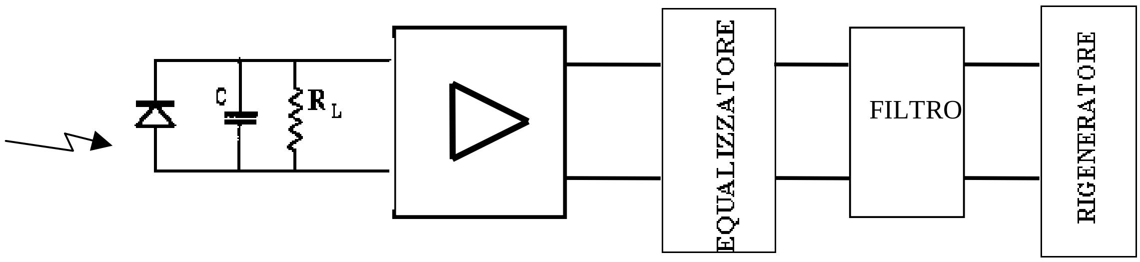
FRONT END OTTICO

IL front end di un ricevitore ottico è costituito da un fotodiodo e un amplificatore
Ci sono due tipi di amplificatori :

Alta Impedenza (HZ)
Transimpedenza (TZ)

AMPLIFICATORE AD ALTA IMPEDENZA

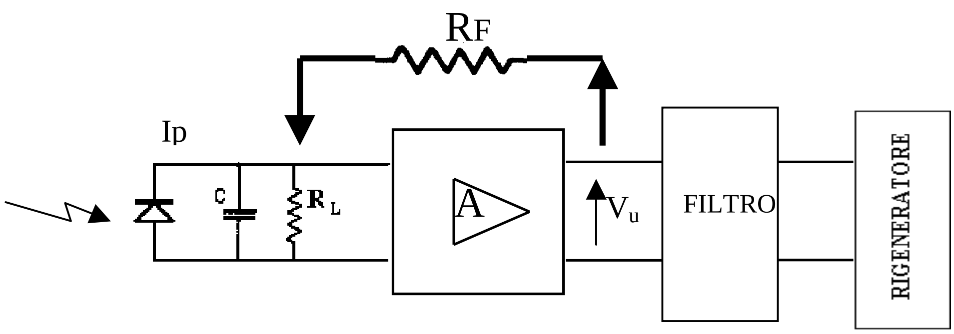
Il primo tipo di amplificatori minimizza i contributi di rumore ma allarga gli impulsi (limitando la banda) per cui deve essere seguito da un equalizzatore



La banda risulta limitata dall'elevato valore di R_L $B \leq \frac{1}{2\pi C R_L}$

Aumentando RL diminuisce la banda ma anche il rumore la cui varianza $\sigma^2 = \frac{4kTB}{R_L}$

AMPLIFICATORE A TRANSIMPEDENZA(TZ)

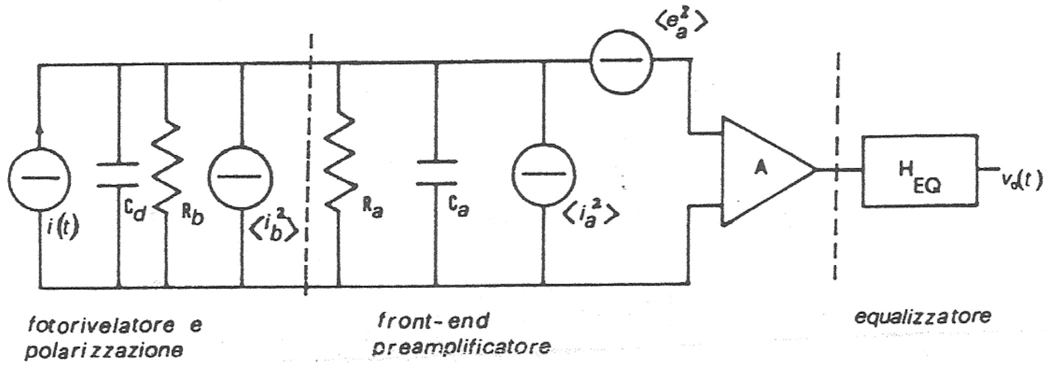


Collegando l'uscita con l'ingresso mediante un resistenza di feedback limpedenza di ingresso Appare come R_F/A R_F e R_L ai fini del calcolo del rumore risultano in parallelo.

$$\sigma^2 = \frac{4kTB}{(R_F // R_L)} \qquad B \leq \frac{A}{2\pi C R_L} \qquad H(f) = \frac{V_u}{I_p} = \frac{-R_F}{1 + j2\pi f \frac{R_F C}{A}}$$

SCHEMATIZZAZIONE DEL RICEVITORE

Immaginiamo di schematizzare, in linea di principio, il blocco ricevente

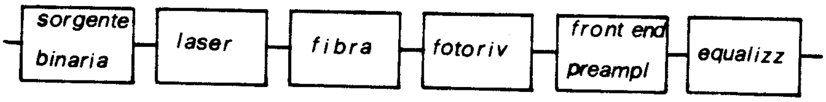


C_d è la capacità del fotodiodo
R_b è la resistenza di polarizzazione del fotodiodo
R_a e C_a sono la resistenza e la capacità di ingresso del front-end
A è un amplificatore ideale di tensione

$\langle i_a^2 \rangle$ e $\langle e_a^2 \rangle$ rappresentano dei generatori di rumore riportati in ingresso. Le loro densità spettrali di potenza bilatere le indichiamo con Φ_I e Φ_E. Per semplicità le supponiamo bianche, gaussiane ed incorrelate.
$\langle i_b^2 \rangle$ rappresenta il generatore di rumore termico dovuto alla R_b di polarizzazione. La sua densità spettrale bilatera è

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DELL'EQUALIZZATORE

Il canale di comunicazione può essere schematizzato



Si tratta di ricavare il modulo della funzione di trasferimento $H_{EQ}(\omega)$.
Per l'intero canale si può scrivere:

$$G_O(\omega) = R\ M\ G_M(\omega) \cdot H_F(\omega)\ H_{FE}(\omega) \cdot H_{EQ}(\omega)$$

R responsivity M guadagno

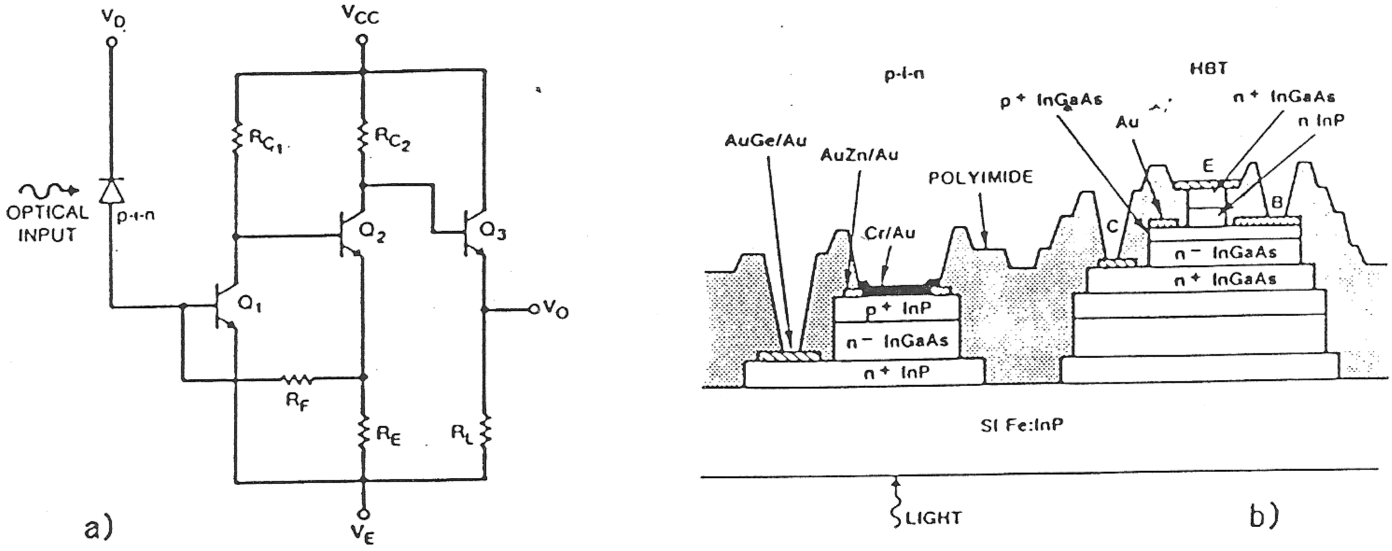
$G_O(\omega)$ **fornisce un coseno rialzato**

$H_{FE}(\omega)$ è la funzione di trasferimento corrente-tensione del front-end e del preamplificatore.

$G_M(\omega)$ rappresenta il segnale che esce dal fotoemettitore.
$H_F(\omega)$ è la funzione di trasferimento della fibra.

La funzione $H_{EQ}(\omega)$ è facilmente ricavabile dalla

$$H_{EQ}(\omega) = G_O(\omega)\ /\ R\ M\ G_M(\omega)\ H_F(\omega)\ H_{FE}(\omega)$$



Device Layer	Material	Thickness Å	Doping cm^{-3}
Emitter contact	n^+:InGaAs	3000	5×10^{18}
Emitter	n:InP	2000	1×10^{17}
Set back	n^-:InGaAs	200	5×10^{15}
Base	p^+:InGaAs	1000	2×10^{18}
Collector	n^-:InGaAs	2500	5×10^{15}
Subcollector	n^+:InGaAs	4000	5×10^{18}
p-Photodiode	p^+:InP	4000	2×10^{18}
i-photodiode	n^-:InGaAs	1 μm	5×10^{15}
n-photodiode	n^+:InP	4000	2×10^{18}
Substrate	Fe:InP		Semi-insulating

c)

Fig. 5 -a) Schema circuitale del fotoricevitore monolitico
b) Vista in sezione della struttura multistrato che realizza il diodo p-i-n ed il transistor HBT.
c) Tabella dei parametri della struttura stratificata
Tratto dal riferimento bibliografico [7]

RUMORE NEI RICEVITORI OTTICI

La corrente generata può essere scritta

$$I(t)= I_p+i_s(t) +i_T(t)$$

I_p è il valor medio e rappresenta la corrente di segnale

$i_s(t)$ è una corrente dovuto al rumore granulare (shot-noise o rumore quantico)

$i_T(t)$ è il contributo alla corrente dovuto al rumore termico

$i_s(t)$ deriva da un processo casuale che si può approssimare con una legge gaussiana a valor medio nullo

La densità spettrale bilatera del processo è

$$S_s(f) =q(I_p+I_d)$$

I_d è la corrente di buio che si ha in assenza di radiazione ottica incidente

$$\sigma_s^2= q(I_p+I_d)2B$$

B è la banda del ricevitore

Il rumore quantico è un processo gaussiano bianco dipendente dal segnale

$i_T(t)$ è il contributo alla corrente dovuto al rumore termico. E' anche questo un processo gaussiano a valor medio nullo .La sua densità spettrale e la varianza sono

$$S_T(t) = \frac{2kT}{R_L} \qquad \sigma_T^2 = \frac{4kTB}{R_L}$$

Il rapporto segnale rumore al ricevitore è (R= Responsivity)

$$SNR = \frac{Ip^2}{\sigma_S^2 + \sigma_T^2} = \frac{R^2 P_{in}^2}{\sigma_S^2 + \sigma_T^2}$$

Se $\sigma_S^2 >> \sigma_T^2$ $\quad SNR = \frac{RP_{in}}{2qB} = \eta Np$ limite quantico

η =efficienza del processo di fotorivelazione, Np =N° dei fotoni per bit

Questo vale per i ricevitori che usano un diodo PIN

Quando si hanno ricevitori con fotodiodi APD (a valanga) $Ip=M\ RP_{in}$

$$\sigma_s^2= 2qM^2 F_A(I_p+I_d) B$$

M è il fattore di moltiplicazione , $F_A >1$ è il fattore di rumore in eccesso

SNR peggiora se ho solo rumore quantico e migliora di M^2se prevale il rumore termico

Il progetto di un sistema ottico parte dalla determinazione della sensibilità del ricevitore definita come la minima potenza ottica media all'ingresso del ricevitore, necessaria per avere la probabilità di errore sul bit voluta
Si deve quindi calcolare la probabilità media di errore sul bit
In funzione del rapporto segnale rumore e quindi caratterizzare il sistema mediante il valore di potenza ottica richiesto.

Ho due livelli di corrente emessa dal fotodiodo
I_1 corrente del fotodiodo nel caso di trasmisione di un "1"
I_0 corrente del fotodiodo nel caso di trasmisione di uno "0"

$I_1=2MRP_R$ P_R è la potenza media (la potenza di picco$P_P=2P_R$)
M= numero medio di portatori per fotone R la responsivity
$I_0=0$ supponendo nulla la corrente di buio
$\sigma_1^2=\sigma_s^2+\sigma_T^2$ mentre $\sigma_1^2=\sigma_T^2$

La probabilità di errore sul bit può essere scritta

$$P_{eb}=1/2[P(0R/1T)+P(1R/0T)$$

Cioè la probabilità di decidere 0 quando trasmetto 1 e la
la probabilità di decidere 0 quando trasmetto 0
ricordando la funzione

$$Q(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{x} e^{(y^2/2)}dy$$

e la definizione di soglia che minimizza la probabilità errore nel caso di due simboli di valore I_1 e I_o
$$I_d=\frac{\sigma_0 I_1+\sigma_1 I_0}{\sigma_0+\sigma_1}$$

$$P_{eb}=Q(\frac{I_1-I_0)}{\sigma_0+\sigma_1} \qquad P_{eb}=Q(\frac{I_1}{\sigma_0+\sigma_1})=Q(\frac{2MRP_R}{\sigma_T+\sqrt{\sigma_S^2+\sigma_T^2}})$$

Fissato il valore della P_{eb} da $Q(K)=P_{eb}$ ricavo il valore di K

Dalla conoscenza di X $\longrightarrow$ $P_R=\frac{X}{R}(q\,\Delta f\,F_A X+\frac{\sigma_T}{M})$

Δf è la banda del sistema che viene assunta pari a Rb/2

Si voglia calcolare la sensibilità di un ricevitore ottico che lavora in terza finestra a 1.55 μm Il fotodiodo (del tipo InGaAs) ha una Responsivity R=1A/W e una corrente di buio Id= 2nA. Rb= 1 Gbps
La resistenza di ingresso del front end è R_L=1KΩ e la cifra di rumore F=2

Si calcoli la deviazione standard σ_T

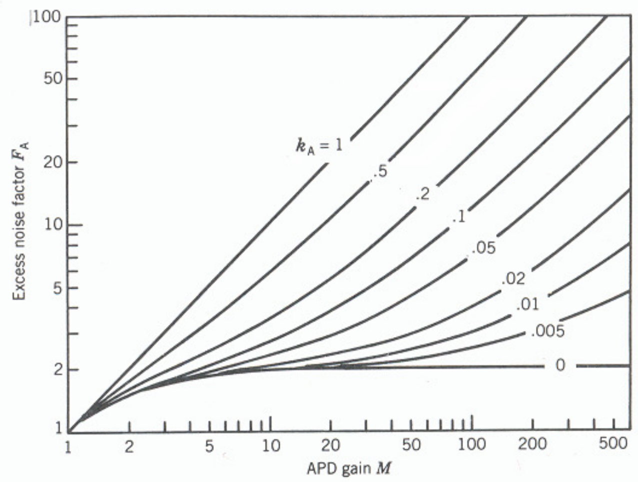
$$\sigma_T{}^2 = \frac{4 KT F \Delta f}{R_L} = \frac{4*1.3810^{-23}*290*2*500\,10^6}{10^3} = 1.6\,10^{-14}$$

$$\sigma_T = 0.12610^{-6} \quad A$$

L'espressione di σ_s per un rivelatore APD è

$$\sigma_s{}^2 = 2\,q\,M^2 F_A (R\,P_R + I_d)\Delta f \qquad\qquad F_A(M) = k_A M + (1-k_A)(2-\frac{1}{M})$$

F_A chiamato excess noise factor è legato al guadagno M dell'APD.
k_A è un rapporto di coefficienti di ionizzazione legato al processo di moltiplicazione a valanga ($k_A$varia fra 0 e 1 e F_A fra 2 e M; k_A deve essere piccolo)



Excess noise factor F_A as a function of the average APD gain M for several values of the ionization-coefficient ratio k_A.

Nell'ipotesi si adotti un fotodiodo di tipo APD con M= 100 e F_A=3

$$P_R = \frac{X}{R}(q\,\Delta f\; F_A X + \frac{\sigma_T}{M}) = \frac{6}{1}(1.60210^{-19}\;\; 5\,10^8 *3*6 + \frac{0.12610^{-6}}{100}) = 1.62\,10^{-8}\,(-48dBm)$$

$$\sigma_s{}^2 = 2\,q\,M^2 F_A (R\,P_R + I_d)\Delta f =$$
$$= 2*1.60210^{-19}*10^4\;*3*(1*16.2\,10^{-8} + 1*10^{-9})*5*10^8 = 826.610^{-16}$$
$$\sigma_s = 0.3\,10^{-6} \quad A$$

Valutare se ai fini del rapporto segnale rumore conviene utilizzare un rivelatore APD o PIN

Si parte dall'espressione del rapporto segnale rumore di un APD

$$SNR = \frac{Ip^2}{\sigma_S{}^2 + \sigma_T{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{\sigma_S{}^2 + \sigma_T{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{2\,q\,M^2 F_A (R\,P_R + I_d)\Delta f + \frac{4KT\,F\,\Delta f}{R_L}}$$

Se $\sigma_S << \sigma_T$

$$SNR = \frac{Ip^2}{\cancel{\sigma_S}{}^2 + \sigma_T{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{\sigma_T{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{\frac{4KT\,F\,\Delta f}{R_L}}$$

IL rapporto segnale rumore migliora con il fattore M^2 rispetto al caso di un PIN
Ma se $\sigma_S >> \sigma_T$

$$SNR = \frac{Ip^2}{\sigma_S{}^2 + \cancel{\sigma_T}{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{\sigma_S{}^2} = \frac{M^2 R^2 P_R{}^2}{2\,q\,M^2 F_A (R\,P_R + I_d)\Delta f} \cong \frac{R^2 P_R{}^2}{2\,q\,F_A \Delta f}$$

Il rapporto segnale rumore si riduce della quantità F_A
Il rumore termico domina di solito nei sistemi non amplificati
Mentre il rumore quantico prevale nei casi sempre più frequenti
In cui si usi un amplificatore ottico all'ingresso del fotodiodo

P è la potenza incidente, h la costante di Plank , f (o ν) la frequenza
$h=6.6256 * 10^{-34}$ J/Hz è la costante di Plank
Electronic charge=$1.602\ 10^{-19}$ 1eV=$1.60\ 10^{-19}$ J (C*1V)

Invece della minima potenza ottica si potrebbe indicare anche il numero di fotoni per bit

Possiamo anche determinare il limite quantico di un sistema IM/DD
Si consideri un ricevitore ideale con corrente di buio trascurabile in grado di individuare un “1” rivelando anche solo un fotone per bit (niente potenza niente fotoni)
P_{eb}=1/2[P(0R/1T)]

La statistica da considerare non è quella gaussiana ma la statistica di Poisson che mi dice la probabilità che Np fotoni per bit generino n coppie lacune elettroni (se t=Tb)

$$P_n(t) = \frac{(\chi t)^n}{n!} e^{-\chi t} = \frac{(N_p)^n}{n!} e^{-N_p}$$

La probabilità di errore è 1/2 la probabilità di riconoscere “ 0 “se ho trasmesso “1” Se Np >0 e n =0 compio un errore

$$BER = P_e = \frac{1}{2} P(0/1) = \frac{1}{2} e^{-N_p}$$

Per Peb=10^{-9} Np =20
Questo è il limite quantico nei sistemi IM/DD