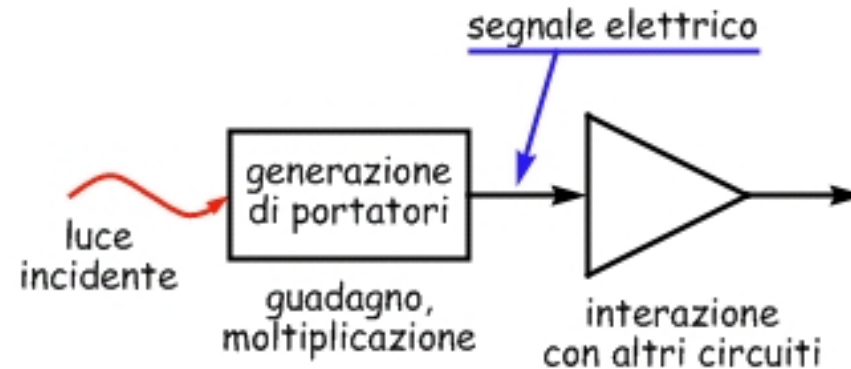


## Fotorivelatori (a semiconduttore)

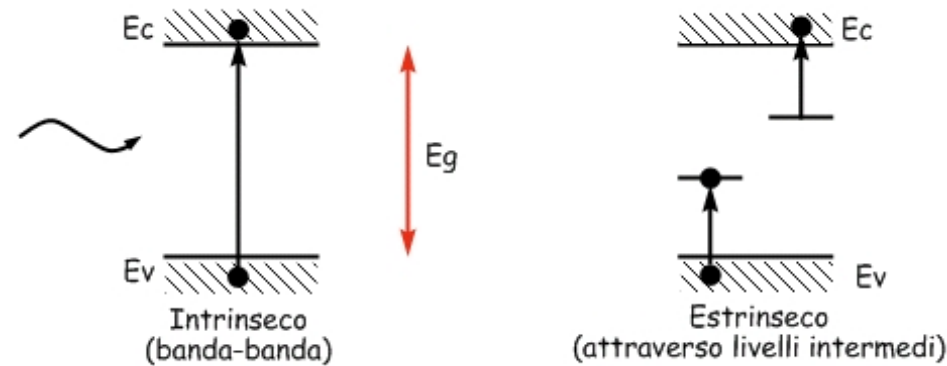


**funzione:** trasformare un segnale ottico in un segnale elettrico;

**tipi:** fotoconduttori;  
fotodiodi (pn, pin, a valanga...)

**caratteristiche:** modo di funzionamento;  
larghezza di banda;  
sensibilità;  
caratteristiche di rumore.

# Fotoconduttore



- assorbimento di fotoni di energia  $h\nu \geq E_g$  (processo intrinseco) o anche minore nel caso in cui siano disponibili livelli intermedi (processo estrinseco), e generazione di coppie di portatori (aumento della conducibilità)

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

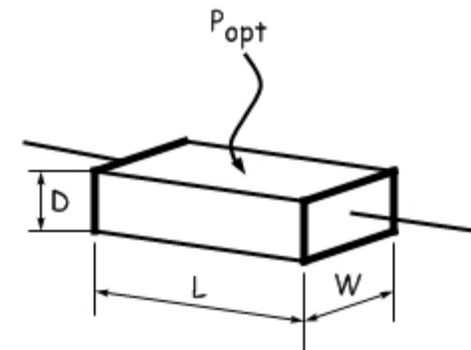
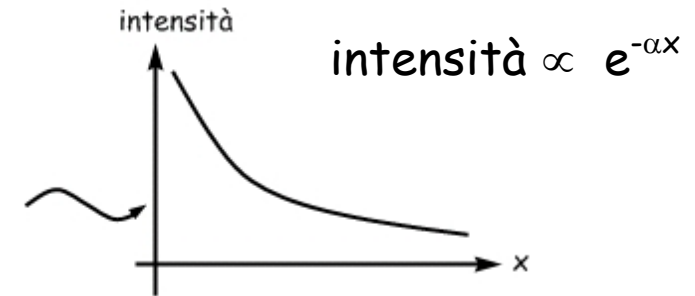
## analisi unidimensionale fotoconduttore:

campo elettrico costante;  
spessore  $D \ll 1/\alpha$ : intensità  $\approx$  costante;  
fenomeni uniformi trasversalmente;  
conduzione solo elettroni

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{fotoni}}$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{fotoni}} = \eta \cdot \frac{P_{\text{opt}} / (h\nu)}{WLD}$$

$\tau$  "rate" di ricombinazione;



un segnale ottico modulato in ampiezza:  $P(\omega) = P_{opt} (1 + m e^{j\omega t})$

$P_{opt}$  = potenza media;

$m$  = indice di modulazione;

$$n(t) = n_0 e^{-t/\tau} + \eta \frac{(P_{opt} / h\nu)}{WLD} \tau + \eta \frac{(P_{opt} / h\nu)}{WLD} \tau \frac{m}{1 + j\omega\tau} e^{j\omega t}$$

$$\begin{aligned} I_p &= \sigma EWD = q\mu_n nEWD = qnLWD \frac{v_d}{L} = \\ &= q\eta \frac{P_{opt} \tau}{h\nu t_r} + q\eta \frac{P_{opt} \tau}{h\nu t_r} \frac{m}{1 + j\omega\tau} e^{j\omega t} \end{aligned}$$

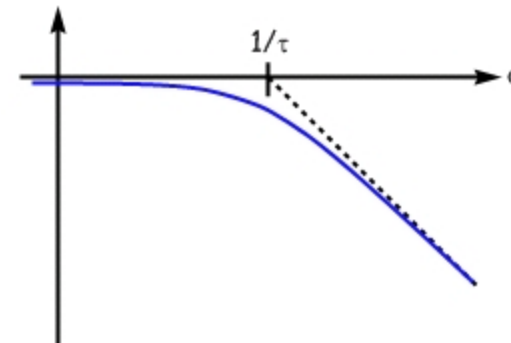
$t_r = L / v_d$  tempo di transito;

$g = \tau / t_r$  guadagno (se  $L$  è troppo grande i portatori si ricombinano)

$$I_{p,eff} = q\eta \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{P_{opt}}{h\nu} \frac{\tau}{t_r} \frac{m}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

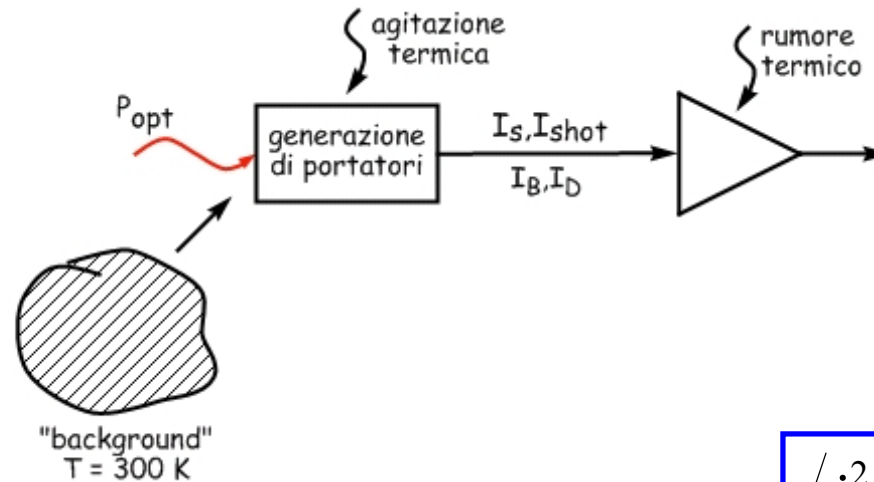
N.B. la potenza ottica (rivelatore quadratico perfetto)

fotorivelatore	$t_r$	guadagno
fotoconduttore	1 ms ÷ 10 ns	1 ÷ 10 <sup>6</sup>
giunzione pn	10 ps	1
giunzione pin	10 ns ÷ 100 ps	1
fotodiodo a valanga	100 ps	10 <sup>2</sup> ÷ 10 <sup>4</sup>



problemi: i fotoconduttori (fotoresistenze) sono lenti;  
trovano impiego come rivelatori nell'infrarosso

## rumore



$I_S$  corrente di segnale;

$I_{shot}$  corrente di rumore shot associata a  $I_S$ ;

$I_B$  corrente dovuta al segnale di background;

$I_D$  corrente dovuta alla generazione termica di portatori.

$$\langle i_B^2 \rangle + \langle i_D^2 \rangle = 4kTGB$$

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2qBI_{DC} \frac{\tau}{t_r} \frac{2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

## fotodiodi

principio di funzionamento:

generazione fotoelettrica in **giunzione pn** polarizzata inversamente; le coppie di portatori aumentano la corrente inversa di saturazione del diodo.

compromessi:

desiderando dispositivi veloci ( $t_r$  piccolo) devo ridurre la regione di carica spaziale; questa richiesta si scontra con il desiderio di un'elevata efficienza quindi con la necessità di avere una regione di svuotamento estesa in modo che tutti i fotoni incidenti vengano assorbiti.

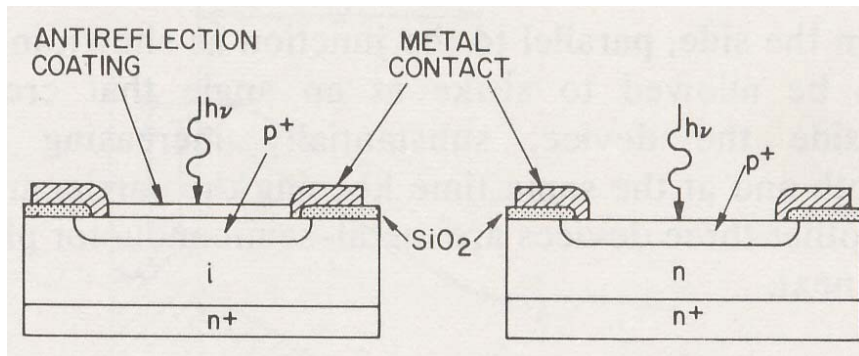
$$\text{efficienza quantica } \eta = \frac{I_p / q}{P_{opt} / (h\nu)}; \quad \text{responsività } R = \eta \frac{q}{h\nu}$$

velocità di risposta:

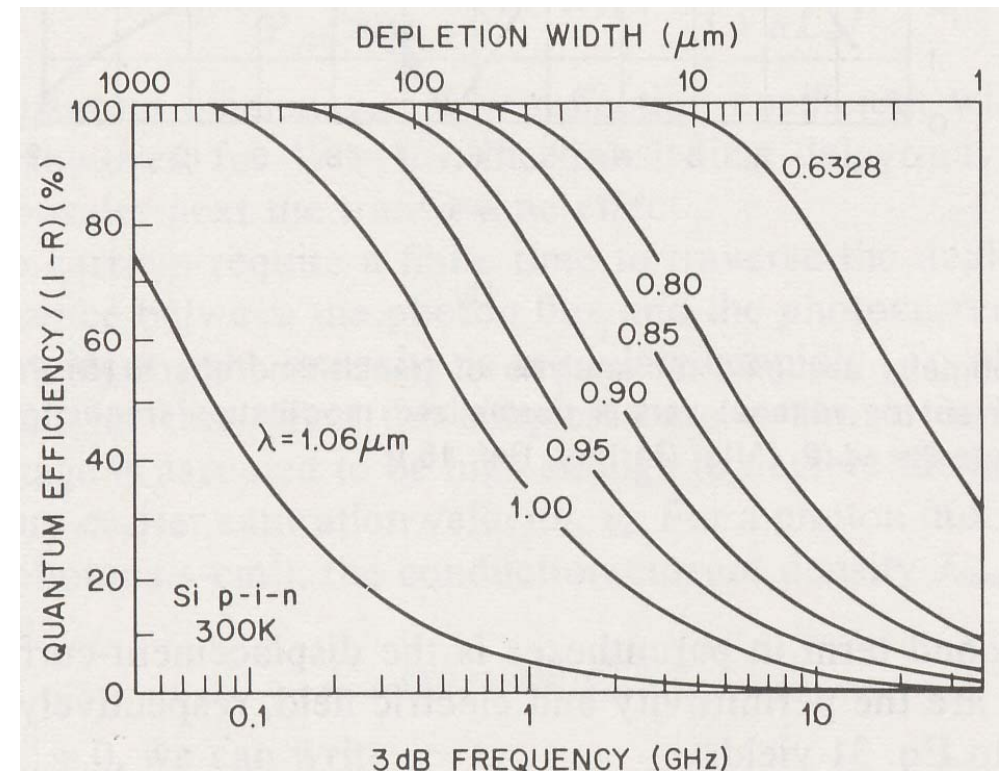
diffusione portatori, tempo di transito, capacità parassita

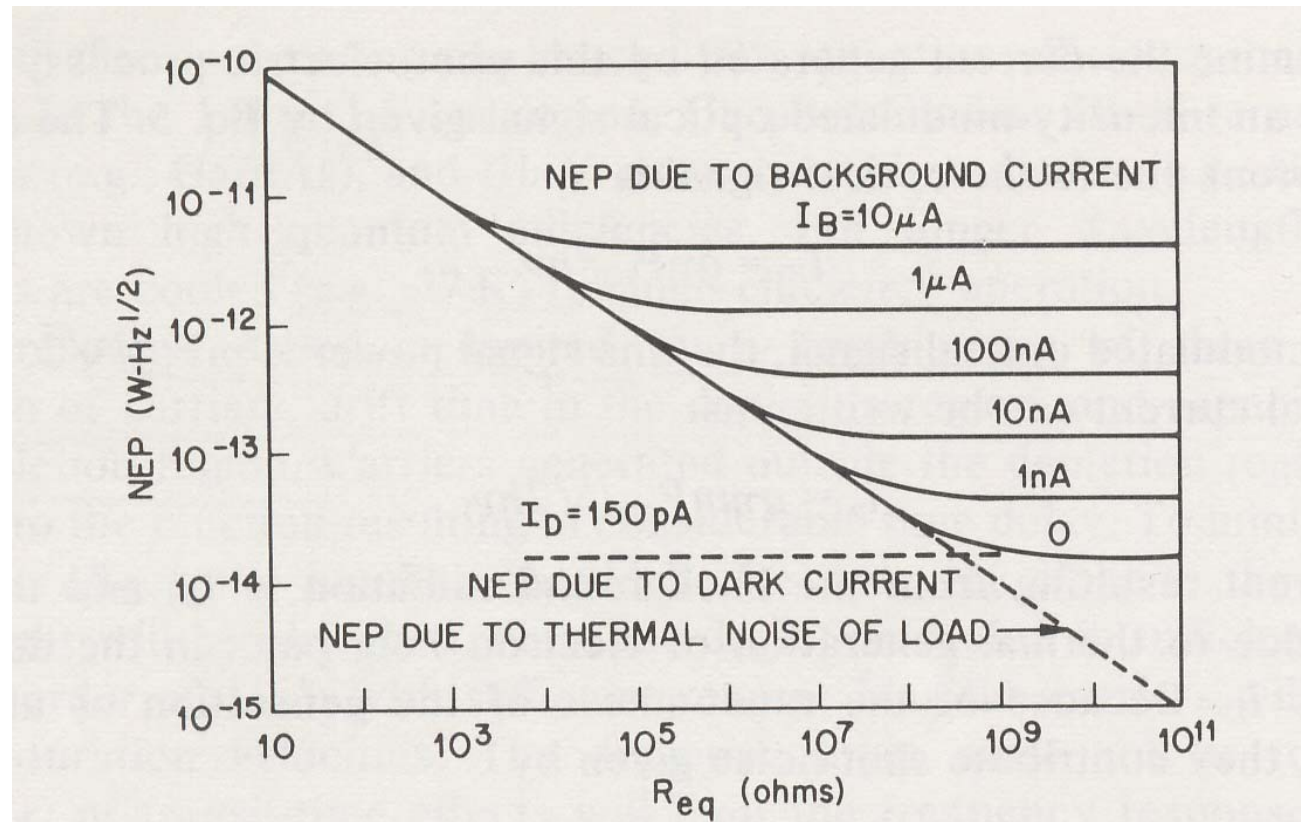
## fotodiodo pin

prestazioni migliori rispetto alla giunzione pn semplice perchè la capacità  $C$  è più bassa; è possibile "progettare" la lunghezza della zona intrinseca in modo da ottimizzare efficienza  $\eta$  e tempo di transito.



A causa della lunghezza della regione di deriva (regione intrinseca) si ha una riduzione della risposta del tipo  $|\text{sinc}(\omega t_r)|^2$





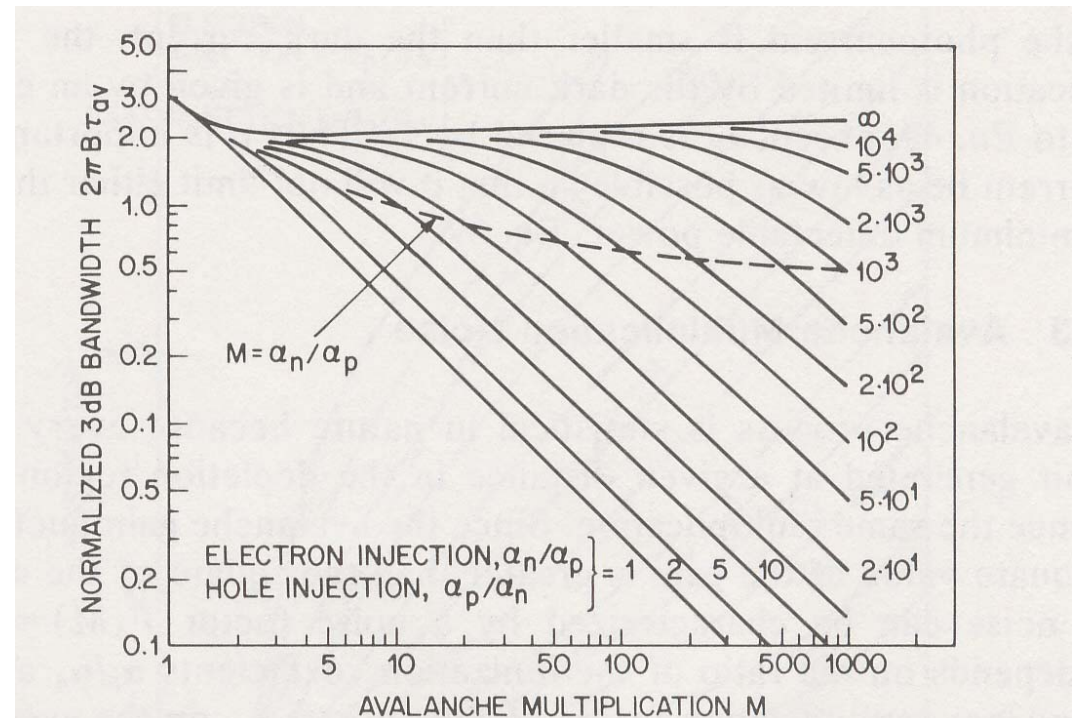
## fotodiodi a valanga

si sfrutta il processo di moltiplicazione a valanga in una giunzione polarizzata inversamente (elevata tensione inversa) allo scopo di avere un meccanismo di

guadagno interno:  $I_{p,eff} = M \cdot q\eta \frac{P_{opt}}{h\nu} m$

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^w \alpha_n e^{-\int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) dz} dx}$$

$\alpha_n, \alpha_p$  "rate" di ionizzazione di elettroni e lacune



il rumore in un rivelatore a valanga:

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle i_p^2 \rangle_{pn} M^2}{\left( \langle i_{shot}^2 \rangle + \langle i_D^2 \rangle + \langle i_B^2 \rangle \right) M^2 F(M) + 4kTB / R_{eq}} \cong \frac{\langle i_p^2 \rangle_{pn} M^2}{4kTB / R_{eq}}$$

fattore di rumore  $F(M) = \langle M^2 \rangle / M^2 \geq 1$

l'effetto valanga amplifica la fotocorrente ma anche le sue fluttuazioni !!!

In molte condizioni di lavoro i contributi di rumore shot, "background" e "dark current" sono trascurabili rispetto al rumore termico dello stadio amplificatore successivo; in questo caso il rivelatore a valanga è nettamente superiore a fotodiodi pn o pin per un fattore  $M^2$

## Rivelazione coerente

Per rivelare un segnale conservandone l'informazione sia l'ampiezza sia sulla fase la tecnica tipica è quella dell'eterodina: **mescolazione di frequenza** in un elemento non lineare tra il segnale ed un oscillatore locale

$$\begin{aligned} i(t) &= \Re \int_A \left| \bar{E}_{LO}(\mathbf{x}, t) + \bar{E}_s(\mathbf{x}, t) \right|^2 dA = \\ &= i_{LO} + i_s + 2 \operatorname{Re} \left\{ \Re \int_A \left| \bar{E}_{LO}(\mathbf{x}, t) \bar{E}_s^*(\mathbf{x}, t) \right|^2 dA \right\} = \\ &= (dc) + 2\sqrt{i_{LO}i_s} \int_A W(\mathbf{x}) \cos(\theta(x) + \Delta\omega t) dA \end{aligned}$$

$\Re$  responsività,  $i_s$  e  $i_{LO}$  fotocorrenti generate singolarmente da segnale e oscillatore locale,  $W$  è il rapporto del valore locale di  $|\bar{E}_{LO}\bar{E}_s|$  rispetto al suo valor medio sulla superficie  $A$  del rivelatore,  $\theta$  è la differenza di fase fra i due fasci.

$$i(t) = (dc) + 2\sqrt{i_{LO}i_S} \int_A W(\mathbf{x}) \cos(\theta(x) + \Delta\omega t) dA$$

- fasci perfettamente allineati, nelle stesse condizioni di polarizzazione e "fuocheggiamento", l'integrale si riduce all'integrale sul termine  $\cos(\Delta\omega \cdot t)$ ; in queste condizioni la fotocorrente di segnale presenta un **guadagno** pari a  $2i_{LO}/i_S$
- **il rumore** è dominato dal rumore shot additivo dell'oscillatore locale; poichè il guadagno è uguale al rapporto fra rumore shot dell'oscillatore locale e del segnale, allora il rapporto S/N totale è uguale a quello del solo segnale, fino al caso limite in cui  $E_S$  corrisponda ad un singolo fotone
- questa tecnica consente di superare il limite del rumore termico del resistore di carico del fotorivelatore

$$i(t) = (dc) + 2\sqrt{i_{LO}i_S} \int_A W(\mathbf{x}) \cos(\theta(x) + \Delta\omega t) dA$$

- nel caso in cui  $\theta$  non sia nullo su tutto il rivelatore il valore risultante dell'integrale sarà inferiore; nel caso in cui sia abbia ad esempio una piccola differenza in angolo o del fuoco si vengono a formare delle frange di interferenza sulla superficie del rivelatore che vanno a ridurre drasticamente il guadagno disponibile e quindi il rapporto segnale/rumore.