Sensori ottici

Caratterizzazione dei sensori ottici:

- principio di funzionamento e grandezza misurata

1. lo spettro elettromagnetico
2. le grandezze fotometriche (le unità di misura del S.I.)
3. l'assorbimento di radiazione in Si (generazione ottica)
4. la sensibilità intrinseca del silicio

Sensori ottici

Caratterizzazione dei sensori ottici:

- tipi di dispositivi, circuito di lettura (read-out) e modello del sensore (sensibilità)

1. fotoresistenza
2. fotodiodo
3. fototransistore bipolare e fototransistore MOS
4. fotocondensatore MOS
5. CCD

Sensori ottici

Caratterizzazione dei sensori ottici:

- architetture

1. architettura a matrice di fotodiodi
2. sensore CMOS
3. sensore CID
4. sensore CCD lineare
5. Full Frame Transfer CCD
6. Frame Transfer CCD
7. Interline Transfer CCD

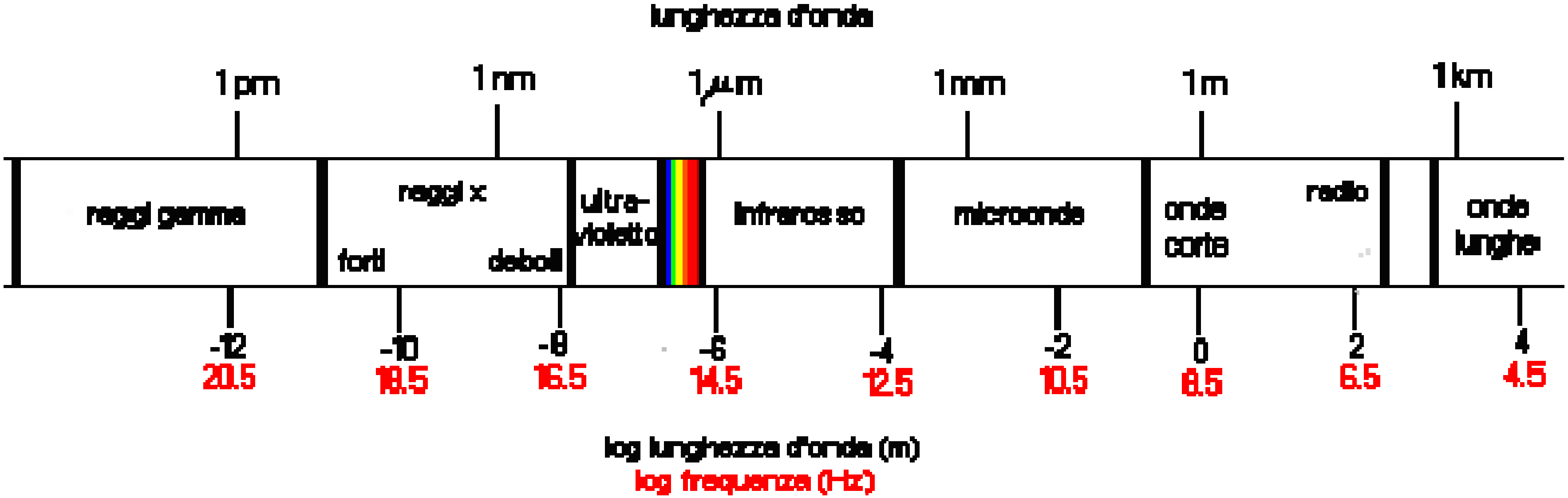
Sensori ottici

Caratterizzazione dei sensori ottici:

- condizioni operative e prestazioni

  1. risoluzione spaziale dell'immagine
  2. gestione dei colori
  3. riflessione superficiale e rifrazione degli strati interposti di dielettrico
  4. blooming
  5. fill-factor

Lo spettro elettromagnetico



relazione tra lunghezza d'onda e frequenza:

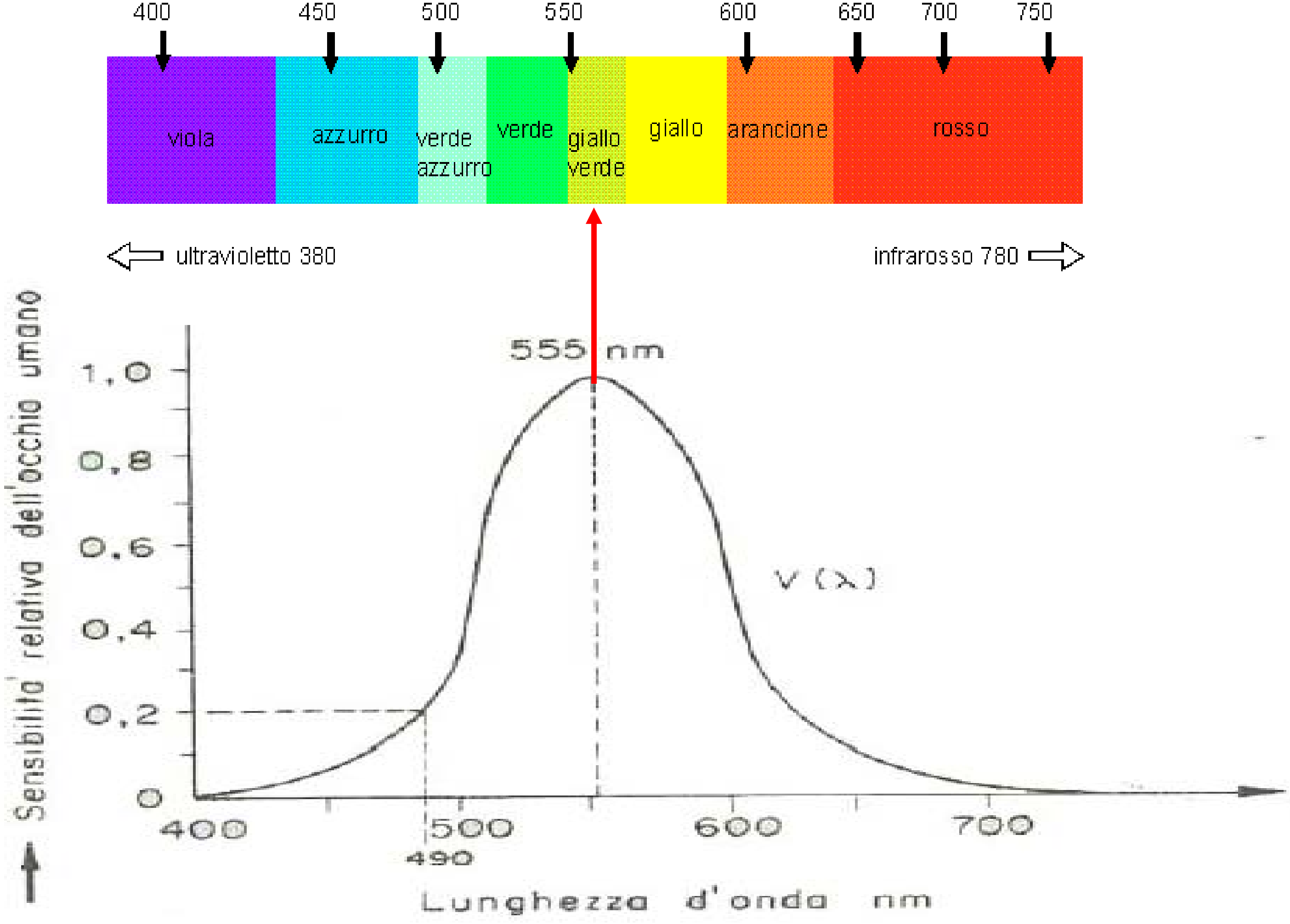
$\lambda = c / \nu$

$c = 3 \times 10^8$ m/s

Sensibilità dell'occhio umano

V(λ) è la media delle risposte ottenute da un campione di osservatori in condizioni di luminosità superiori ad un certo minimo (visione fotopica).

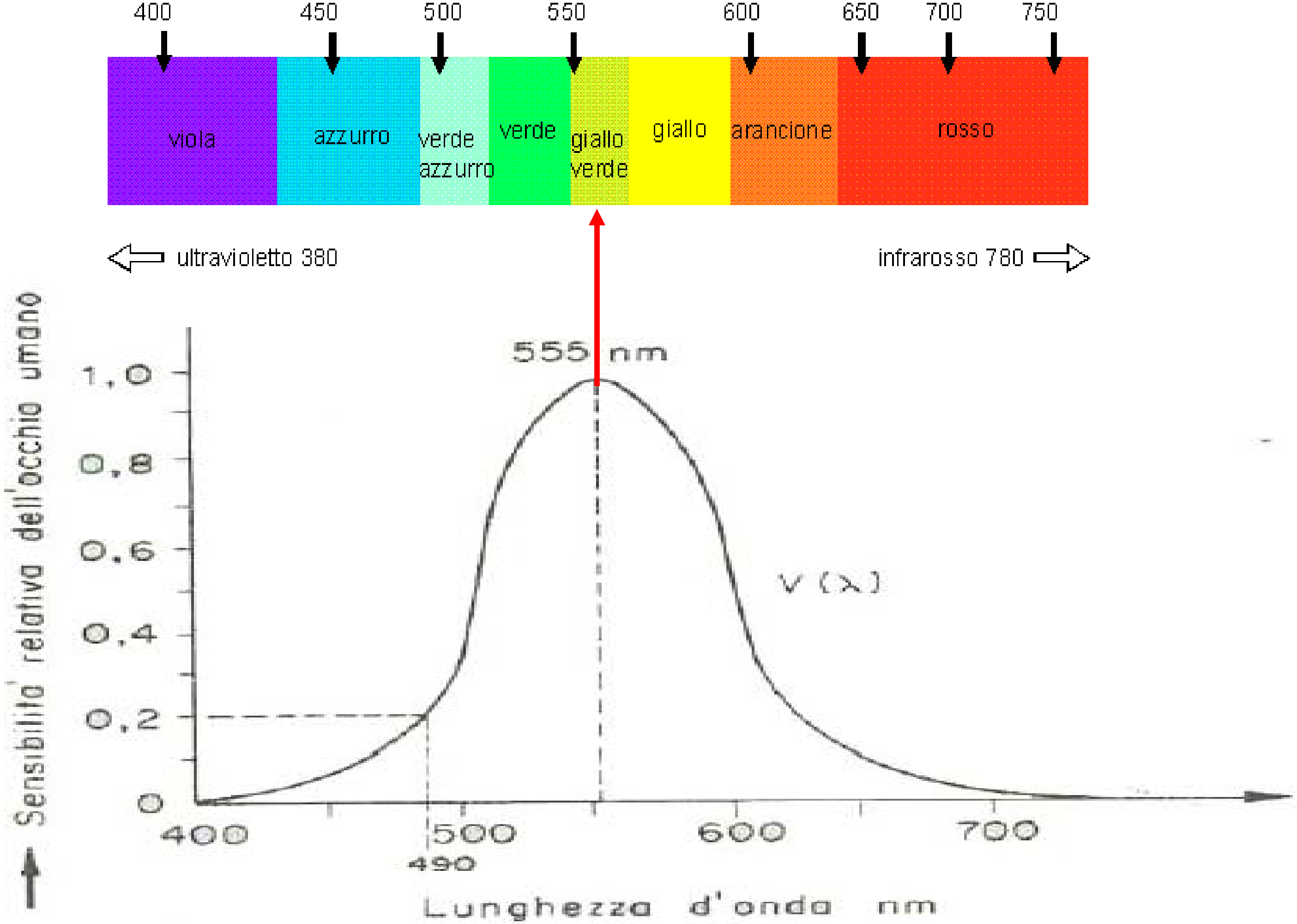
A λ = 555nm è 1W = 683 lm.



Definizione del lumen

A λ = 555 nm il flusso luminoso di 1W corrisponde a 683 lm.

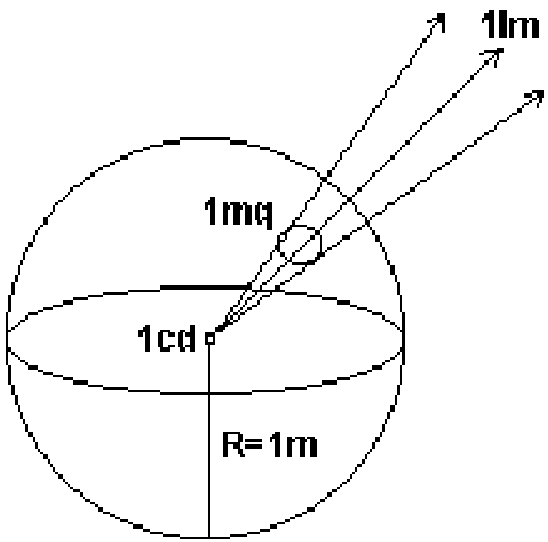
A λ = 490 nm il flusso luminoso di 1W corrisponde a 683x0,2=136,6 lm.

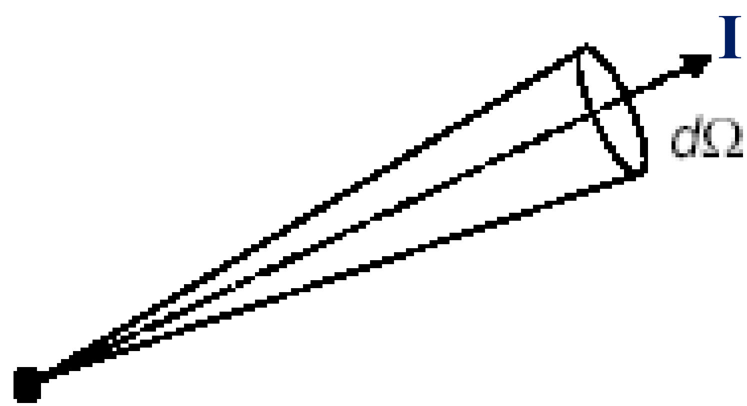


Grandezze fotometriche (le unità di misura del S.I.)

<u>Lumen (lm):</u> unità di misura del flusso luminoso Φ (flusso di energia ”pesato” secondo la sensibilità spettrale dell’occhio umano).

<u>Candela (cd):</u> unità di misura dell’intensità luminosa **I** (flusso luminoso radiato in una certa direzione per unità di steradiante, lm/sr).





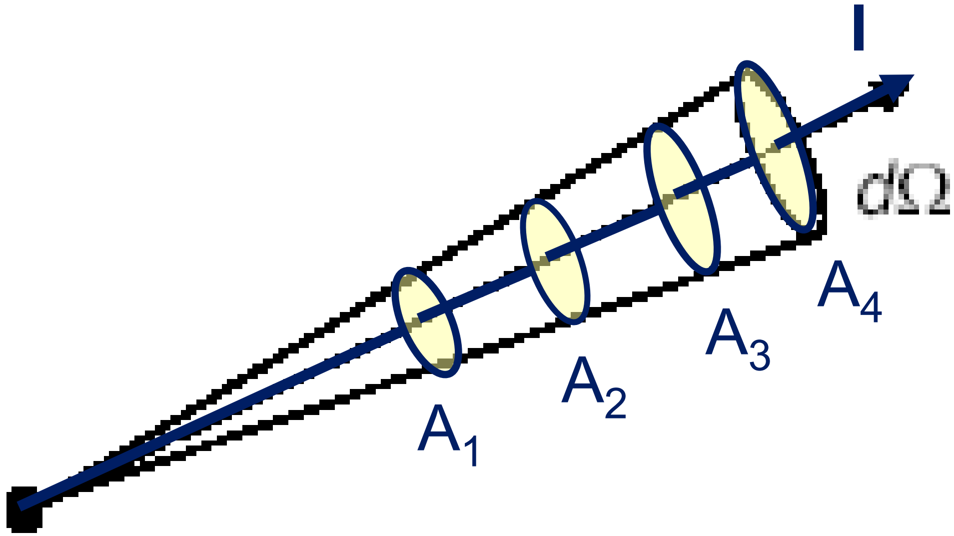
http://physics.nist.gov

\

Grandezze fotometriche (le unità di misura del S.I.)

Nit (nt): unità di misura della luminanza **L** (intensità luminosa incidente su una superficie normale alla direzione del flusso di area unitaria, cd/m^2). È indicativo dell'abbagliamento.

http://physics.nist.gov

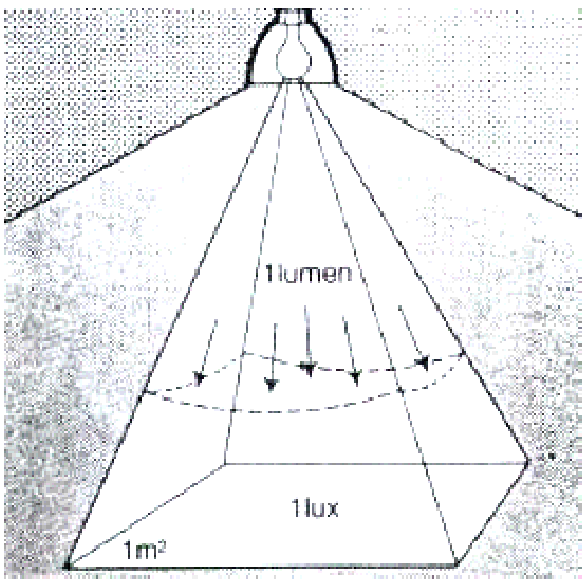


L=**I**/A

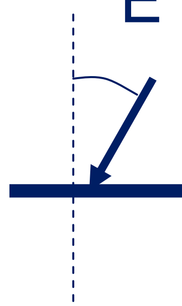
Grandezze fotometriche
(le unità di misura del S.I.)

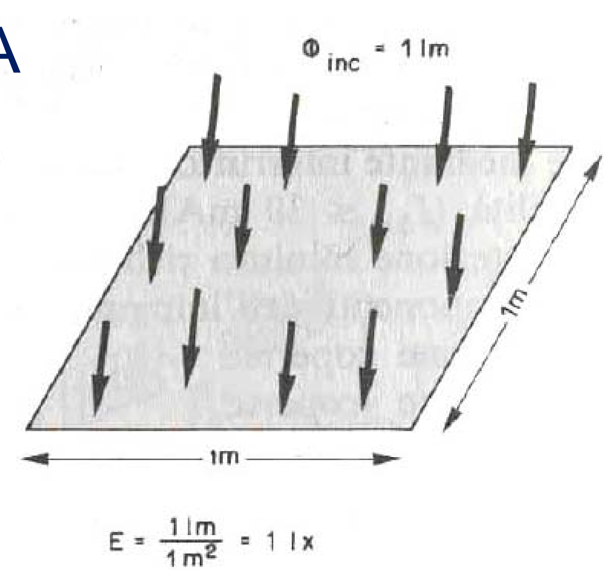
<u>Lux (lux):</u> unità di misura dell'illuminamento E (flusso luminoso incidente su una superficie di area unitaria, lm/m^2).

http://physics.nist.gov



$$E = \Phi \cos(\theta)/A$$





Illuminamenti prescritti

Tipo di attività/ambiente	Illuminamenti medi di esercizio
Spazio pubblico in contesto buio (all'aperto)	20-30-50 lux
Orientamento per brevi visite temporanee	50-100-150 lux
Spazio di lavoro all'interno del quale i compiti che richiedono l'impegno della vista sono svolti solo occasionalmente	100-150-200 lux
Esecuzione di lavori visivi su materiali:	
■ Ad elevato contrasto o grandi dimensioni	200-300-500 lux
■ A medio contrasto o piccole dimensioni	500-750-1000 lux
■ A basso contrasto o dimensioni molto piccole	1000-1500-2000 lux
■ A basso contrasto o dimensioni molto piccole per periodi di tempo prolungati	1500-2000-3000 lux
Svolgimento di lavori visivi impegnativi e prolungati (illuminazione localizzata)	5000-10000-15000 lux
Svolgimento di lavori visivi molto speciali eseguiti su materiale a basso contrasto e di piccole dimensioni (illuminazione localizzata)	10000-30000 lux e oltre

Il flusso luminoso Φ

Onda piana monocromatica TEM:

$E = E_0 \exp[j(kx - \omega t)]$

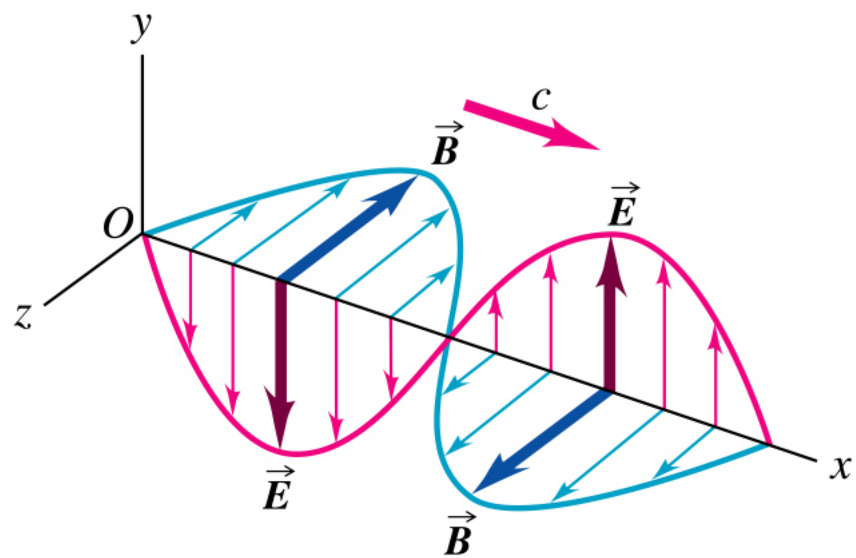
$B = B_0 \exp[j(kx - \omega t)]$

con $k = 2\pi/\lambda$, $\omega = 2\pi\nu$ e

$E_0 = c\, B_0$

$B = \mu\, H$

μ-permittività magnetica



→ il flusso luminoso (in Watt) è la potenza irradiata dalla sorgente luminosa (o flusso di potenza).

V. Rizzoli "Lezioni di campi elettromagnetici- Propagazione libera", Progetto Leonardo (Bologna)

\

$$P_I = -\int_V \mathbf{J}_I \cdot \mathbf{E} \, \mathrm{d}V$$

$\mathbf{J}_I$ è la densità di corrente impressa (sorgente)

Bilancio energetico relativo al volume V

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} + \mathbf{J}_I$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}_I \cdot \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \cdot \mathbf{H}$$

V. Rizzoli “Lezioni di campi elettromagnetici- Propagazione libera”,
Progetto Leonardo (Bologna)

$$\nabla \times \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} - \nabla \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot \mathbf{E} + \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}_I \cdot \mathbf{E}$$

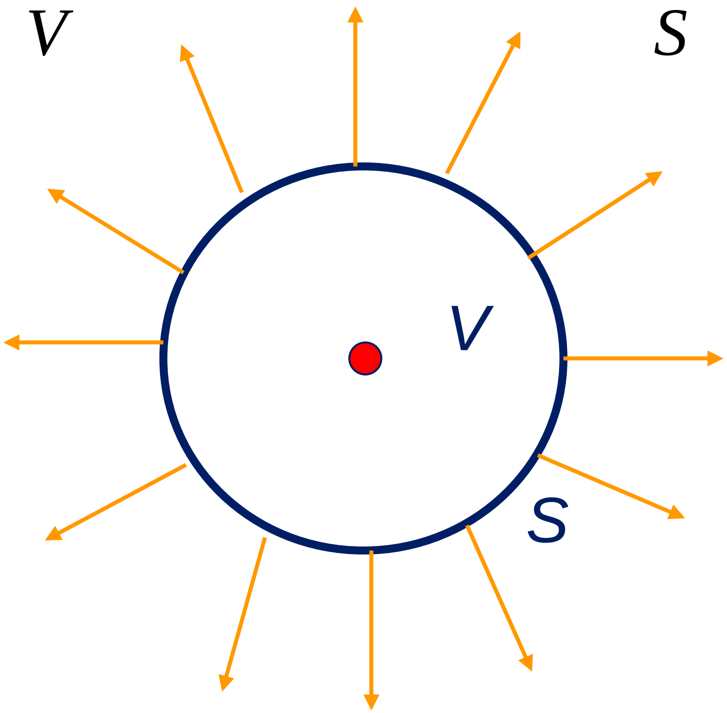
$$-\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\partial (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E})}{\partial t} + \frac{1}{2} \mu \frac{\partial (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}_I \cdot \mathbf{E}$$

$$-\mathbf{J}_I \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\partial (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E})}{\partial t} + \frac{1}{2} \mu \frac{\partial (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H})$$

$$P_I = \underbrace{\int_V \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\partial (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E})}{\partial t} + \frac{1}{2} \mu \frac{\partial (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})}{\partial t} \mathrm{d}V}_{\text{potenza elettromagnetica in V}} + \underbrace{\int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \mathrm{d}V}_{\text{effetto Joule}} + \underbrace{\int_V \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \mathrm{d}V}_{\text{potenza che viene irradiata all'esterno}}$$

V. Rizzoli “Lezioni di campi elettromagnetici- Propagazione libera”, Progetto Leonardo (Bologna)

$$\int_V \nabla\cdot(\mathbf{E}\times\mathbf{H})\mathrm{d}V = \int_S (\mathbf{E}\times\mathbf{H})\cdot i_n \mathrm{d}S = \Phi$$

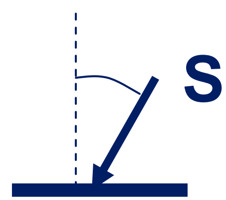


Intensità di una onda EM o densità di potenza (W/m²)

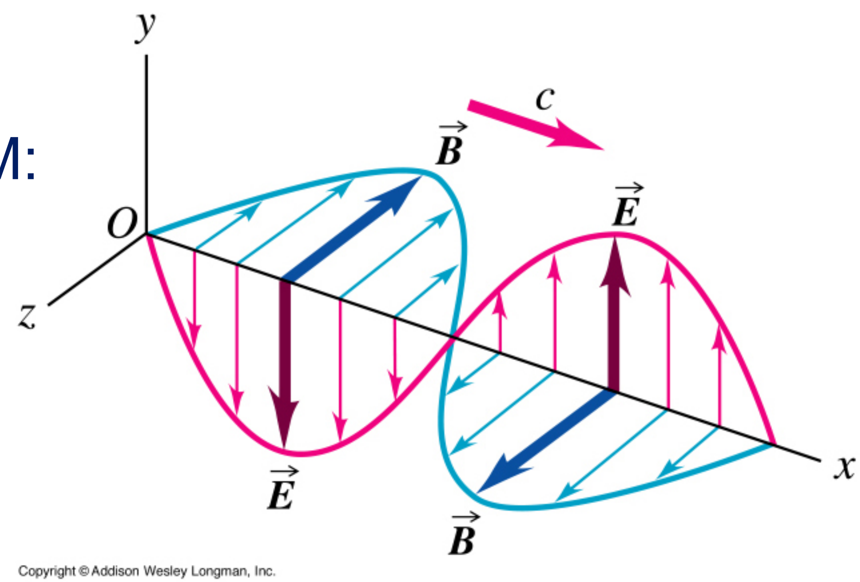
$$\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{H}$$

S è il vettore di Poynting,
detto anche
I –intensità dell'onda EM (W/m²)

E = **S**•$\boldsymbol{i}_n$ è l'illuminamento (W/m²)



L'intensità di una onda piana monocromatica



Onda piana monocromatica TEM:

$E = E_0 \exp[j(kx - \omega t)]$

$B = B_0 \exp[j(kx - \omega t)]$

con $k = 2\pi/\lambda$, $\omega = 2\pi\nu$ e

$E_0 = c\, B_0$

$B = \mu\, H$

→ $\mathbf{I} = \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu = E_0^2 / 2c\mu\, \hat{\imath}_x$

La propagazione dell'onda EM nei mezzi omogenei privi di sorgenti e con perdite

L'onda EM risente delle perdite del mezzo:

$|E| = E_0 \exp(-\alpha x/2)$

L'intensità di luce decade esponenzialmente nel mezzo:

$\mathbf{I} = E_0^2 \exp(-\alpha x) / 2c\mu\, \hat{\imath}_x = I_0 \exp(-\alpha x)\, \hat{\imath}_x$

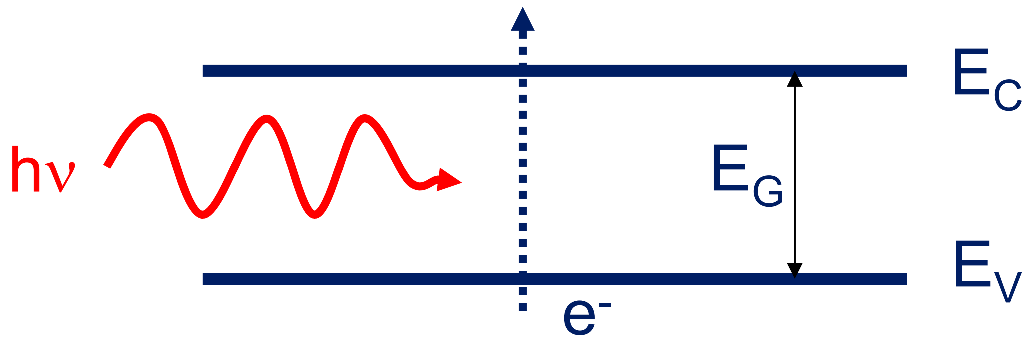
con α [cm^{-1}] – costante di attenuazione intrinseca del mezzo, dipendente dalla conducibilità e dalla frequenza dell'onda EM.

In un metallo è $\alpha \rightarrow \infty$ e quindi si parla di "effetto pellicolare": lo spessore di penetrazione $1/\alpha$ di un'onda EM nel visibile è molto piccolo (~ nm).

I dielettrici invece sono senza perdite, cioè trasparenti.

Assorbimento della radiazione in silicio (generazione ottica) -I

L'onda EM che propaga nel silicio con intensità di modulo $I = I_0 \exp(-\alpha x)$ viene assorbita a causa della generazione ottica:

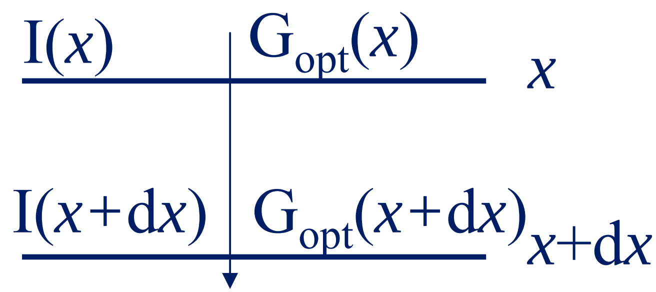


CASO IDEALE: ogni fotone genera una coppia elettrone-lacuna

$$\mathrm{I}(x) = \frac{\Phi}{A} = h\nu \frac{\Phi_{\mathrm{ph}}(x)}{A} = h\nu \frac{\mathrm{d}N_e}{\mathrm{d}t}\frac{1}{A}$$

M. Rudan "Tavole di Microelettronica"- Pitagora Editrice Bologna \

Assorbimento della radiazione in silicio (generazione ottica) -II



$$\mathrm{I}(x) = \frac{\Phi}{A} = h\nu \frac{\Phi_{\mathrm{ph}}(x)}{A}$$

$$-\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x} = h\nu \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial N_e}{\partial t} \right) = h\nu \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{A} \frac{\partial N_e}{\partial x} \right) = h\nu \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{\mathrm{opt}}$$

numero di coppie e-h generato a causa dell'assorbimento di un fotone nell'unità di volume e di tempo ($\mathrm{cm}^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$).

$$G_{\mathrm{opt}} = -\frac{1}{h\nu} \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x} = \alpha \frac{I_0}{h\nu} \exp(-\alpha x)$$

Assorbimento della radiazione in silicio (generazione ottica) -III

CASO NON IDEALE:

non tutti i fotoni assorbiti generano una coppia e-h.

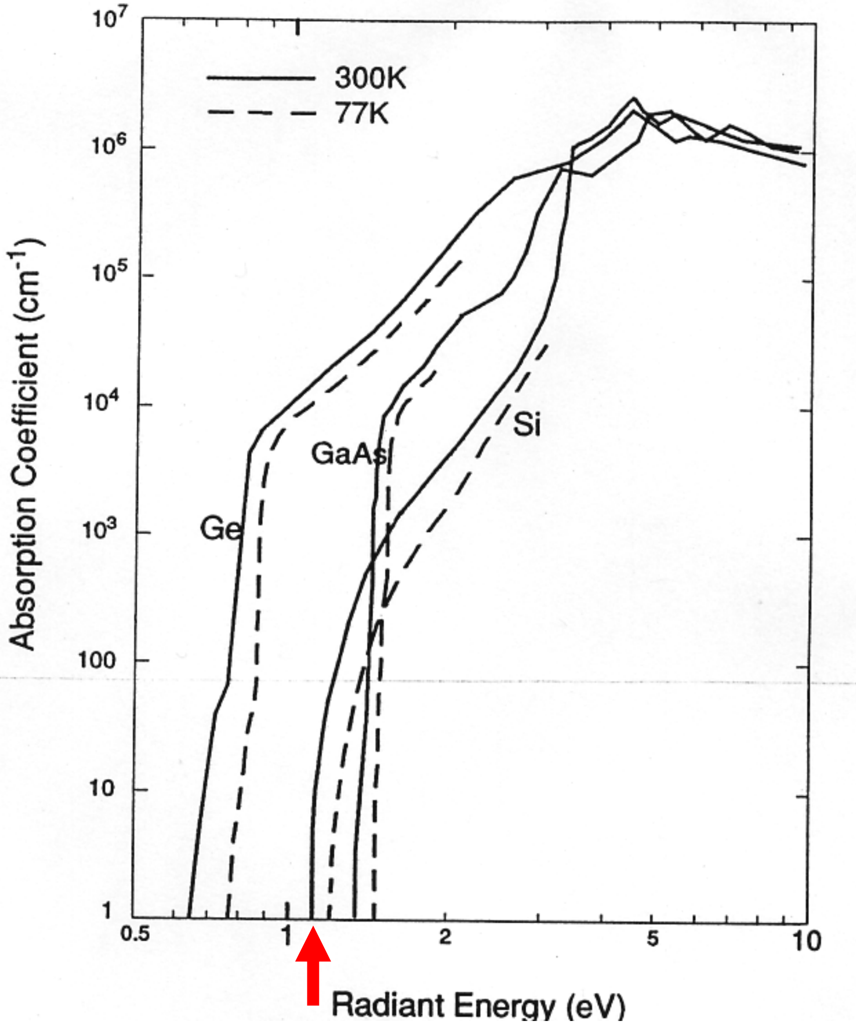
Meccanismi concorrenti:

1. **eccitazione di vibrazioni reticolari**
2. **collisione di elettroni già in banda di conduzione**
3. **eccitazione di elettroni in banda di valenza che rimangono in b.v.**
4. **eccitazione di elettroni in banda di valenza che vanno in stati trappola**
5. **generazione ottica diretta**

$$G_{\mathrm{opt}} = -\frac{\eta}{h\nu}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x} = \alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}\exp(-\alpha x)$$

η – efficienza quantica intrinseca del silicio

Il coefficiente di assorbimento in silicio



$$\alpha = A(h\nu - E_G)^{3/2}$$

A_{Si} = 3,33 x 10^3 cm^{-1}

1,12 energie (eV) 10

2,7e14 frequenze (Hz) 2,4e15

1100 λ(nm) 125

750 380

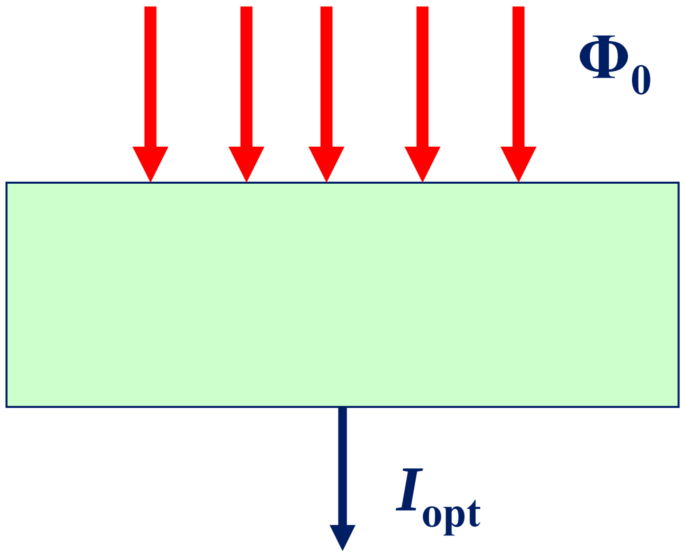
S. M. Sze "Semiconductor Sensors", Wiley Interscience

La sensibilità intrinseca del silicio-I

La sensibilità intrinseca del silicio è

$$S(\lambda) = \frac{I_{opt}}{\Phi_0} = \frac{\text{fotocorrente}}{\text{flusso (o potenza) dell'onda incidente}}$$

$$S(\lambda) = \frac{I_{opt}}{\Phi_0} = \frac{AJ_{opt}}{AI_0}$$



La sensibilità intrinseca del silicio-II

La densità di corrente fotogenerata in silicio è:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q}\nabla \cdot \boldsymbol{J}_n = G_{opt} - U_{SRH}$$

HP1- condizioni stazionarie

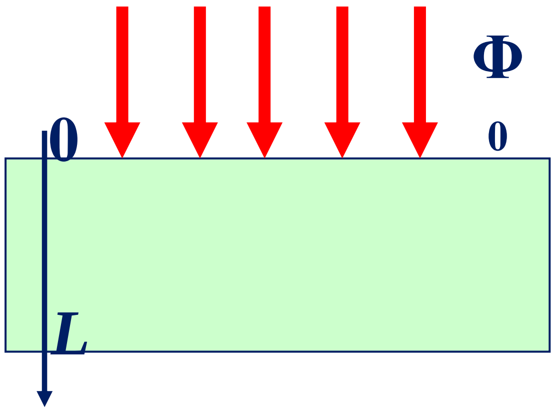
HP2- $G_{opt} >> U_{SRH}$

HP3- condizione1D

$$\frac{\mathrm{d}J_n}{\mathrm{d}x} = -qG_{opt} = -q\alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}\exp(-\alpha x)$$

$$J_{opt} = q\alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}\int_0^L \exp(-\alpha x)dx$$

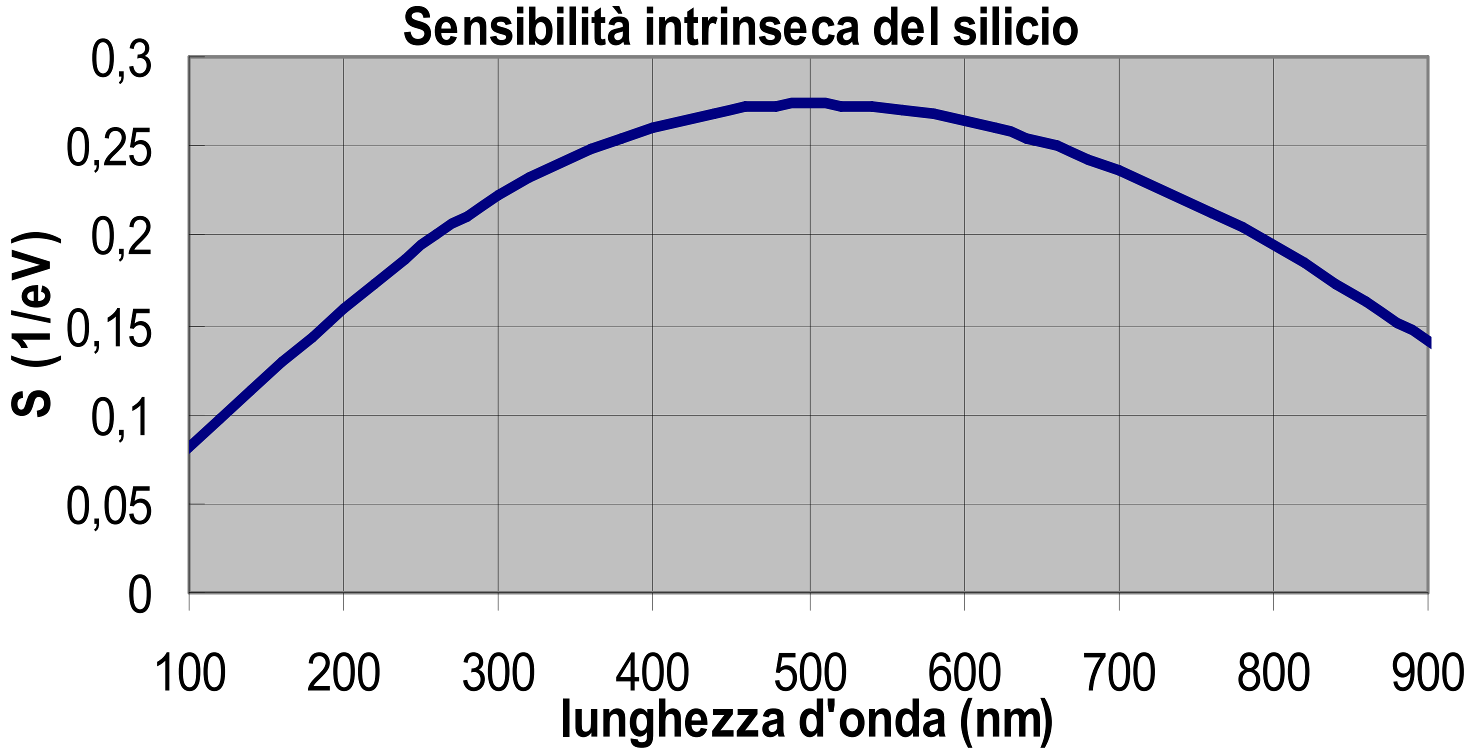
$$= -q\frac{\eta I_0}{h\nu}\left[\exp(-\alpha x)\right]_0^L = q\frac{\eta I_0}{h\nu}\left[1-\exp(-\alpha L)\right]$$



La sensibilità intrinseca del silicio-III

La sensibilità intrinseca del silicio è

$$S(\lambda) = \frac{J_{opt}}{I_0} = \frac{q\eta}{hc}\lambda\left[1 - \exp(-\alpha L)\right]$$



Sensori ottici

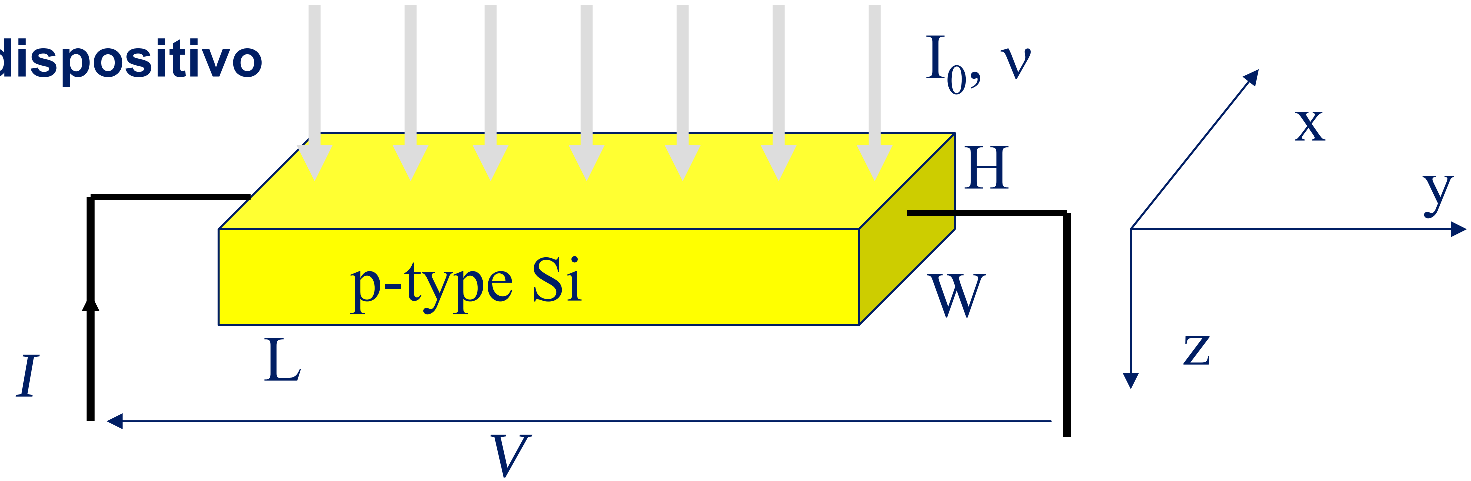
Caratterizzazione dei sensori ottici:

- tipi di dispositivi, circuito di lettura (read-out) e modello del sensore (sensibilità)

1. fotoresistenza
2. fotodiodo
3. fototransistore bipolare e fototransistore MOS
4. fotocondensatore MOS
5. CCD – Charge Coupled Devices

Fotoresistenza

dispositivo



HP1- silicio drogato uniformemente con N_A costante

$$R_0 = \rho_0 L_0/(W_0 H_0) = L_0/(W_0 H_0)\ 1/(qN_A\mu_p)$$

HP2- onda incidente con intensità $\mathbf{I_0} = I_0\,\mathbf{i_z}$ e frequenza ν

HP3- $H \ll 1/\alpha(\nu)$ → posso considerare una generazione ottica costante in z:

$$G_{\mathrm{opt}} = \alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}e^{-\alpha z} \simeq \alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}$$

Fotoresistenza

modello

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q}\nabla \cdot \boldsymbol{J}_n = G_{opt} - U_{SRH}$$

HP4- condizione quasi-stazionaria

HP5- J=0 lungo z →

$$G_{opt} - U_{SRH} = 0$$

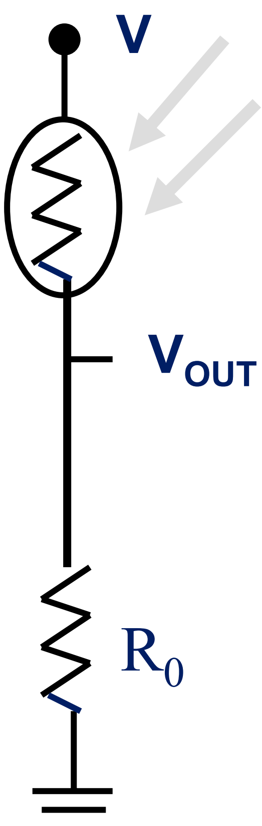
$$U_{\mathrm{SRH}} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \rightarrow \Delta n = \Delta p = \tau_n \alpha \frac{\eta I_0}{h\nu}$$

$$\Delta\sigma = q(\Delta p \mu_p + \Delta n \mu_n) = q\tau_n \alpha \frac{\eta I_0}{h\nu}(\mu_p + \mu_n)$$

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = -\tau_n \alpha \frac{\eta I_0}{h\nu}\frac{(\mu_p + \mu_n)}{N_A \mu_p}}$$

Fotoresistenza

circuito di lettura



$$\frac{\Delta V_{\rm out}}{V} = -\frac{1}{4}\frac{\Delta R}{R_0}$$

sensibilità del sensore:

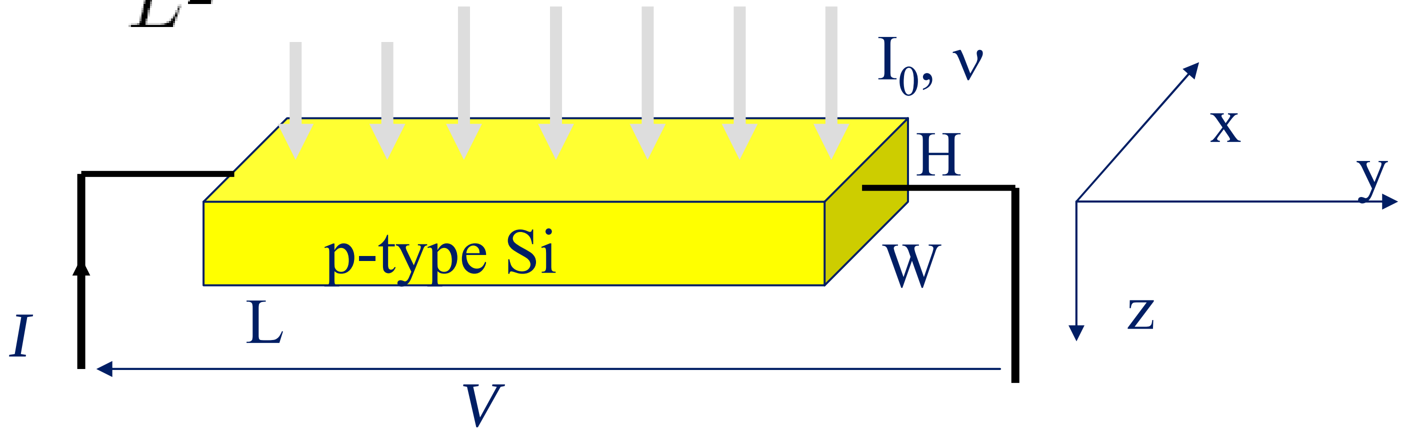
$$S_V = \frac{\Delta V_{\rm out}}{I_0 V} = -\frac{1}{4}\frac{\Delta R}{I_0 R_0} = \frac{1}{4}\tau_n \alpha \frac{\eta}{h\nu}\frac{(\mu_p+\mu_n)}{N_A \mu_p}$$

guadagno di fotoconduttività del fotoresistore:

$$A_F = \frac{\Delta I}{I_{\text{opt}}}$$

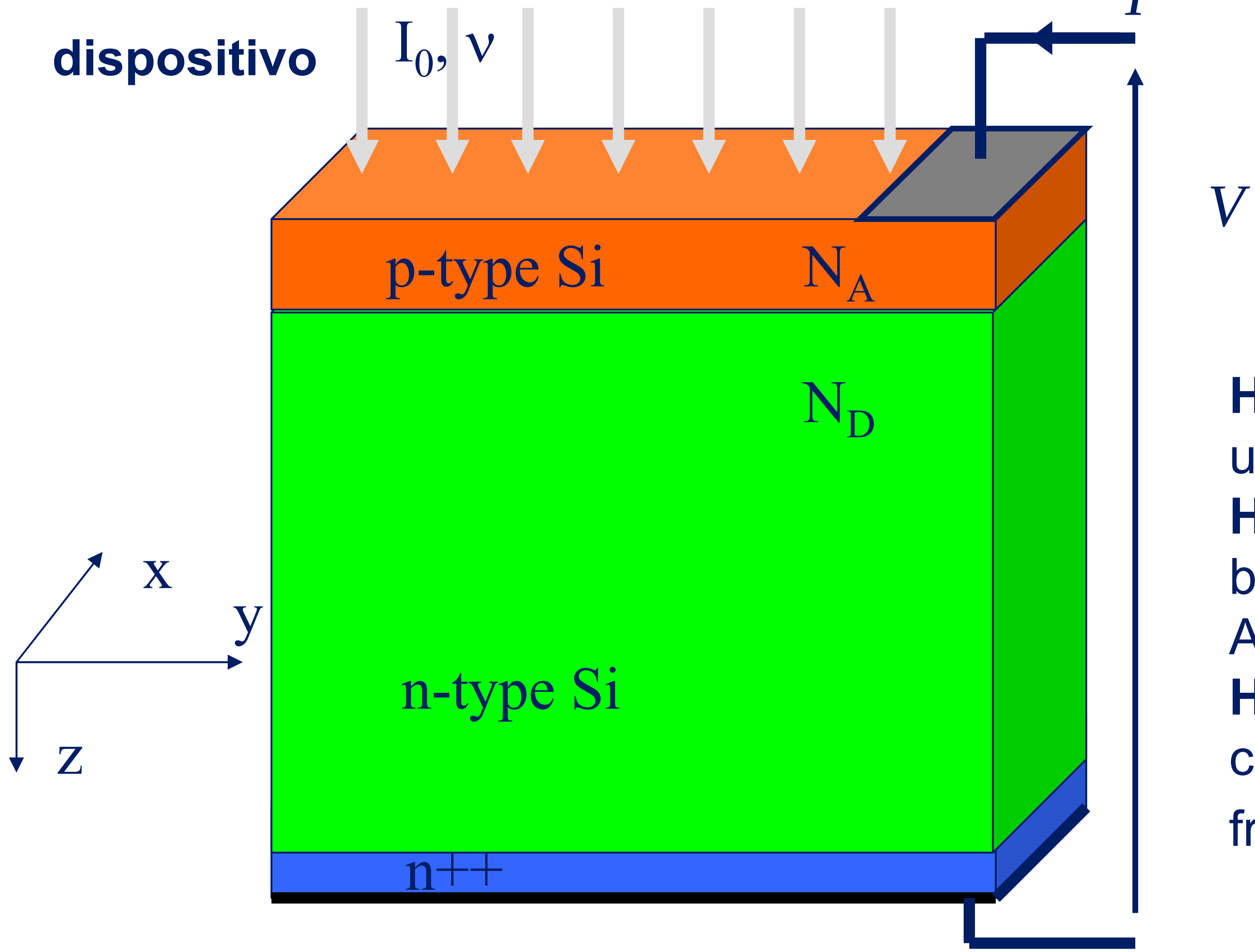
$$\Delta I = HW\Delta\sigma E \qquad I_{\text{opt}} = LW\int_0^H qG_{\text{opt}}\,\mathrm{d}z$$

$$A_F = \frac{(\mu_p + \mu_n)\tau_n V}{L^2}$$



Fotodiodo

dispositivo

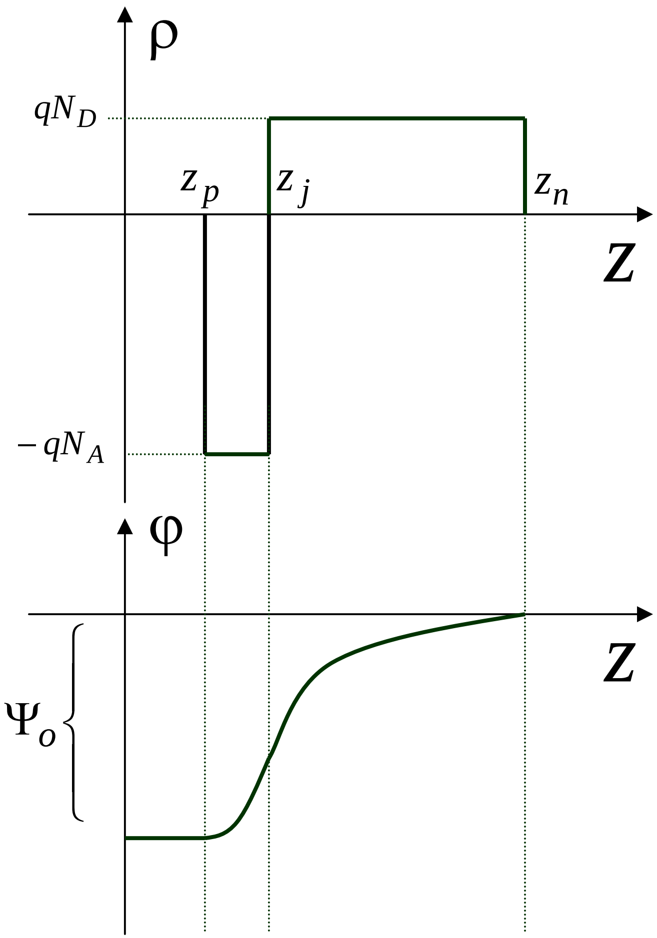


HP1- silicio drogato uniformemente in (x,y)
HP2- giunzione pn brusca (condizione ASCE)
HP3- onda incidente con intensità $\mathbf{I_0} = I_0\,\mathbf{i_z}$ e frequenza ν

Fotodiodo

funzionamento della giunzione pn:

$$V = 0$$



$$z_n - z_j = l_n$$

$$z_p - z_j = -l_p$$

$$l = l_n + l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \Psi_o}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

$$\Psi_o = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Fotodiodo

funzionamento della giunzione pn:

$$V \neq 0 \qquad\qquad l(V) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\Psi_o - V)}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

Fotodiodo

funzionamento della giunzione pn:

$$J = J_s\left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1\right) + J_u$$

$$J_s = qn_i^2\left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\frac{1}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\frac{1}{N_A}\right)$$

$$J_u = \int_{z_p}^{z_n} qU_{SRH}\,dz$$

$$V < 0$$

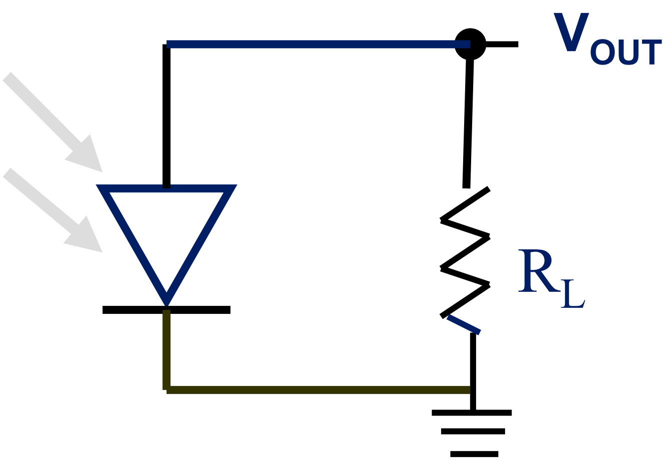
$$J_u = -q\frac{n_i}{\tau_g}l(V); \qquad J_s \ll J_u \rightarrow J = J_u$$

Fotodiodo

modello del fotodiodo

$$J_{\mathrm{opt}} = \int_0^H qG_{\mathrm{opt}}(z)\mathrm{d}z = \int_0^l q\alpha\frac{\eta I_0}{h\nu}e^{-\alpha z}\mathrm{d}z = q\frac{\eta I_0}{h\nu}(1 - e^{-\alpha l})$$

circuito di lettura



$$\Delta V_{\mathrm{out}} = R_L I_{\mathrm{opt}}$$

sensibilità del sensore:

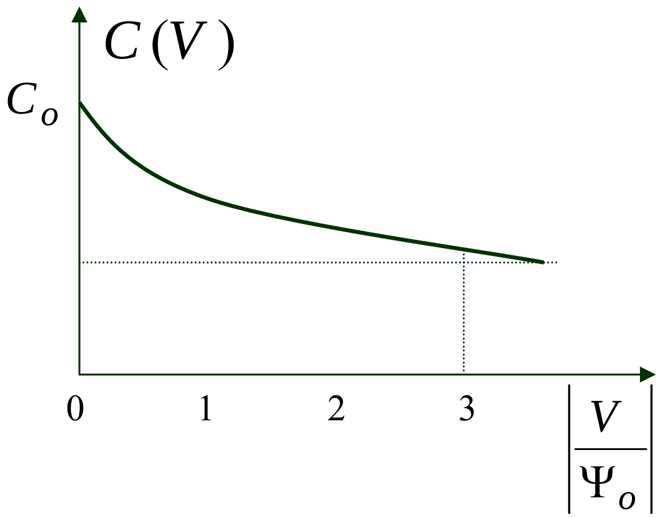
$$S = \frac{\Delta V_{\mathrm{out}}}{I_0} = R_L(WL)q\frac{\eta}{h\nu}(1 - e^{-\alpha l})$$

guadagno di fotoconduttività del fotodiodo: $$A_F = \frac{\Delta I}{I_{\mathrm{opt}}} = 1$$

Fotodiodo in accumulo di carica (storage-mode)

capacità di barriera:

$$C = \frac{\varepsilon_s}{l(V)} = \frac{c_o}{\sqrt{1 - \dfrac{V}{\Psi_o}}}$$



$$\frac{dQ}{dt} = C(V)\frac{dV}{dt} \rightarrow \Delta Q = \int_0^{t_1} C\frac{dV}{dt}dt =$$

$$= 2C_o\Psi_o\left(\sqrt{1 - \frac{V(t=0)}{\Psi_o}} - \sqrt{1 - \frac{V(t=t_1)}{\Psi_o}}\right)$$

illuminamento con I_0 costante:

$$J_{opt} = +q\frac{\eta I_o}{h\upsilon}\left[1-e^{-\alpha l}\right] \; ; \quad J_{opt} \text{ costante e } \propto I_o$$

$$\frac{dQ}{dt} = J_{opt} \rightarrow \Delta Q = J_{opt}t_1 = J_{opt}T_i \,, \qquad T_i - \text{tempo d'integrazione}$$

$$V(t=0) = V_o$$

$$V(t=1) = V_1$$

$$J_{opt}T_i = 2C_o\Psi_o\left(\sqrt{1-\frac{V_o}{\Psi_o}} - \sqrt{1-\frac{V_1}{\Psi_o}}\right)$$

illuminamento con I_0 costante:

$$\tau = \frac{C_o \Psi_o}{J_{opt}}$$ tempo di carica di C_o da 0 a Ψ_0 con densità di corrente costante

$$T_i = 2\tau\left(\sqrt{1-\frac{V_o}{\Psi_o}} - \sqrt{1-\frac{V_1}{\Psi_o}}\right)$$

$$T = \frac{C_o \Psi_o}{J_{opt}}\sqrt{1-\frac{V_o}{\Psi_o}} = \frac{C(V_o)}{J_{opt}}\left(\Psi_o - V_o\right)$$

tempo di carica di $C(V_o)$ da V_o a Ψ_o con densità di corrente costante

$$T_i = 2T - 2\tau\sqrt{1-\frac{V_1}{\psi_o}}$$

illuminamento con I_0 costante:

$$T_i = 2T - 2\tau\sqrt{1-\frac{V_1}{\Psi_o}}$$

$$\frac{2T - T_i}{2\tau} = \sqrt{1-\frac{V_1}{\Psi_o}}$$

$$V_1 = \Psi_o\left[1-\left(\frac{T-\frac{T_i}{2}}{\tau}\right)^2\right] = \Psi_o\left[1-\left(\frac{T}{\tau}\right)^2\left(1-\frac{T_i}{2T}\right)^2\right]$$

$$\left(\frac{T}{\tau}\right)^2 = \frac{C^2(V_o)(\Psi_o - V_o)^2}{C_o^2\Psi_o^2} = \frac{\cancel{C_o^2}}{\left(1-\frac{V_o}{\Psi_o}\right)}\left(1-\frac{V_o}{\Psi_o}\right)^2\frac{\cancel{\Psi_o^2}}{\cancel{\Psi_o^2}}\frac{1}{\cancel{C_o^2}} = \left(1-\frac{V_o}{\Psi_o}\right)$$

illuminamento con I_0 costante:

$$T_i << T$$

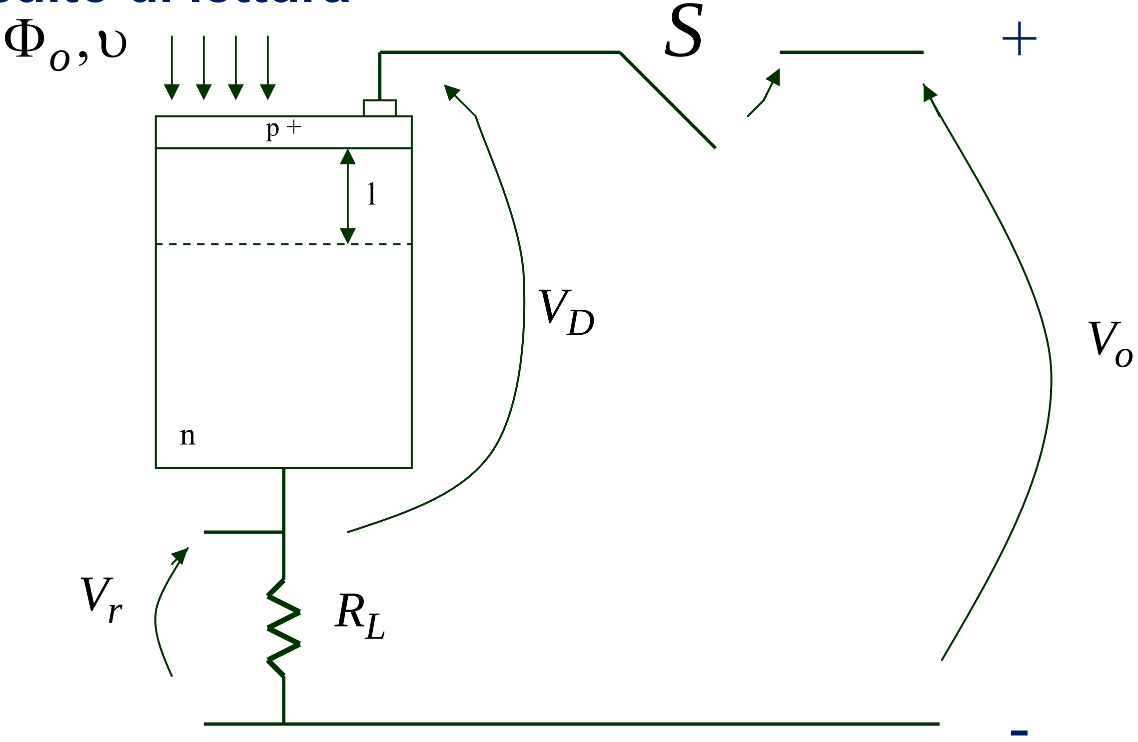
$$V_1 = \Psi_o + \left(V_o - \Psi_o\right)\left(1 - \frac{T_i}{2T}\right)^2 \cong \Psi_o + \left(V_o - \Psi_o\right)\left(1 - \frac{T_i}{T}\right) =$$

$$= V_o + \left(\Psi_o - V_o\right)\frac{T_i}{T} = V_o + \frac{J_{opt}}{C(V_o)}T_i$$

$$\Delta V = \frac{J_{opt}}{C(V_o)}T_i$$

(modello del fotodiodo in storage-mode)

circuito di lettura

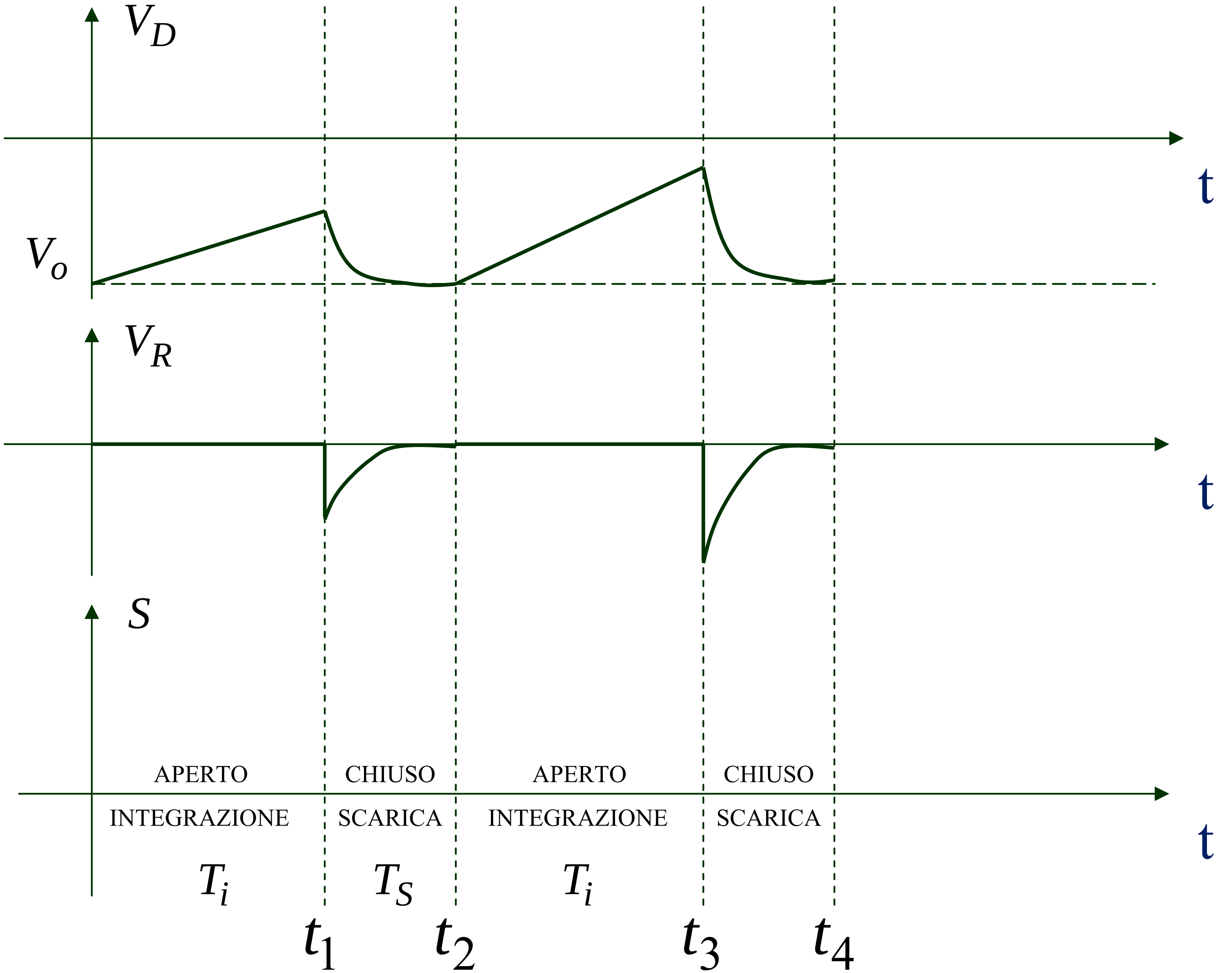


A) $t=0$ S aperto $\rightarrow I=0, V_R=0, V_D(t=0)=V_o$

illuminamento costante $\longrightarrow$ accumulo di carica

B) $t=T_i$ S chiuso $\rightarrow I_R = \dfrac{\Delta V_R}{R_L} = \dfrac{V_o - V_D(T_i)}{R_L} = -\dfrac{J_{opt} T_i}{C(V_o) R_L}$

circuito di lettura



Fotodiodo in accumulo di carica (storage-mode)

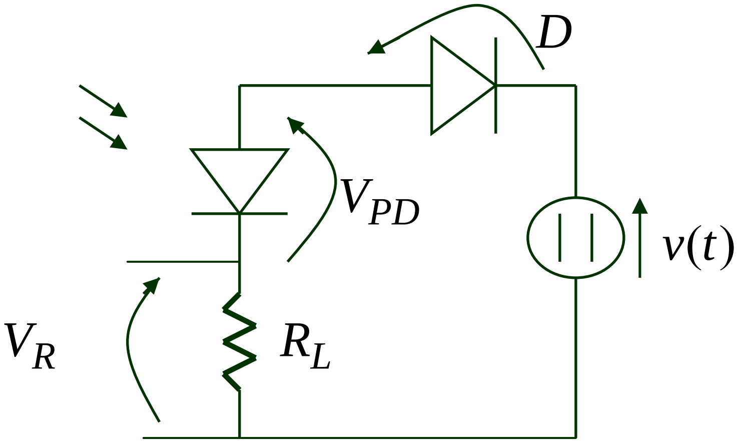
sensibilità del sensore:

$$S = \frac{\Delta V_{\text{out}}}{I_0} = \frac{J_{\text{opt}} T_i}{C(V_0) I_0} = \frac{q \eta T_i}{C(V_0) h\nu}$$

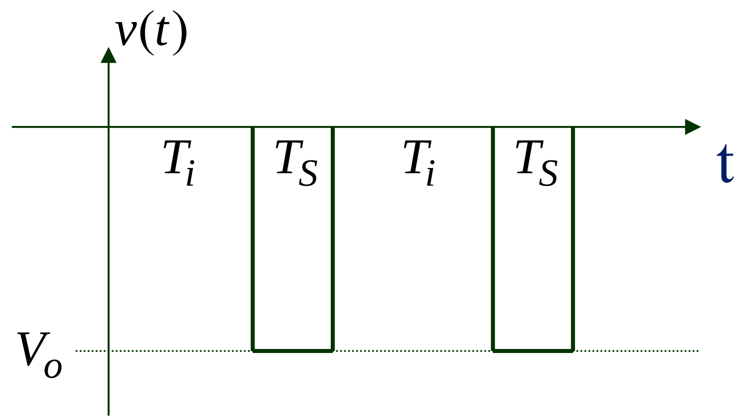
guadagno di fotoconduttività

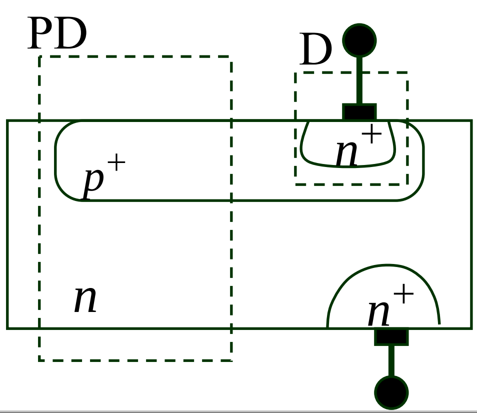
$$A_F = \frac{|I_R|}{I_{\text{opt}}} = \frac{T_i}{W L C(V_0) R_L}$$

Fototransistori bipolare e MOS



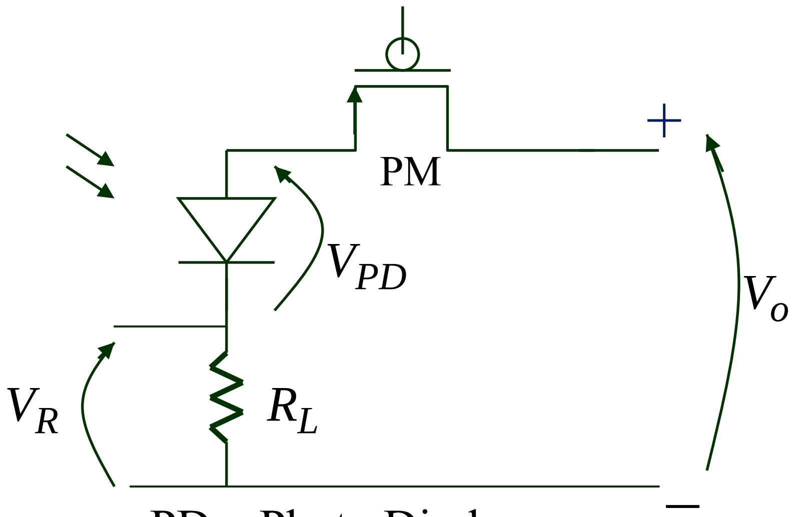
PD – Photo Diode
D – Diode (V_γ)

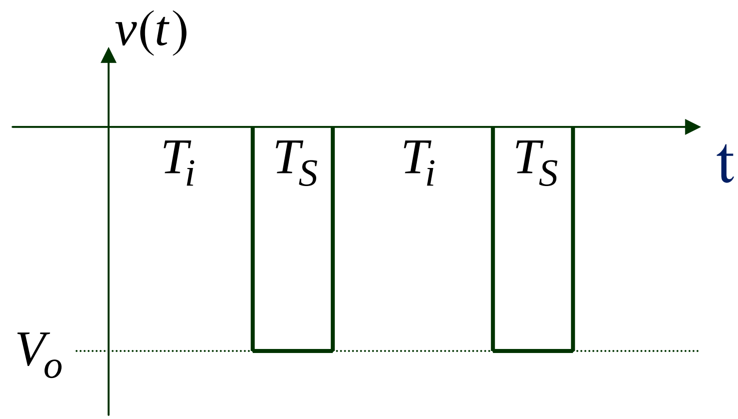




FOTOTRANSISTORE BJT

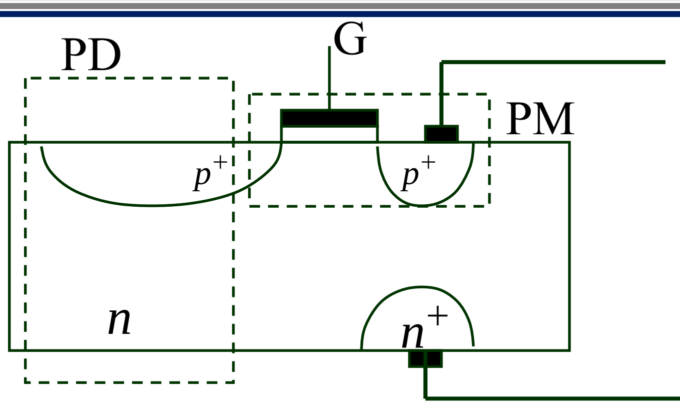
Fototransistori bipolare e MOS





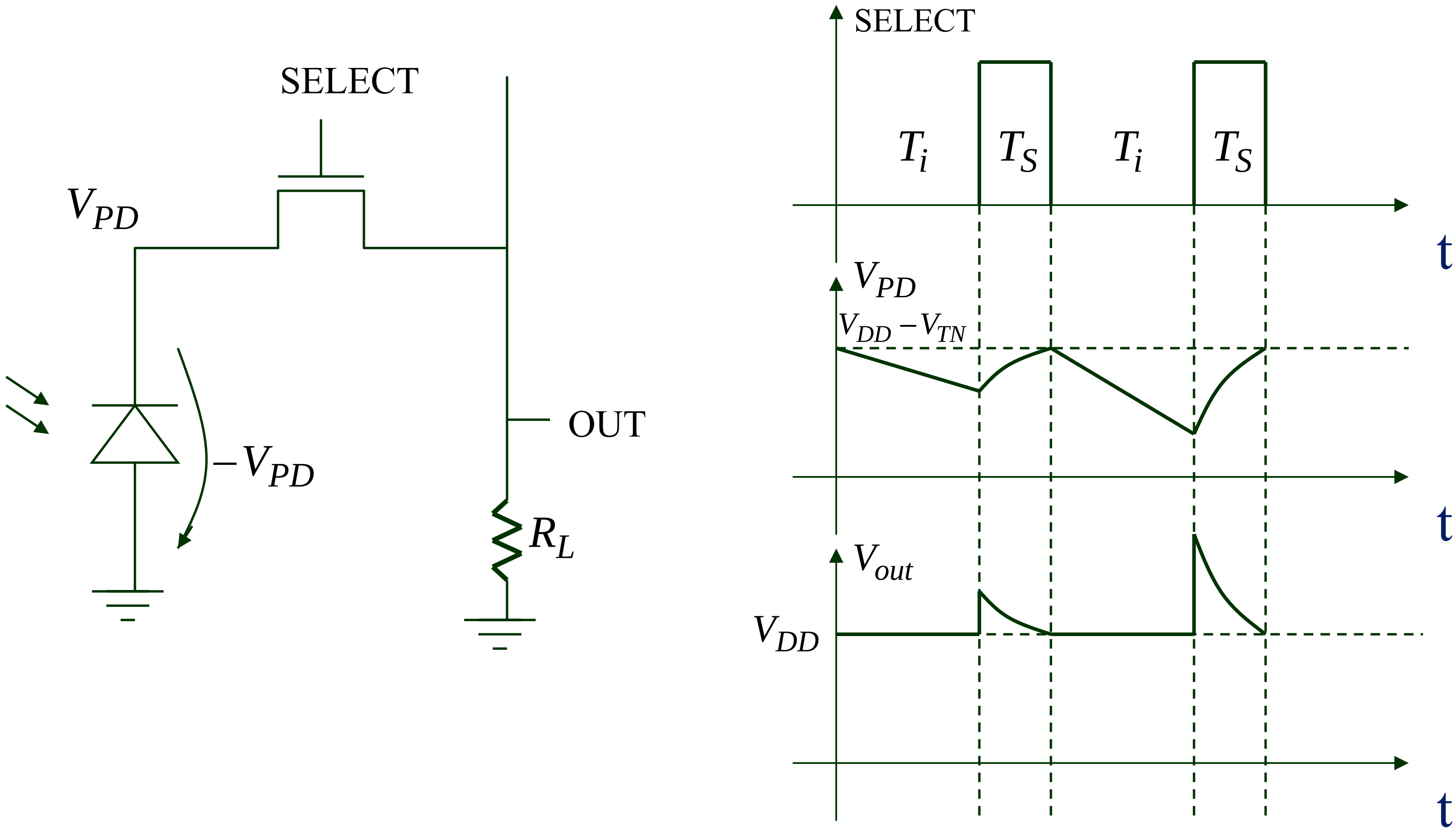
PD – Photo Diode

PM – p-channel MOSFET

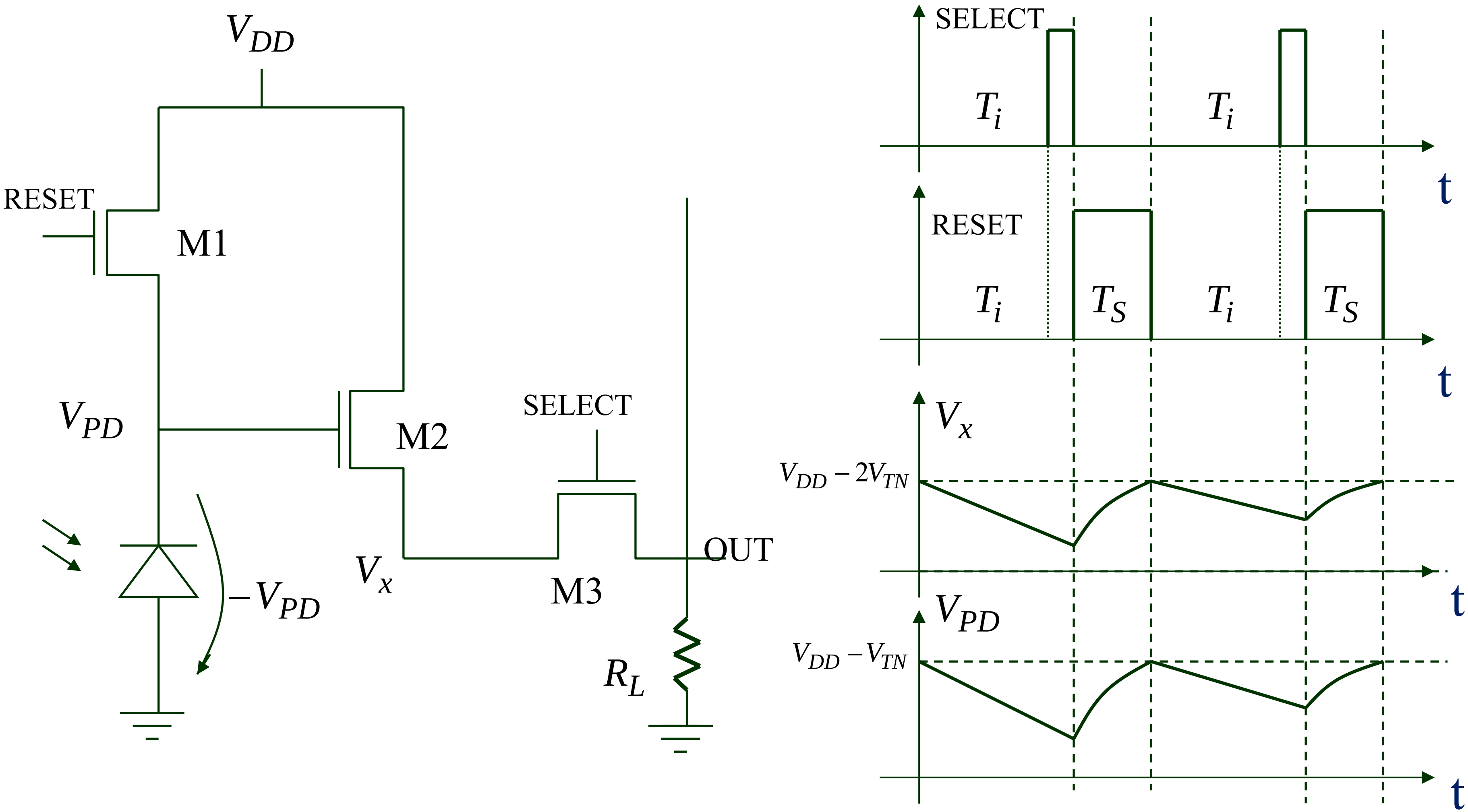


FOTOTRANSISTORE MOS

PIXEL PASSIVO o 1T

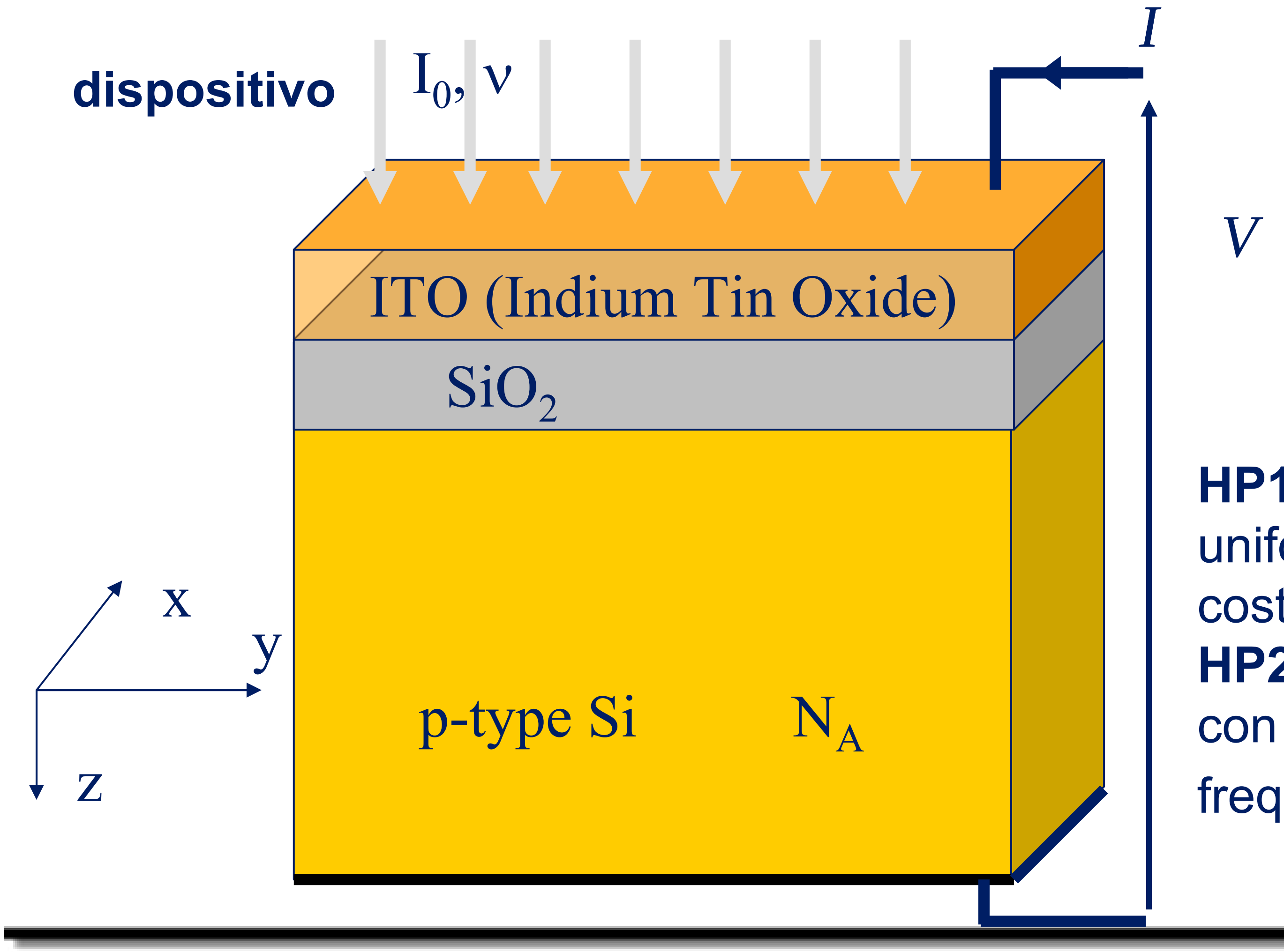


PIXEL ATTIVO o 3T



Fotocondensatore MOS

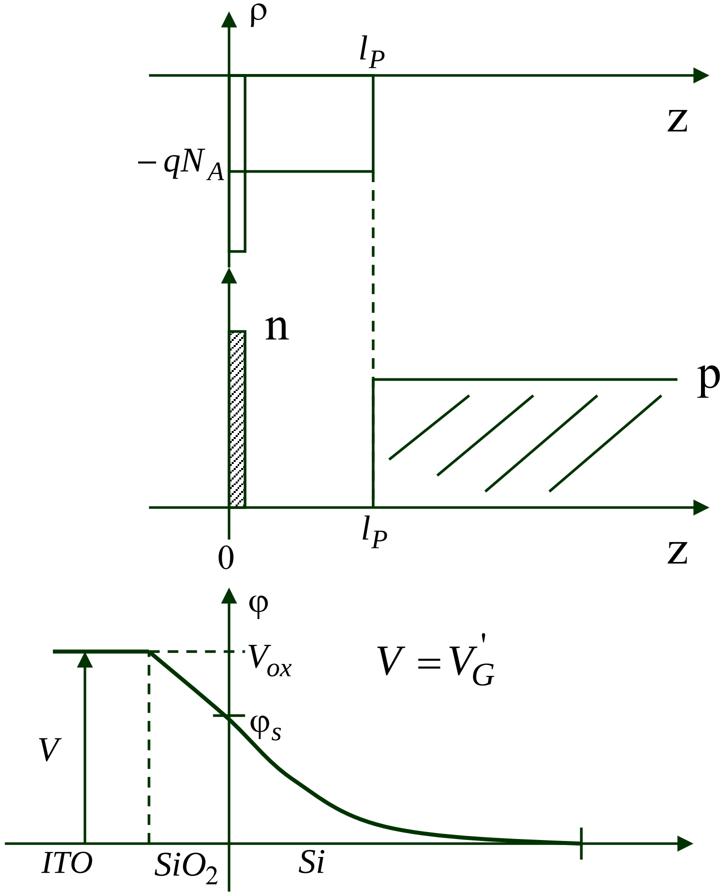
dispositivo



HP1- silicio drogato uniformemente (N_A costante)
HP2- onda incidente con intensità $\mathbf{I_0} = I_0\, \mathbf{i_z}$ e frequenza ν

Fotocondensatore MOS

funzionamento del condensatore MOS in regime stazionario:



carica nel smc:

$$Q_{SC} = -C_{ox}(V_G' - \varphi_S)$$

carica di svuotamento:

$$Q_B = -qN_A l_p$$

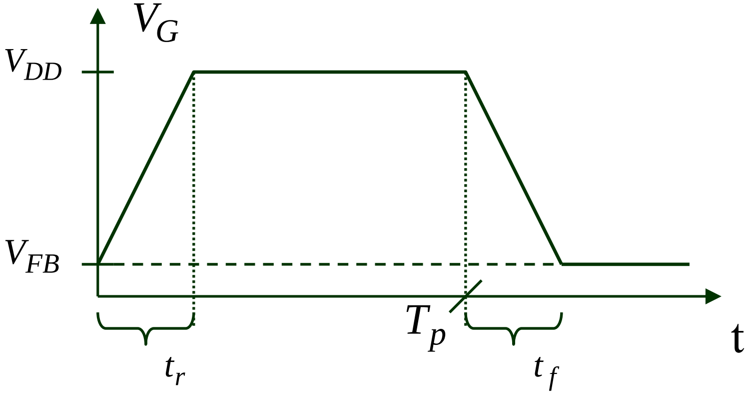
carica di inversione:

$$Q_i = Q_{SC} - Q_B = -C_{ox}(V_G' - \varphi_S - \gamma\sqrt{\varphi_S})$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_{ox}}$$

Fotocondensatore MOS

funzionamento del condensatore MOS in <u>regime impulsato</u>:



$$\tau_d << t_r, t_f << \tau_n, \tau_p$$

$$t_r = t_f$$

τ_d : tempo di rilassamento dielettrico

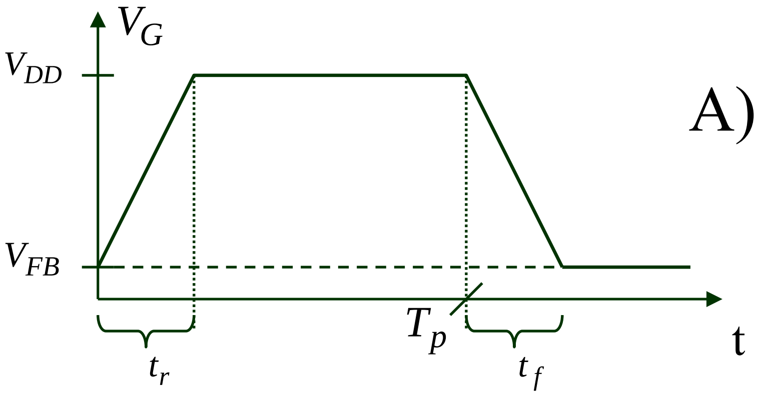
$$\tau_d = \frac{\varepsilon_s}{\sigma} \cong 10\,ps$$

τ_n, τ_p : tempo di vita degli elettroni e delle lacune

$$\tau_n, \tau_p \cong 1 \div 10 \mu s$$

Fotocondensatore MOS

funzionamento del condensatore MOS in regime impulsato:



A) $t : 0 \to 0^+ = t_r$

$$Q_i = 0$$

$$V_G^{'} = V_H = (V_{DD} - V_{FB})$$

$$\varphi_S(t = 0^+) = V_H + \frac{1}{2}\gamma^2\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4V_H}{\gamma^2}}\right)$$

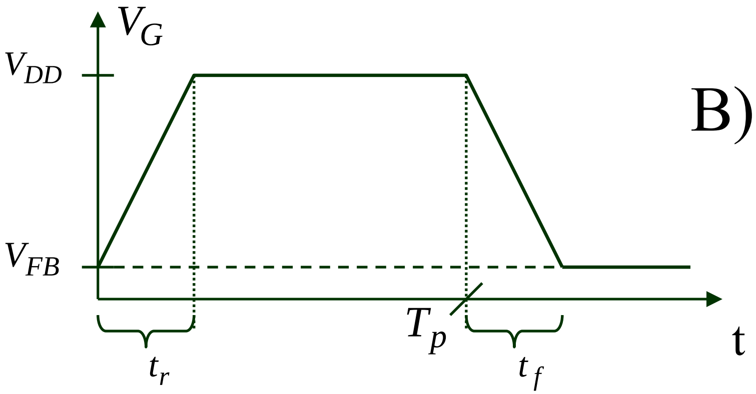
$$\varphi_S(t = 0^+) > \varphi_S^{eq}$$

$$l_p(t = 0^+) > l_p^{eq}$$

CONDIZIONE DI SVUOTAMENTO PROFONDO

Fotocondensatore MOS

funzionamento del condensatore MOS in regime impulsato:



B) $t > 0^+$

$$Q_i(t) \cong \left.\frac{dQ_i}{d\varphi_S}\right|_{\varphi_S=\varphi_S(t=0^+)} \left(\varphi_S - \varphi_S(t=0^+)\right)$$

$$\left.\frac{dQ_i}{d\varphi_S}\right|_{\varphi_S=\varphi_{SO}} = C_{ox} + \gamma C_{ox} \frac{1}{2}\frac{1}{\sqrt{\varphi_{S0}}} =$$

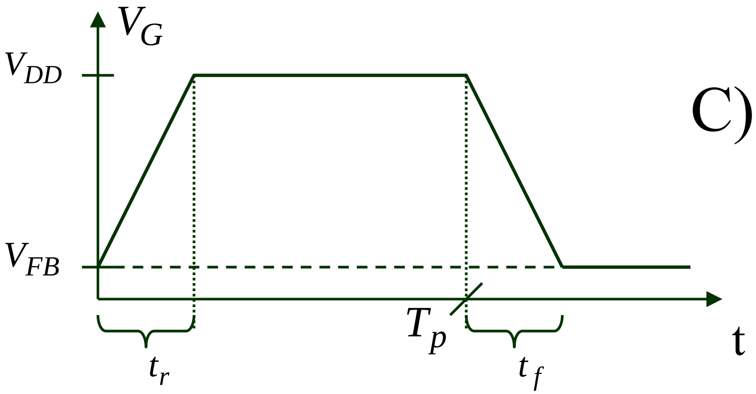
$$= C_{ox} + C_d(0^+) \cong C_{ox}$$

$$C_{ox} >> C_d(0^+)$$

$$Q_i(t) \cong C_{ox}(\varphi_S - \varphi_{S0})$$

Fotocondensatore MOS

funzionamento del condensatore MOS in <u>regime impulsato</u>:



C) $t : T_p \rightarrow T_p + t_f$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial z} - U_{SRH} ; U_{SRH} = \frac{n - n_o}{\tau_n}$$

$$Q_i = -q\int_0^L (n - n_o)dz$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = -\int_0^L \frac{\partial J_n}{\partial z}dz - \frac{Q_i}{\tau_n} = -\frac{Q_i}{\tau_n}$$

$$Q_i(t) = Q_i(T_p)e^{-t/\tau_n}$$

Fotocondensatore MOS

circuito di lettura