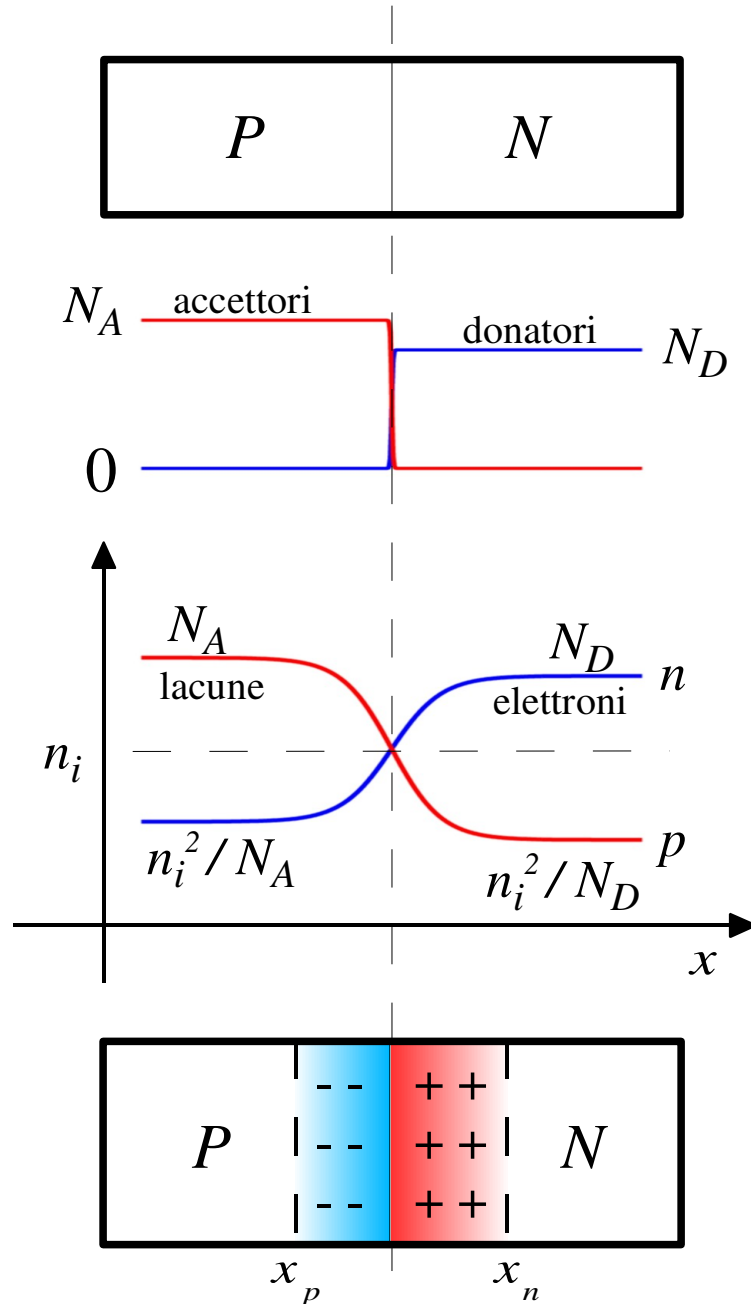


Giunzione *P-N*



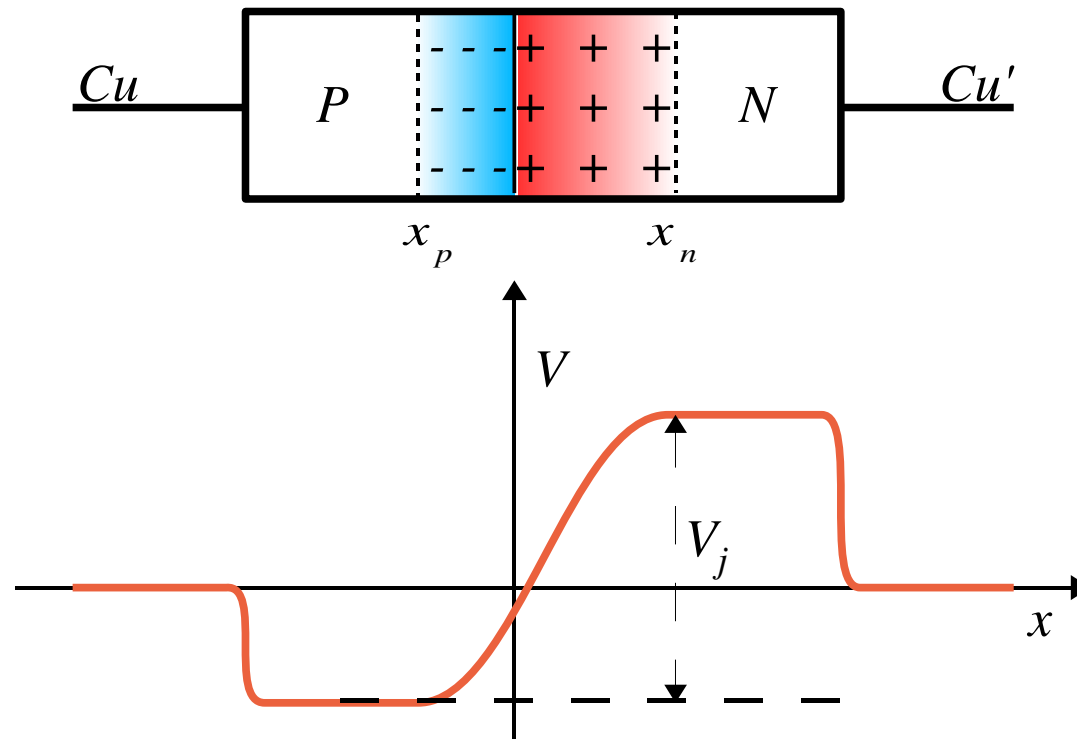
Una giunzione *P-N* e' formata dal contatto tra una regione drogata di tipo *P* ed una drogata di tipo *N*.

Profilo di concentrazione dei drogaggi per una giunzione *a gradino*. La transizione da N_A, N_D a zero puo' avvenire in poche decine di diametri atomici.

Profilo di concentrazione dei portatori di carica intorno alla giunzione (la scala verticale e' logaritmica).

Regione di carica spaziale: le lacune che diffondono da sinistra a destra e gli elettroni che diffondono da destra a sinistra lasciano una zona di carica negativa ed una positiva non neutralizzate.

Built-in potential - Potenziale della giunzione



Built-in potential - Potenziale della giunzione

$$J_n = q \mu_n n E_x + q D_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$J_p = q \mu_p p E_x - q D_p \frac{dp}{dx} = 0$$

All'equilibrio termodinamico la corrente totale di elettroni o lacune attraverso la giunzione deve essere nulla:

$$E_x = -\frac{1}{n} \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn}{dx}$$

$$-\int_{x_p}^{x_n} E_x dx = V_T \int_{x_p}^{x_n} \frac{dn}{n}$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{kT}{q} \simeq 26 \text{ mV} \quad [T = 300 \text{ K}]$$

$$V_T \cdot \log(10) \simeq 60 \text{ mV} \quad [T = 300 \text{ K}]$$

$$V_j = V_n - V_p = V_T \cdot \log(n_n / n_p)$$

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{V_j / V_T}$$

Relazione di Boltzmann – Nernst

Built-in potential - Potenziale della giunzione

Con $N_A, N_D \gg n_i$:

$$p_p = N_A \quad p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$$
$$n_n = N_D \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

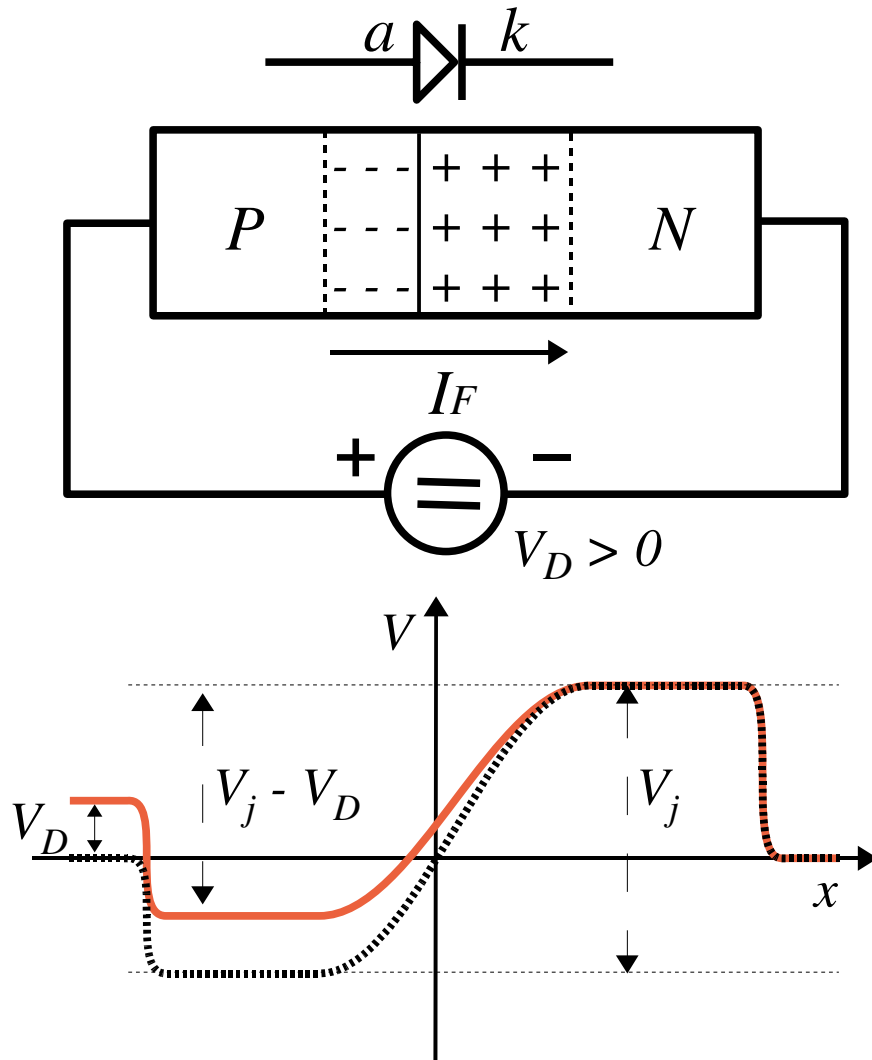
$$V_j = V_T \cdot \log\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$\frac{p_p}{p_n} = \frac{N_A N_D}{n_i^2} = \frac{n_n}{n_p}$$

Esempio: $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

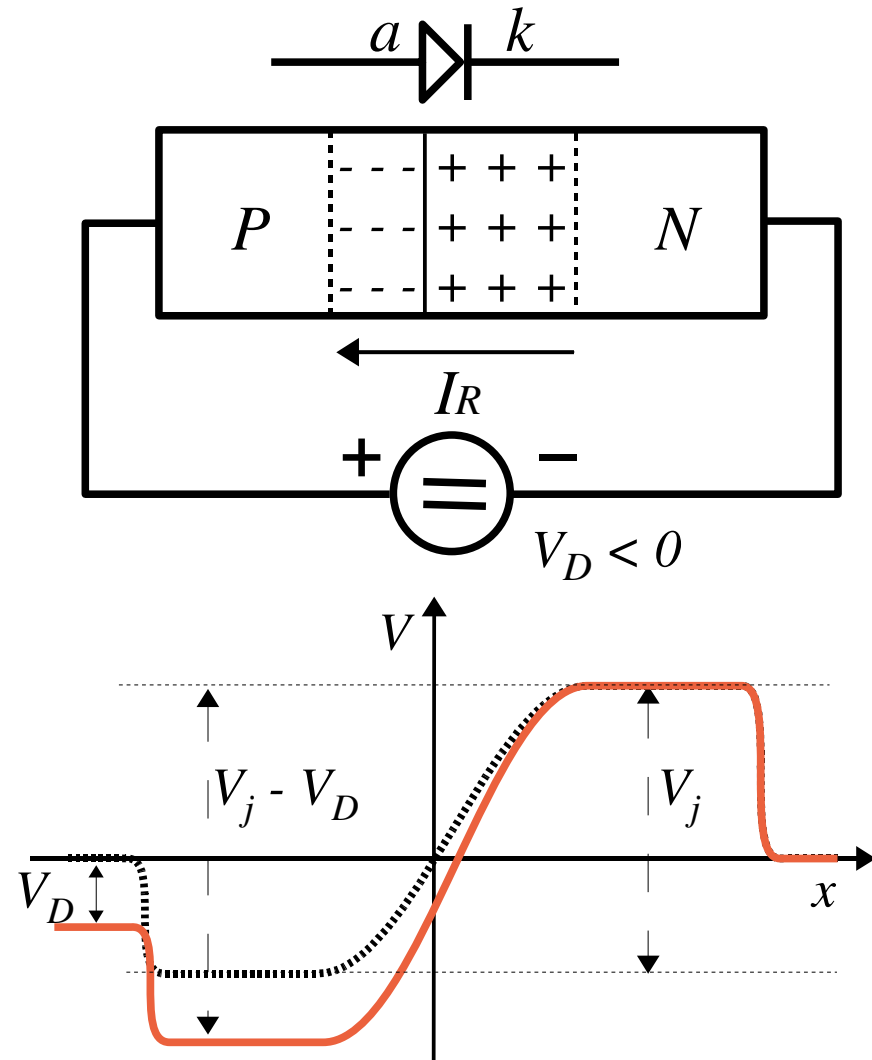
$$V_j = 26 \text{ mV} \cdot \log\left(\frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{2.3 \cdot 10^{20}}\right) = 0.82 \text{ V}$$

Polarizzazione diretta



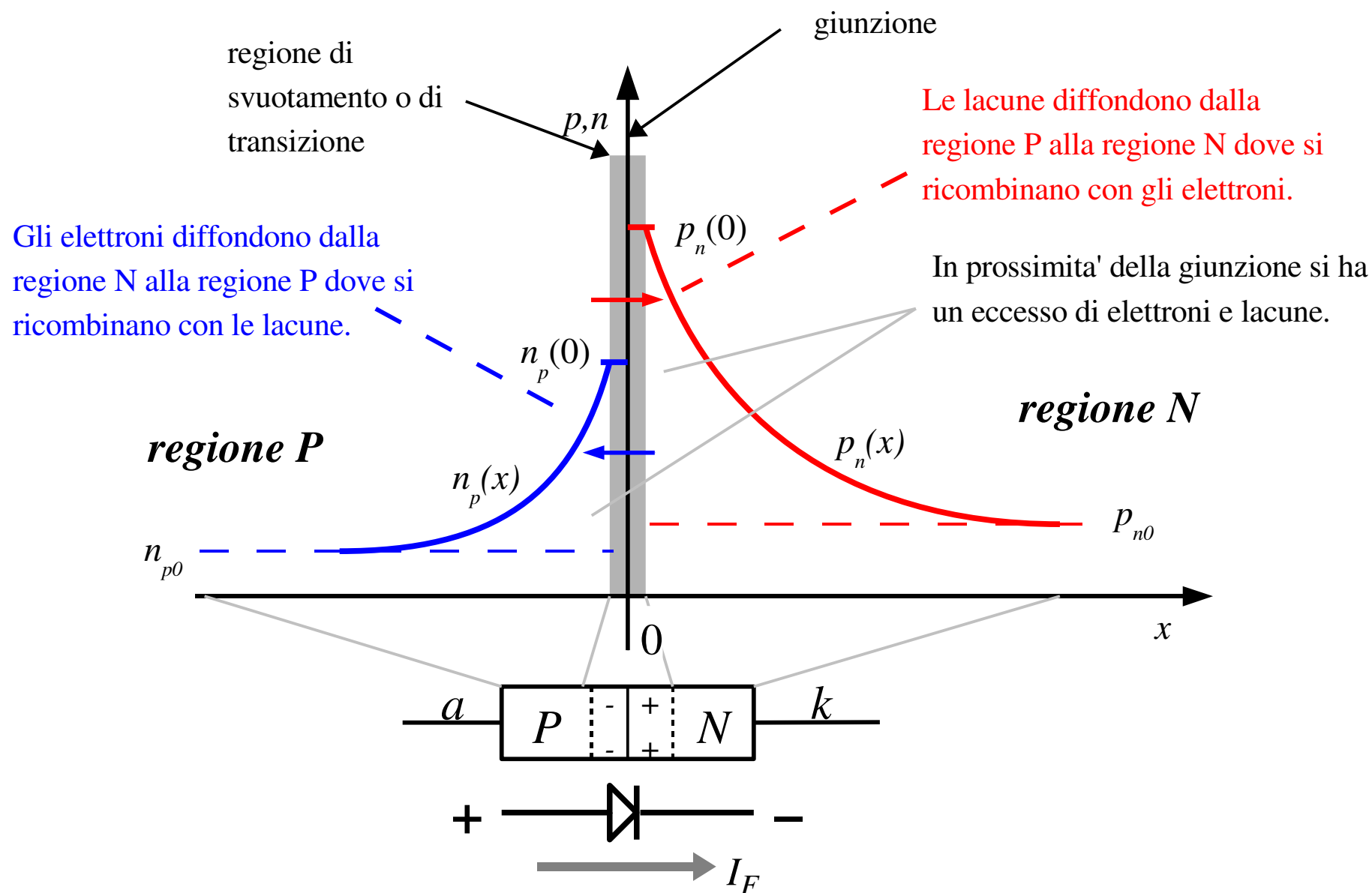
La tensione V_D riduce la barriera di potenziale e permette ai portatori di carica di attraversare la giunzione.

Polarizzazione inversa



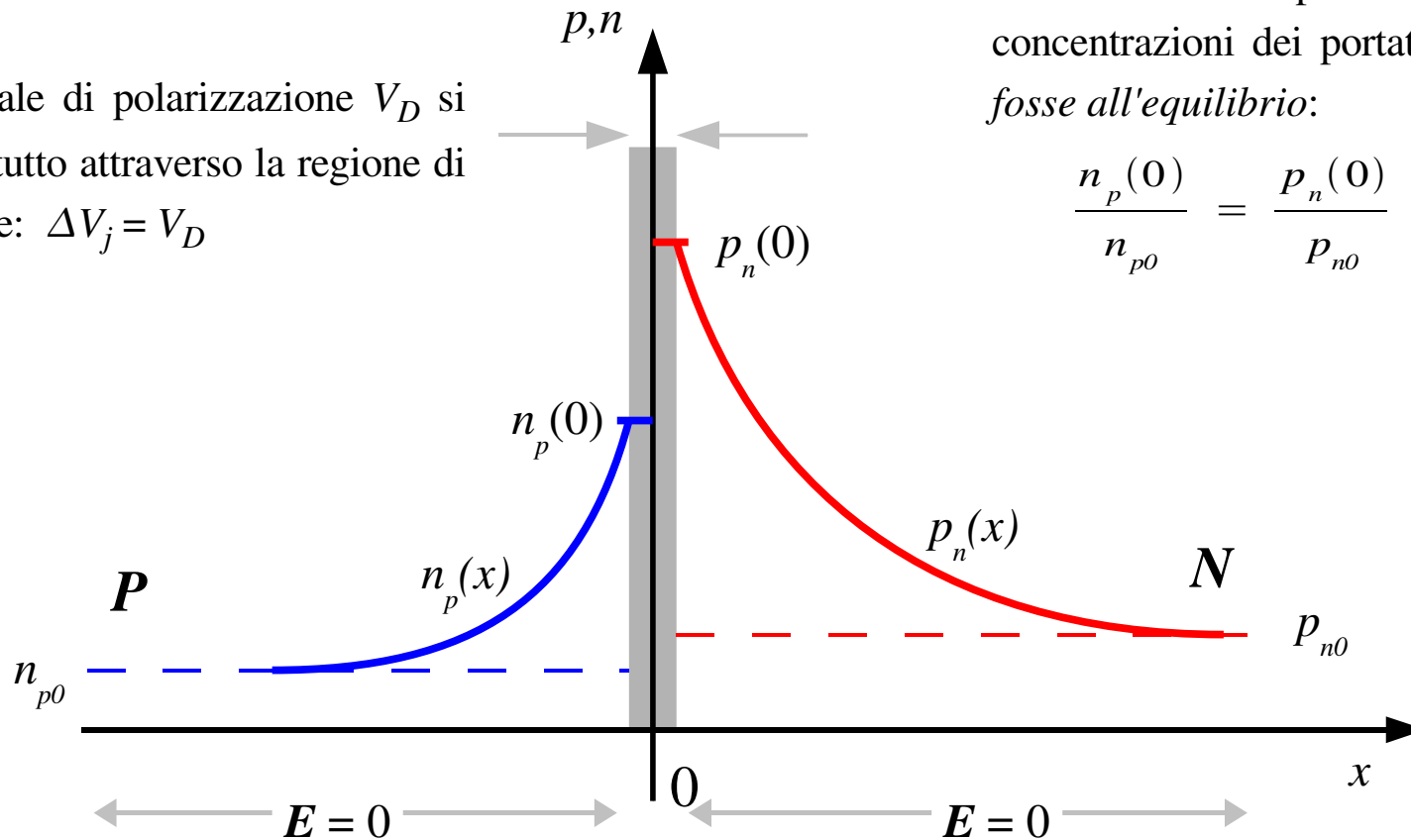
La tensione V_D fa crescere la barriera di potenziale e la corrente e' data dalle sole coppie elettrone-lacuna prodotte termicamente nella regione di transizione.

Concentrazione dei portatori minoritari in polarizzazione diretta



Concentrazione dei portatori minoritari in polarizzazione diretta

Il potenziale di polarizzazione V_D si localizza tutto attraverso la regione di transizione: $\Delta V_j = V_D$



La variazione del potenziale modifica le concentrazioni dei portatori *come se si fosse all'equilibrio*:

$$\frac{n_p(0)}{n_{p0}} = \frac{p_n(0)}{p_{n0}} = e^{V_D/V_T}$$

Le concentrazioni in eccesso decadono esponenzialmente con la distanza:

$$n_p(x) - n_{p0} = [n_p(0) - n_{p0}] e^{+x/L_n}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$p_n(x) - p_{n0} = [p_n(0) - p_{n0}] e^{-x/L_p}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$\tau_{n,p}$: vita media dei portatori

Correnti di diffusione in polarizzazione diretta

I gradienti di concentrazione generano correnti di diffusione:

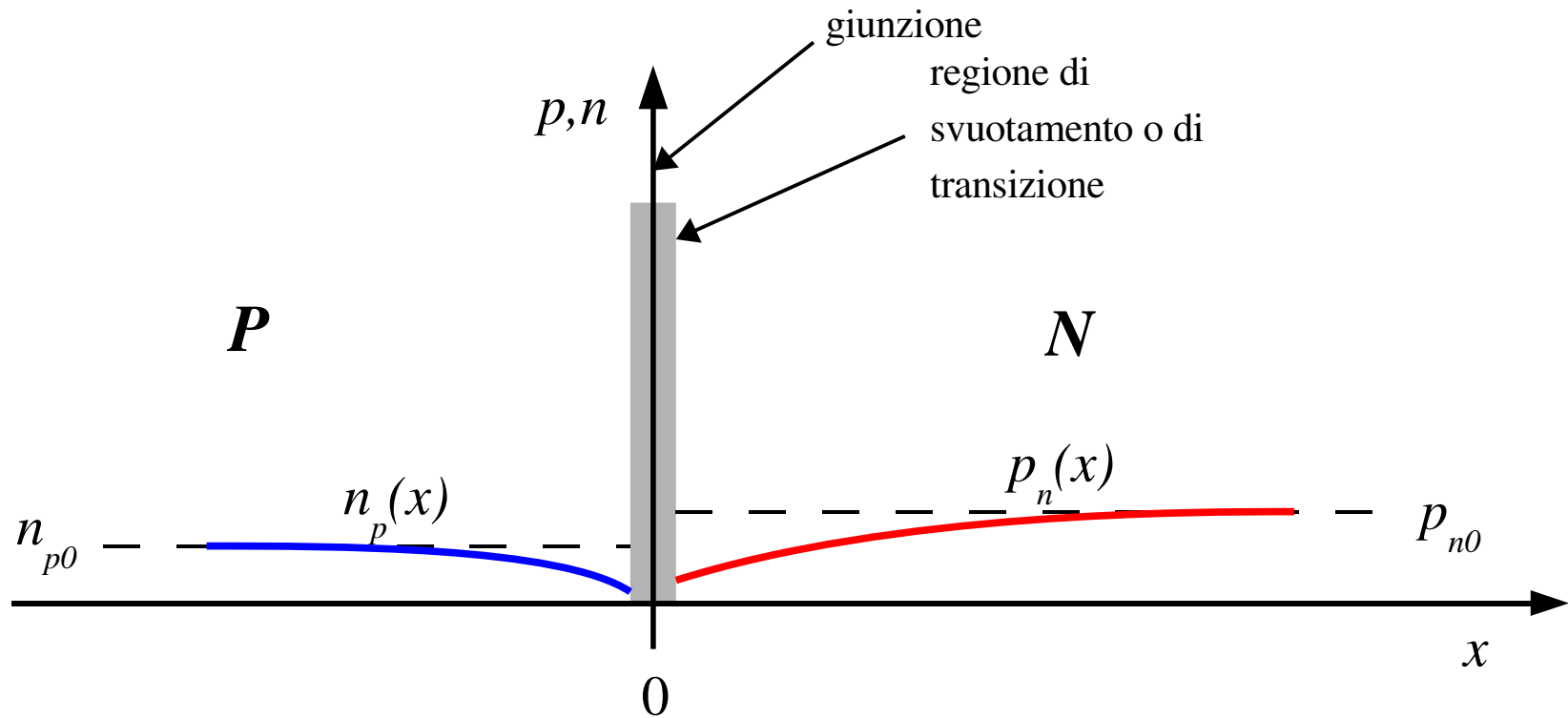
$$J_n = q D_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{x=0} = \frac{q D_n n_{p0}}{L_n} \left[e^{V_D/V_T} - 1 \right] \quad J_p = -q D_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=0} = \frac{q D_p p_{n0}}{L_p} \left[e^{V_D/V_T} - 1 \right]$$

$$I_F = A \cdot (J_n + J_p) = I_S \cdot (e^{V_D/V_T} - 1)$$

A = superficie della giunzione

$$I_s = q A n_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) \quad [\text{corrente di saturazione inversa}]$$

Profili di concentrazioni dei portatori minoritari in polarizzazione inversa



Equazione della giunzione

Per un diodo ideale con giunzione a gradino, supponendo che:

- Il sistema ha simmetria piana (flusso di corrente unidimensionale);
- La caduta ohmica attraverso le regioni neutre e' nulla;
- La generazione e ricombinazione di portatori nella regione di transizione e' trascurabile;
- Le correnti sono piccole (low-level injection);
- La relazione di Boltzmann e' valida in tutta la regione di transizione (quasi equilibrio)

la relazione tra corrente e tensione e':

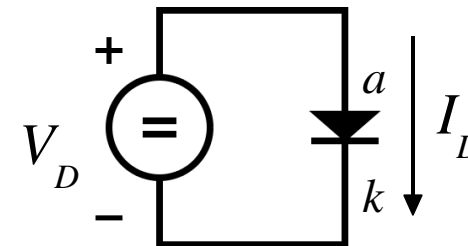
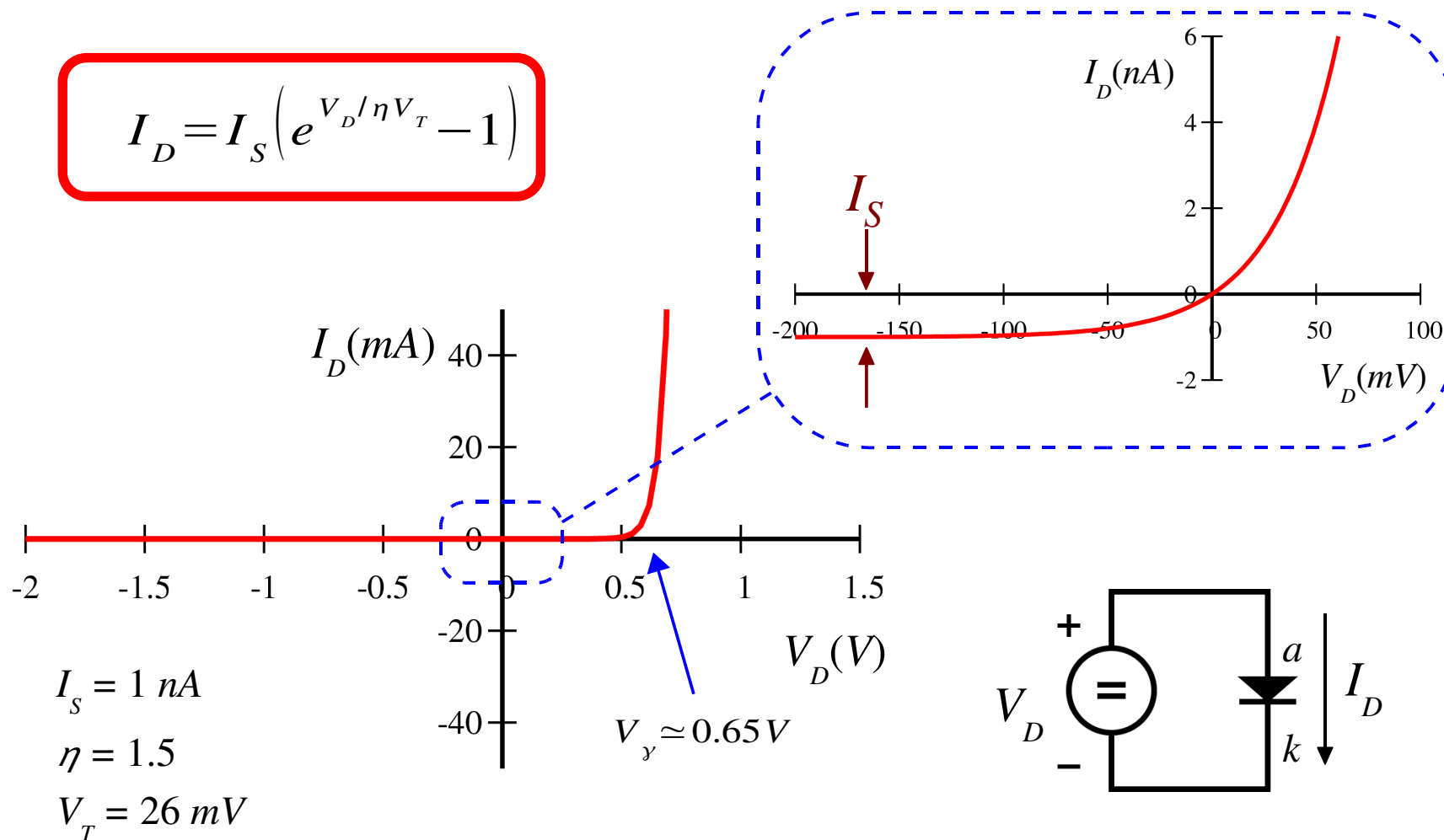
$$I = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$

I_S = corrente di saturazione inversa (1 pA ... 1 μ A)

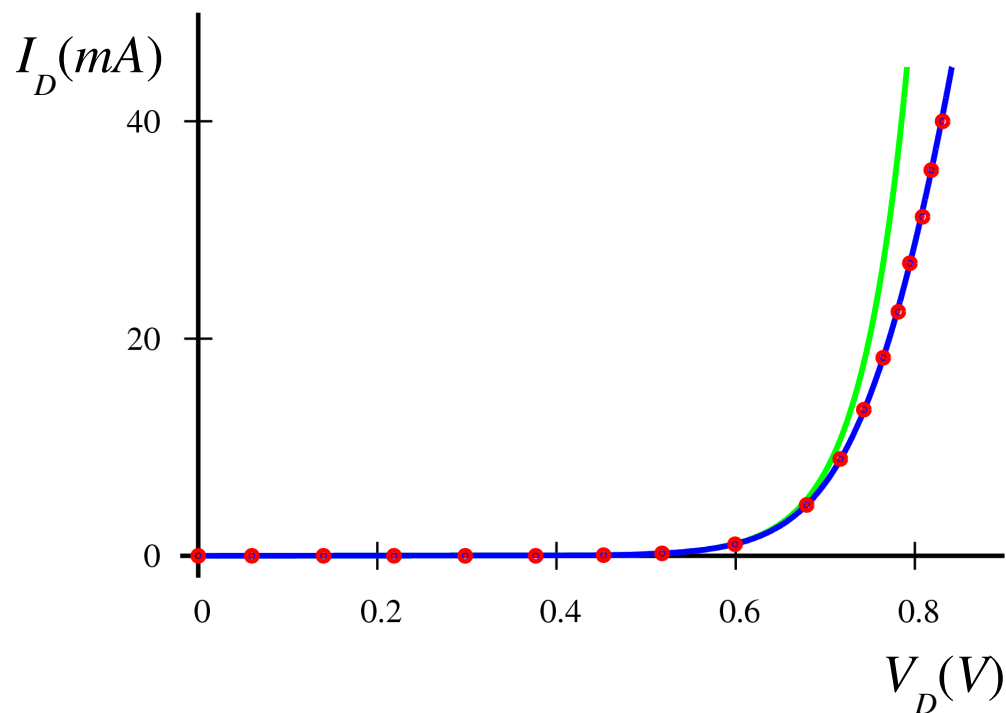
η = parametro fenomenologico (1 ... 2)

Equazione della giunzione

$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



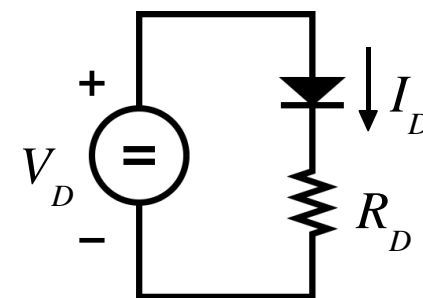
L'equazione della giunzione in un diodo reale (polarizzazione diretta)



● Valori misurati su un diodo reale

— Andamento previsto dall'equazione della giunzione

— Equazione della giunzione corretta per una caduta ohmica in serie



Circuito equivalente

$$I_S = 10.7 \text{ nA}$$

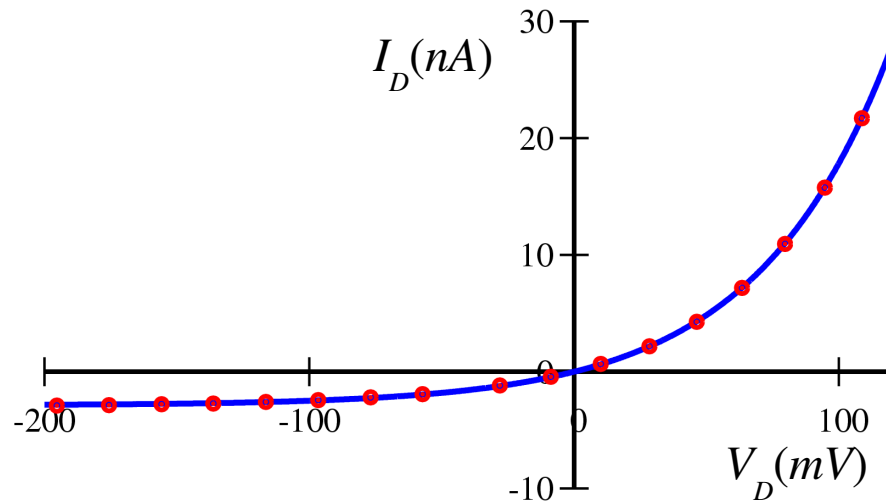
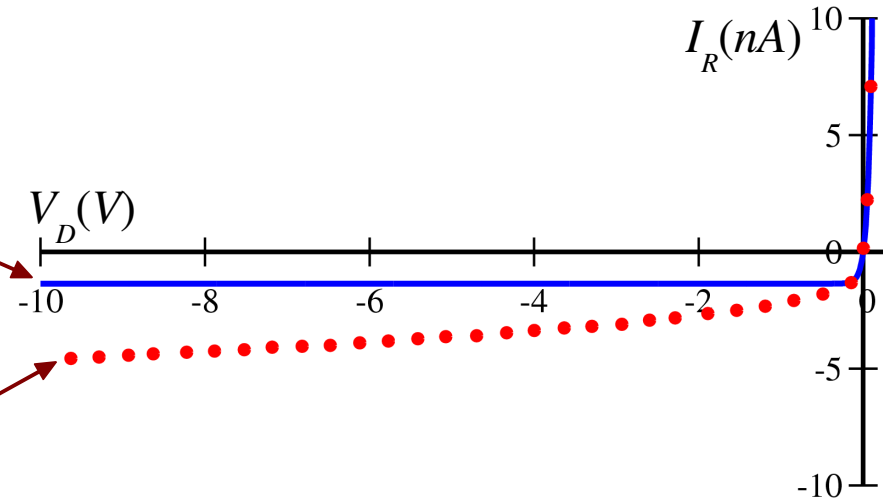
$$\eta = 2.0$$

$$R_D = 1.1 \text{ } \Omega$$

L'equazione della giunzione in un diodo reale (contropolarizzazione)

Corrente inversa
prevista dall'equazione
della giunzione

Corrente inversa misurata



$$I_S = 2.9 \text{ nA}$$
$$\eta = 1.95$$

Corrente nel diodo nell'intorno dello
zero

Coefficiente di temperatura del diodo a giunzione

$$I = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \log \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) \Rightarrow V_D = \eta V_T \log \frac{I_D}{I_S}$$

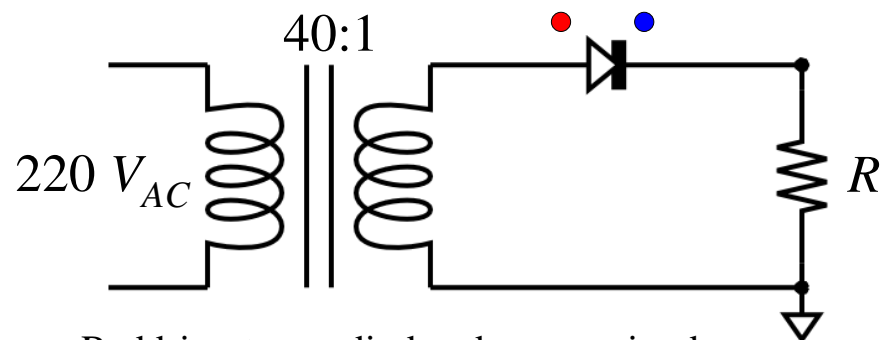
Equazione della giunzione per un diodo in polarizzazione diretta.

$$\left| \frac{\partial V_D}{\partial T} \right|_{I_D} = \frac{\eta V_T}{T} \log \frac{I_D}{I_S} - \eta V_T \frac{1}{I_S} \frac{d I_S}{d T} \simeq -2.3 \text{ mV} / ^\circ\text{K}$$

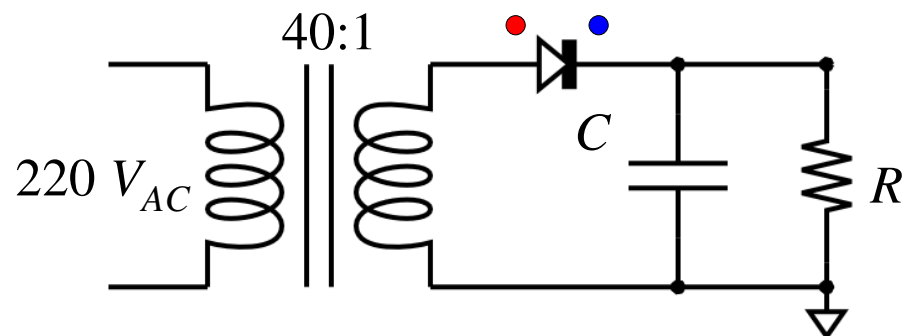
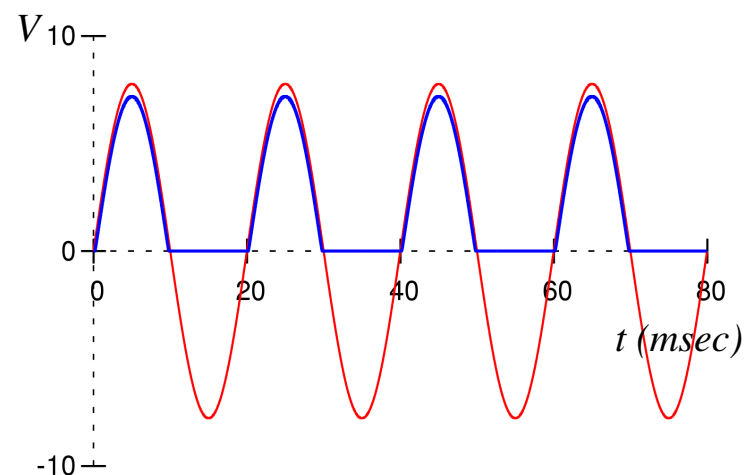
V_T ed I_S dipendono dalla temperatura.

$$\begin{array}{cc} \downarrow & \downarrow \\ \simeq 2.2 \text{ mV} / ^\circ\text{K} & \simeq 4.5 \text{ mV} / ^\circ\text{K} \end{array}$$

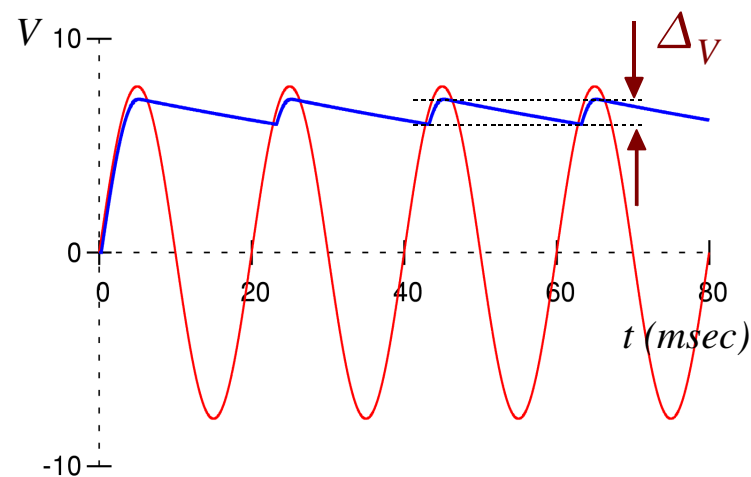
Raddrizzatore a diodi



Raddrizzatore a diodo ad una semionda.



Raddrizzatore a diodo ad una semionda con condensatore di livellamento.

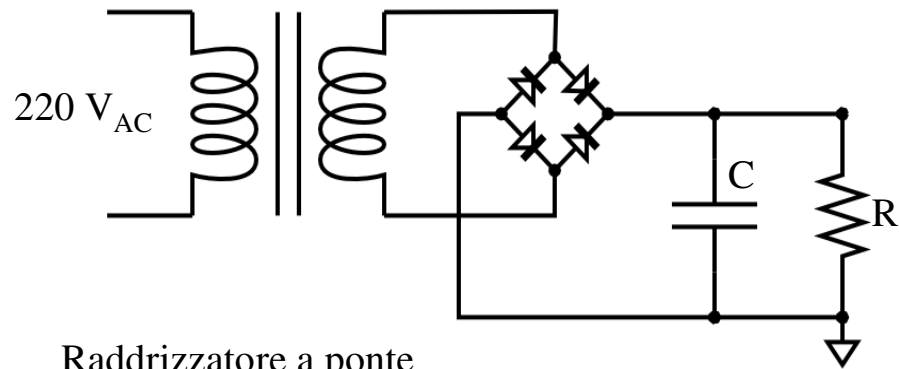
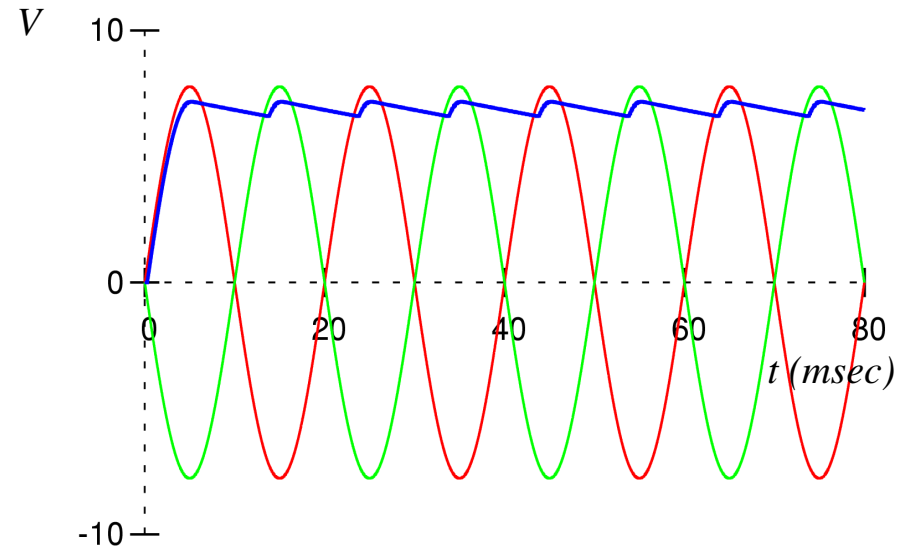
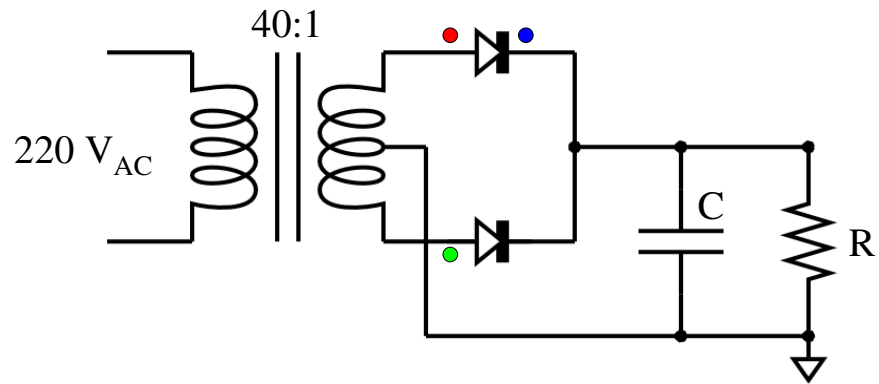


$$R = 100 \, \Omega \quad C = 1 \, \text{mF}$$

$$I_S = 10 \, \text{pA} \quad \eta = 1$$

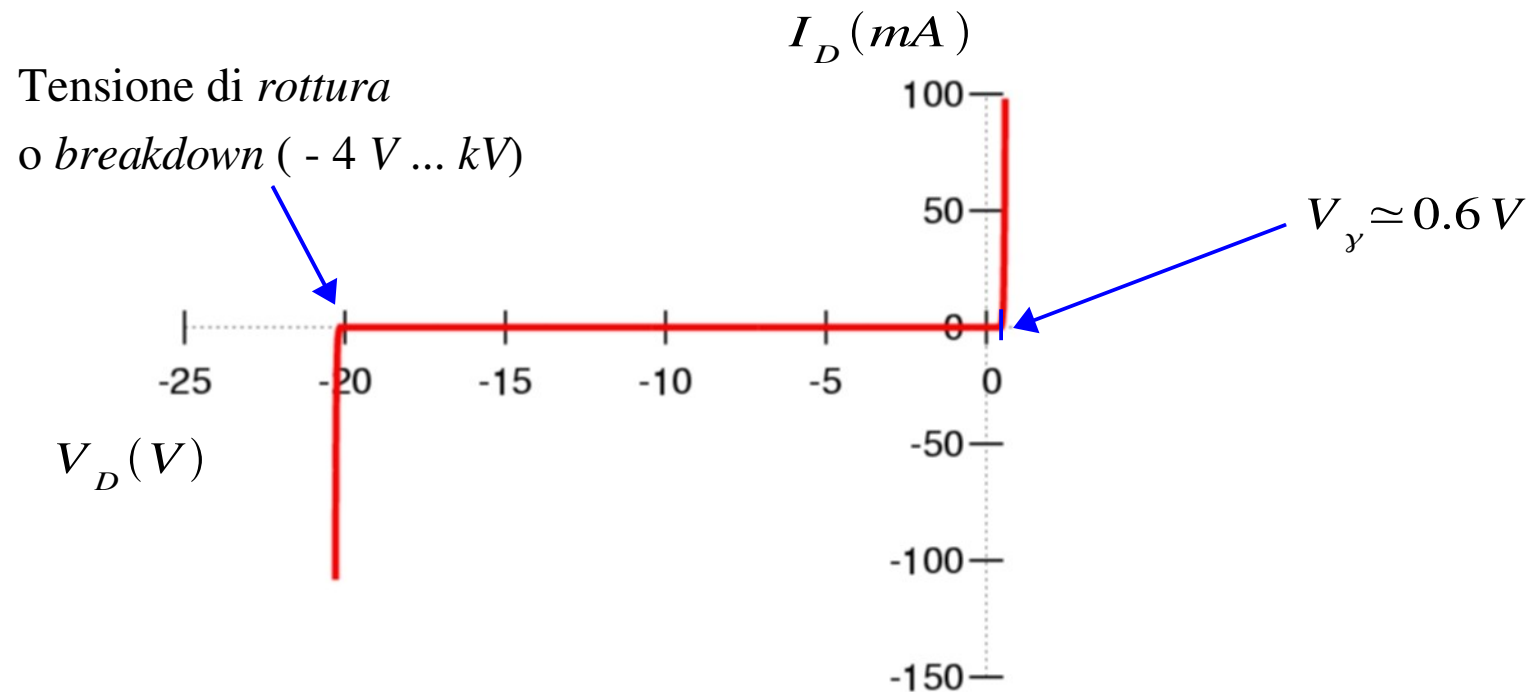
Ondulazione residua (*ripple*): $\Delta V = \frac{V}{RC} \Delta T$

Raddrizzatori a due semionde



Raddrizzatore a ponte

Reverse breakdown



T_j : temperatura della giunzione

T_c : temperatura del contenitore

P_D : potenza dissipata

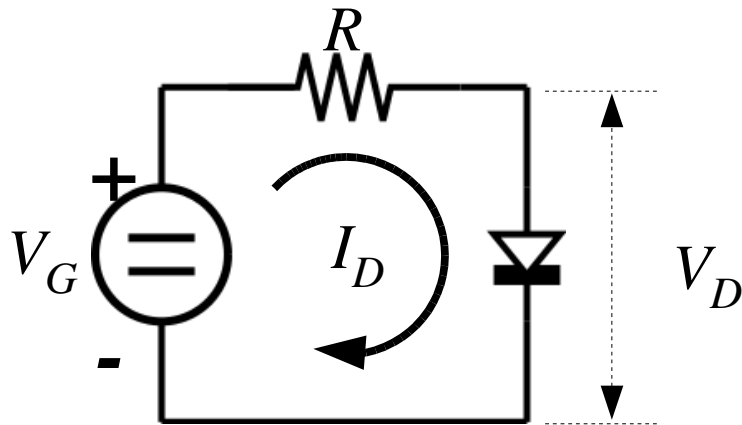
R_θ : resistenza termica

Effetto Joule: $P_D = V_D * I_D$

$$T_j = T_c + P_D * R_\theta$$

$$T_{jMAX} \approx 180^\circ C (per Si)$$

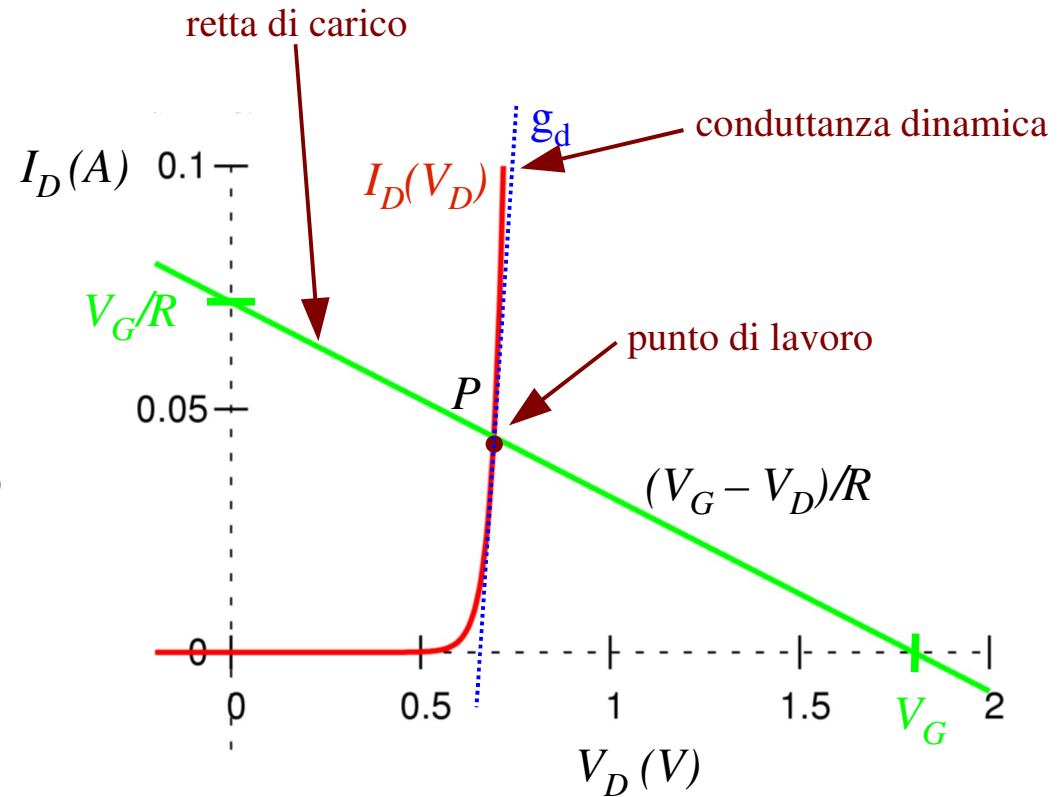
Circuiti non lineari



L'equazione della maglia

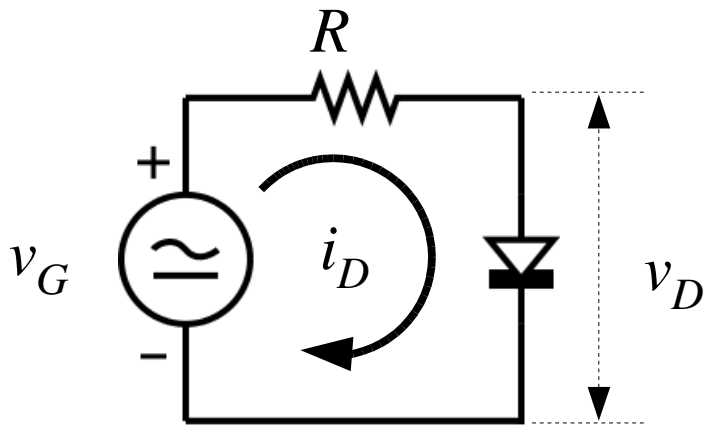
$$I_D \cdot R + V_D(I_D) = V_G$$

e' non lineare.



Soluzione grafica dell'equazione della maglia.

Linearizzazione dei circuiti



circuito fisico

V_D, V_G, I_D : tensioni e correnti *costanti*

v_d, v_g, i_d : tensioni e correnti *variabili nel tempo*

$$v_G = V_G + v_g$$

$$v_D = V_D + v_d$$

$$i_D = I_D + i_d$$

con $v_d \ll V_D$, $i_d \ll I_D$ ecc.

L'equazione della maglia

$$i_D \cdot R + v_D(i_D) = v_G$$

sviluppata in serie di Taylor (al primo ordine) diventa:

$$I_D \cdot R + i_d \cdot R + V_D(I_D) + i_d \cdot r_d = V_G + v_g$$

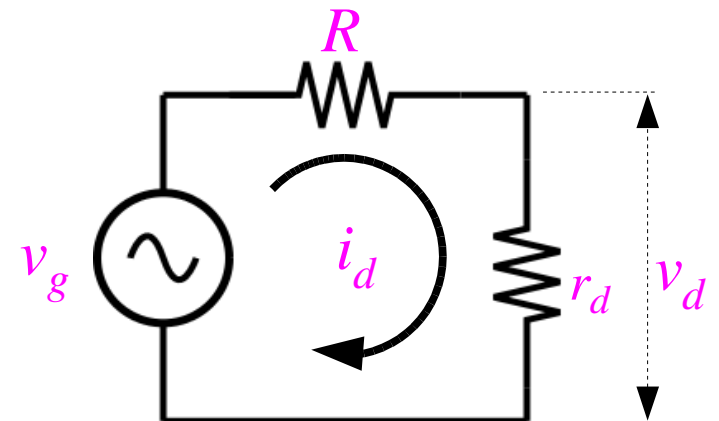
con $r_d = dV_D / dI_D =$ *resistenza dinamica*.

$$I_D \cdot R + V_D(I_D) = V_G$$

componente continua

$$i_d \cdot R + i_d \cdot r_d = v_g$$

componente variabile



circuito linearizzato

Conduttanza dinamica del diodo

$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right) \quad \text{equazione della giunzione}$$

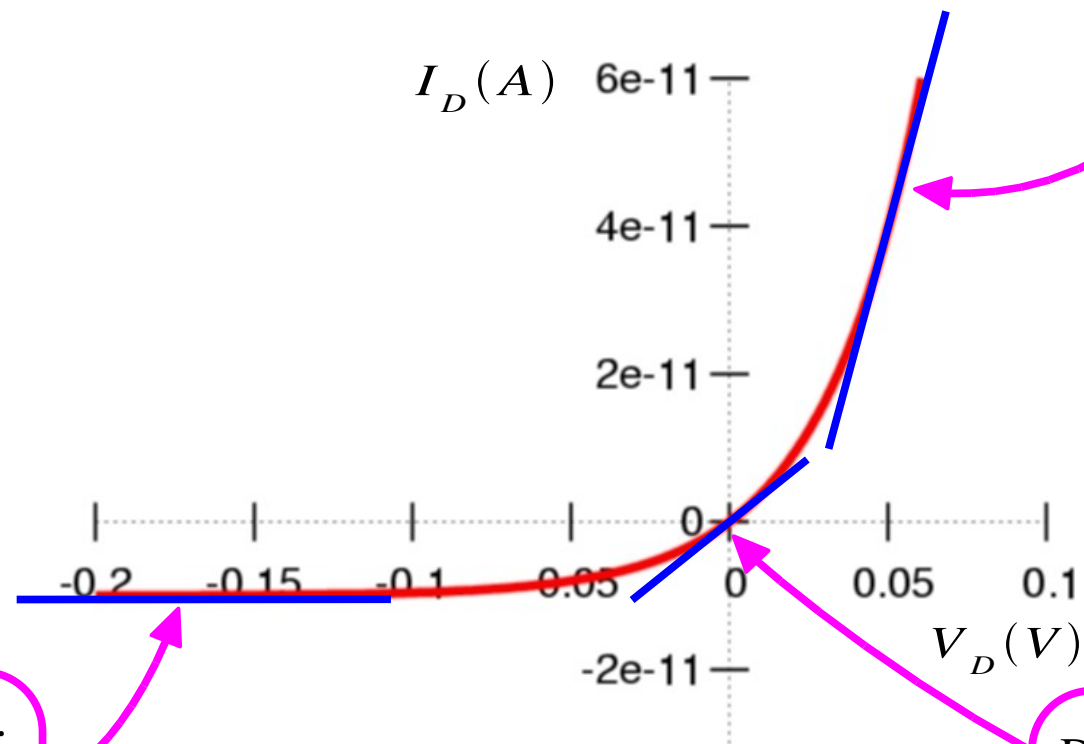
$$g_d = \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{I_S}{\eta V_T} \cdot e^{V_D / \eta V_T} \quad \text{conduttanza dinamica}$$

$$g_d = \frac{I_D + I_S}{\eta V_T}$$

Diodo direttamente polarizzato:

$$I_D \gg I_S$$

$$g_d \simeq \frac{I_D}{\eta V_T} \simeq 30 \frac{\text{mA/V}}{\text{mA}} \cdot I_D$$



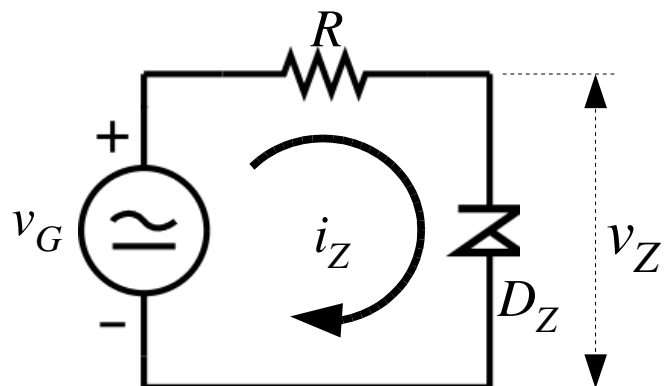
Diodo contropolarizzato:

$$I_D \simeq -I_S \quad g_d \simeq 0$$

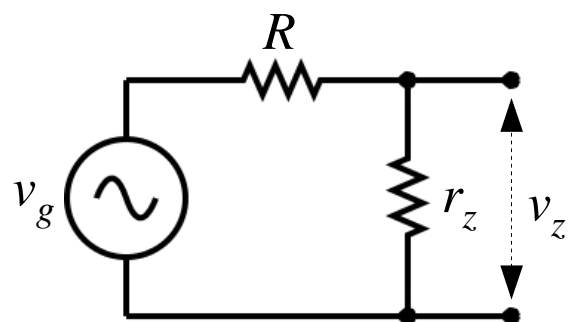
Diodo non polarizzato:

$$g_d = \frac{I_S}{\eta V_T}$$

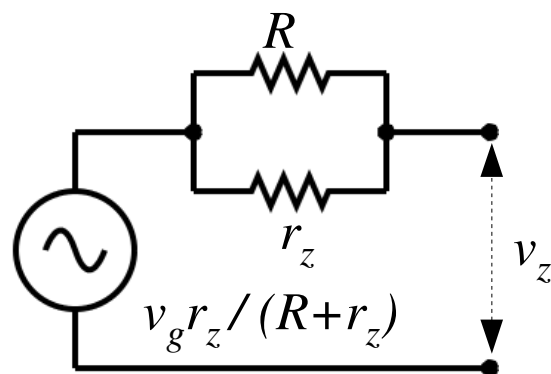
Stabilizzatore di tensione con diodo Zener



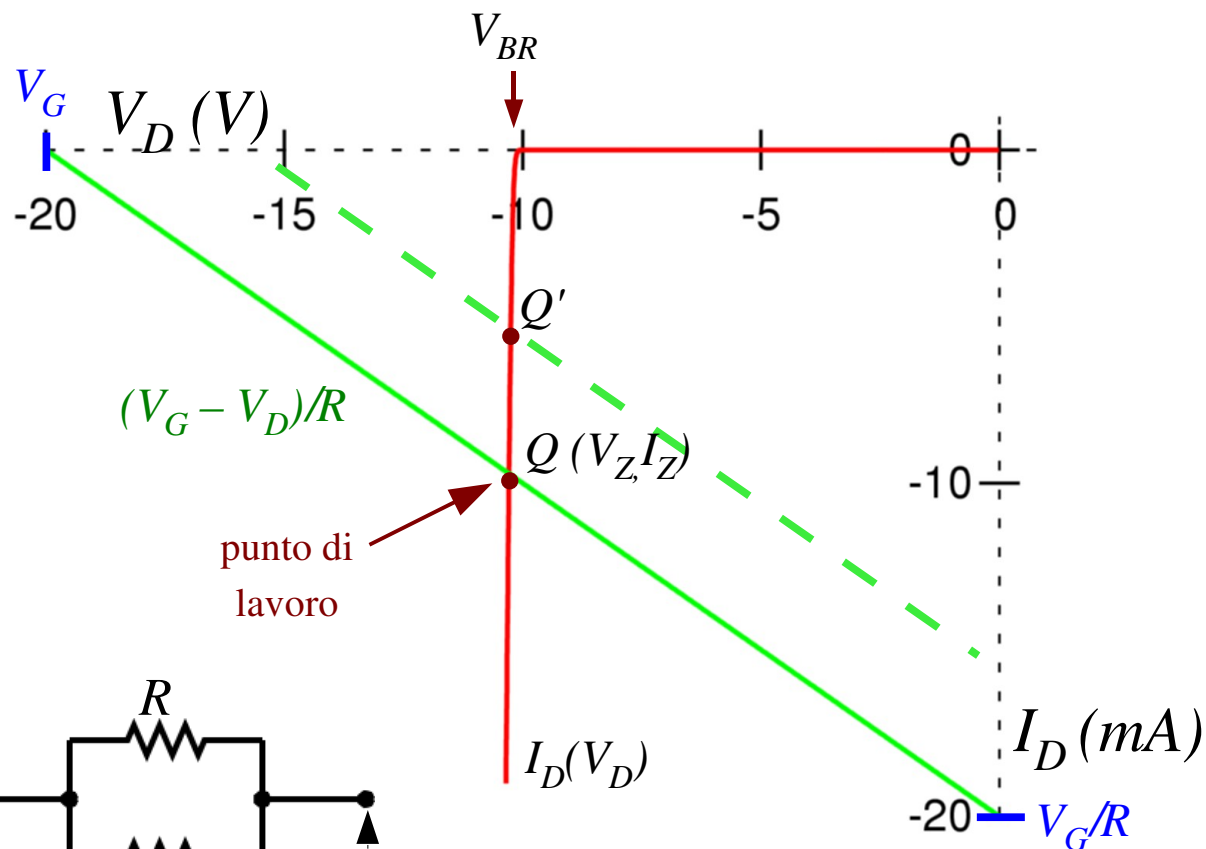
Circuito stabilizzatore a diodo Zener



Circuito linearizzato dello stabilizzatore di tensione a diodo Zener



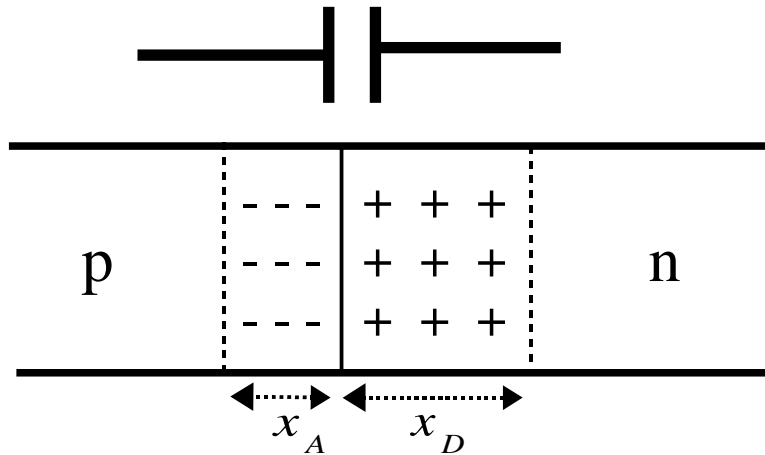
Circuito equivalente di Thevenin del circuito linearizzato



$$r_z = d V_Z / d I_Z$$

Resistenza dinamica
del diodo Zener

Diodo contropolarizzato - capacita' di transizione



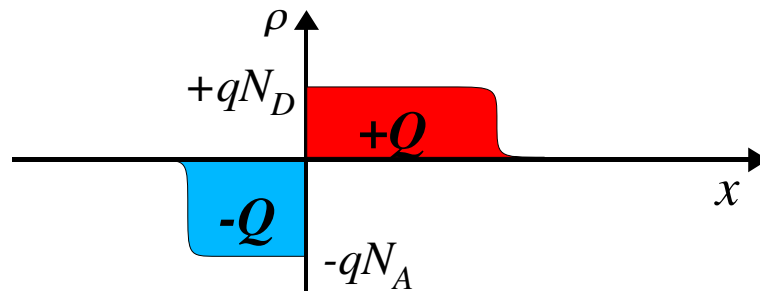
regione di svuotamento (depletion layer)

o

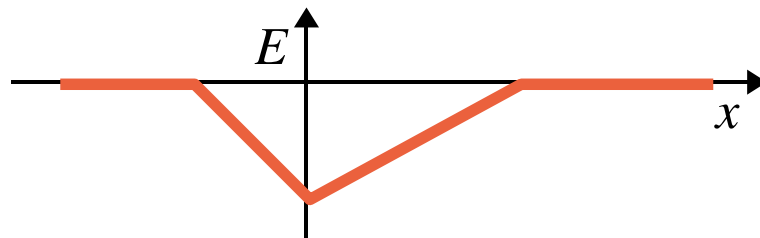
di carica spaziale (space charge region)

o

di transizione (transition region)



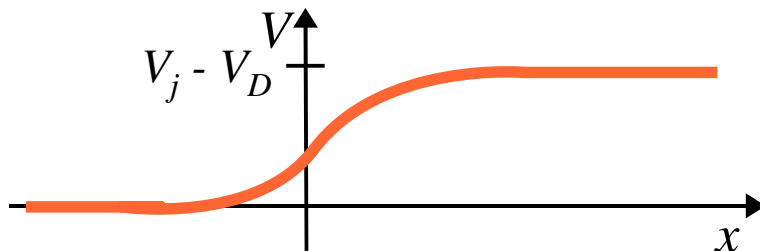
Distribuzione (ρ) della carica elettrica nella regione di carica spaziale



Campo elettrico (E_x)

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i}$$

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$



Potenziale elettrico (V)

$$\frac{dV}{dx} = -E_x$$

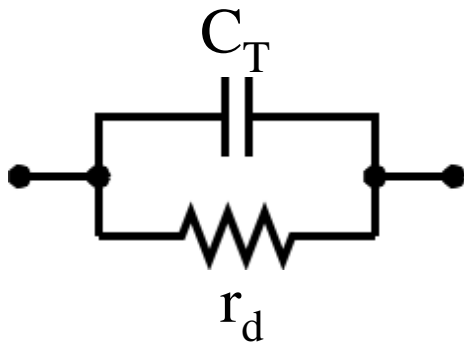
Capacita' di transizione C_T

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = - \frac{\rho}{\epsilon}$$

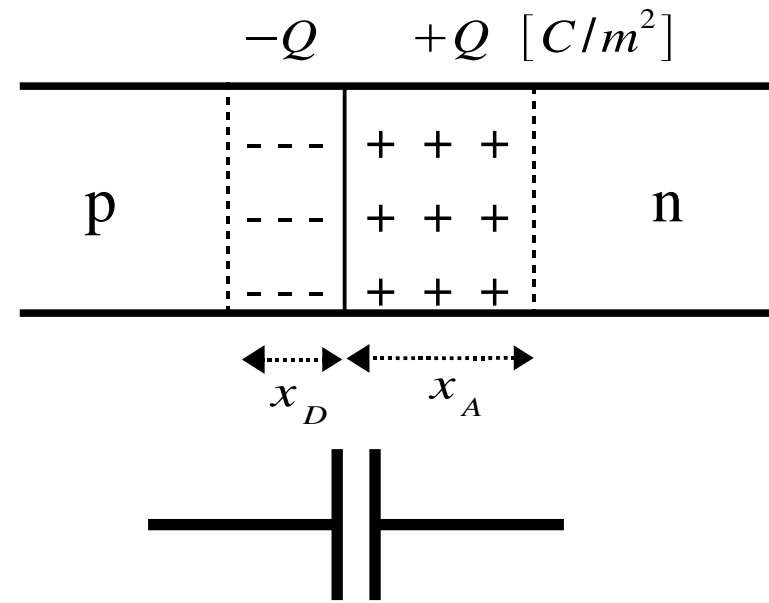
$$V_j - V_D = \frac{q}{2\epsilon} (N_A x_A^2 + N_D x_D^2)$$

$$q N_A x_A = q N_D x_D = Q$$

$$V_j - V_D = \frac{Q^2}{2\epsilon q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$



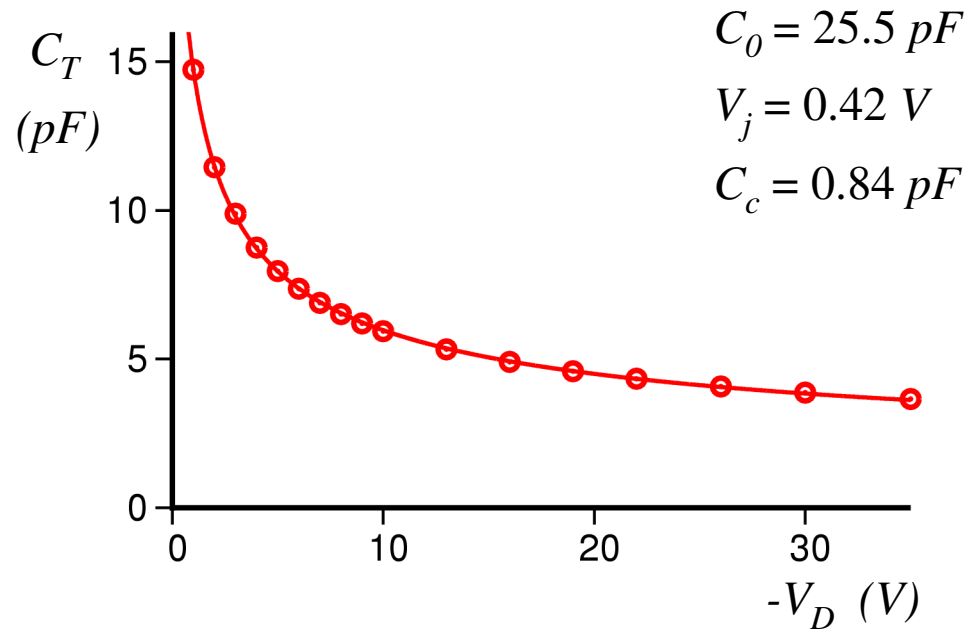
circuito lineare equivalente per piccoli segnali di un diodo contropolarizzato



$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{C_0}{\sqrt{1 - V_D/V_j}}$$

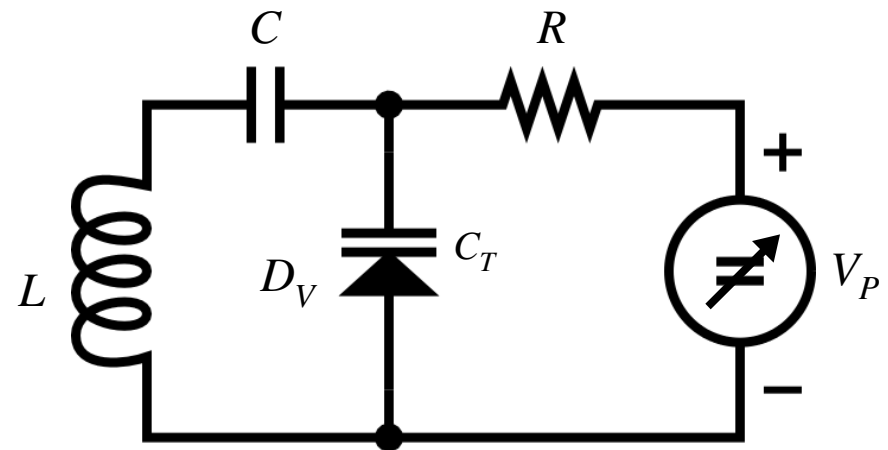
$$C_0 = \sqrt{\frac{\epsilon q}{2 V_j} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)^{-1}}$$

Capacita' di transizione C_T

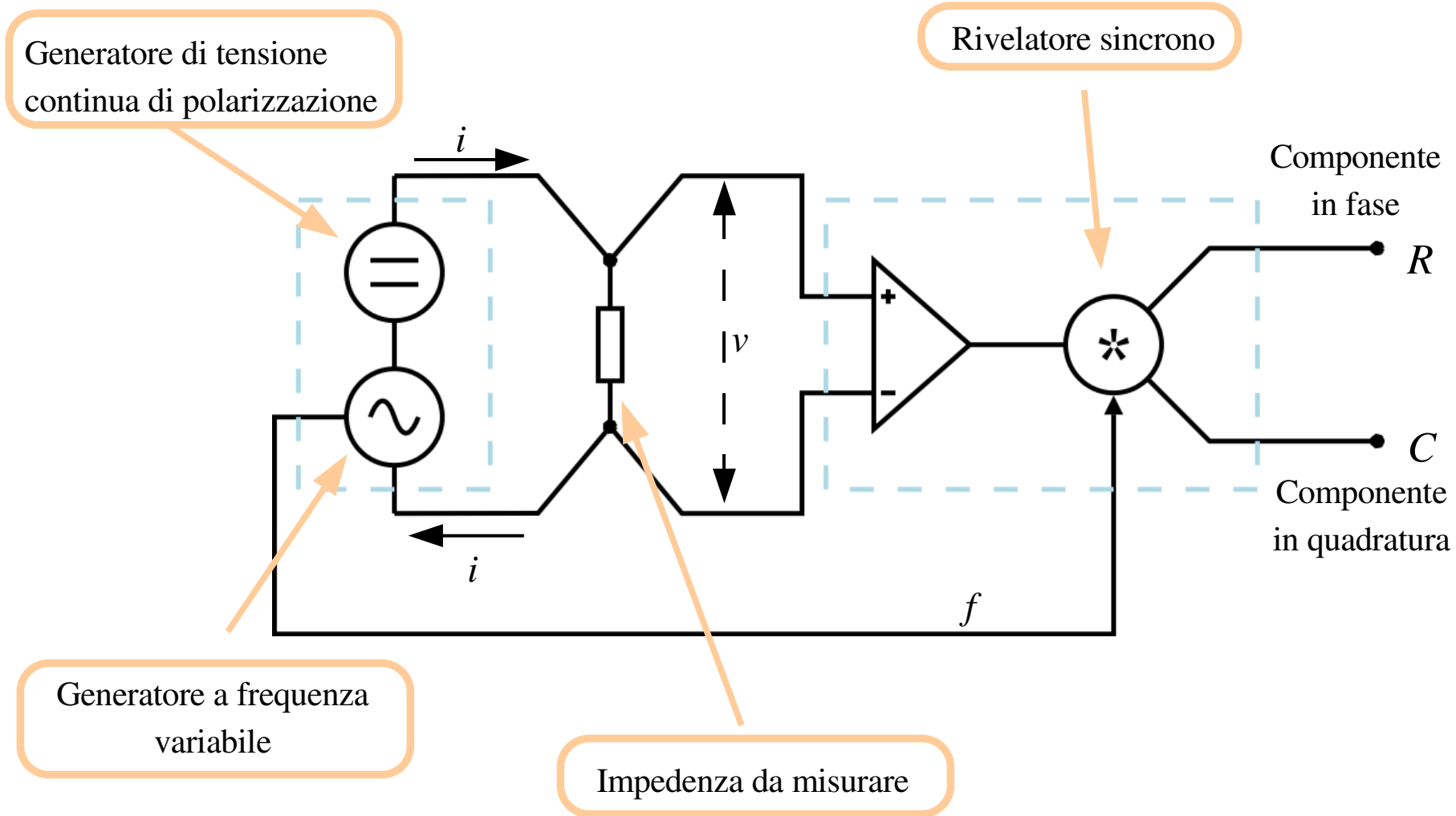


$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{C_0}{\sqrt{1 - V_D/V_j}} + C_c$$

Capacita' di transizione C_T come condensatore variabile: **diodo varicap**



Misura della capacita' di transizione di un diodo

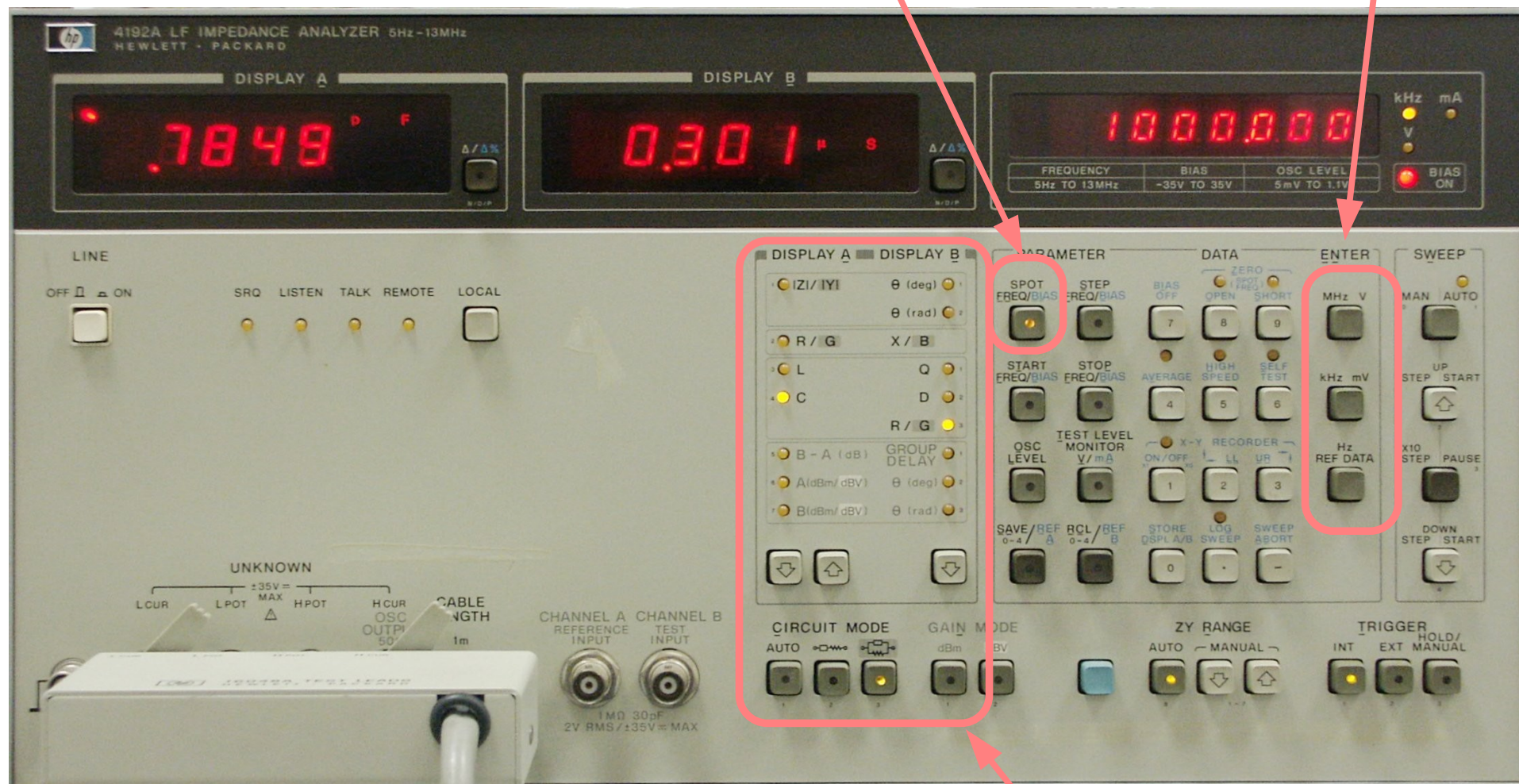


Misura della capacita' di transizione di un diodo

Impedance Analyzer HP 4192A

Impostazione di frequenza e
tensione di polarizzazione

Selezione unita' di misura



Selezione misura

Portatori di carica in un diodo in conduzione

$$n_p(0) = n_{p0} e^{V_d/V_T}$$

Concentrazione degli elettroni iniettati nella regione **P**.

.....
.....

$$p_n(0) = p_{n0} e^{V_d/V_T}$$

Concentrazione delle lacune iniettate nella regione **N**.

$$p_n(x) - p_{n0} = [p_n(0) - p_{n0}] e^{-x/L_p}$$

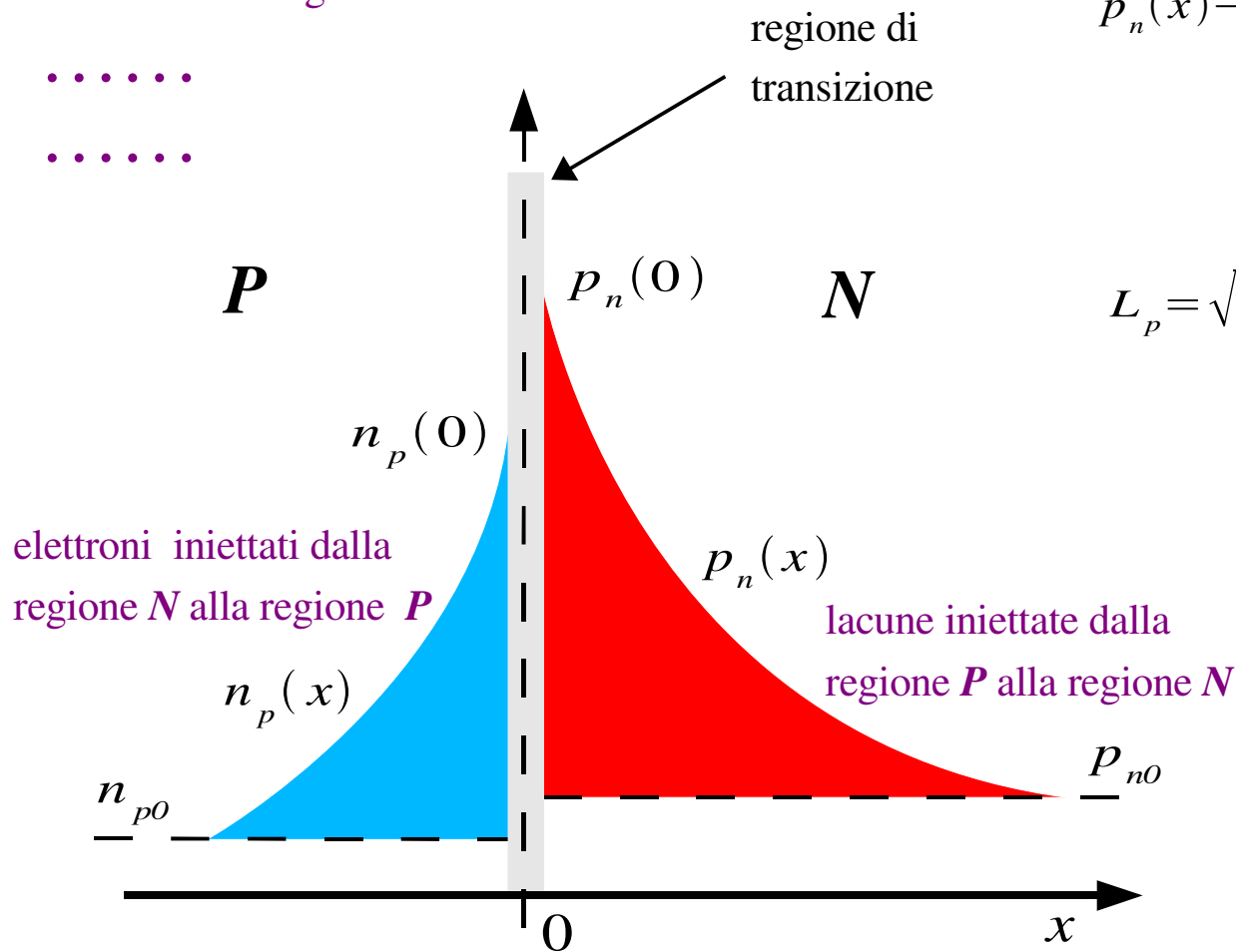
Le lacune si allontanano dalla giunzione per diffusione e si ricombinano con gli elettroni.

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

lunghezza di diffusione

$$\tau_p$$

vita media dei portatori



Nella regione **N** le lacune sono i portatori minoritari; nella regione **P** gli elettroni sono i portatori minoritari.

Capacita' di diffusione C_D

$$I_D = I_p(0) + I_n(0)$$

La corrente totale attraverso la giunzione ha due componenti: lacune ed elettroni.

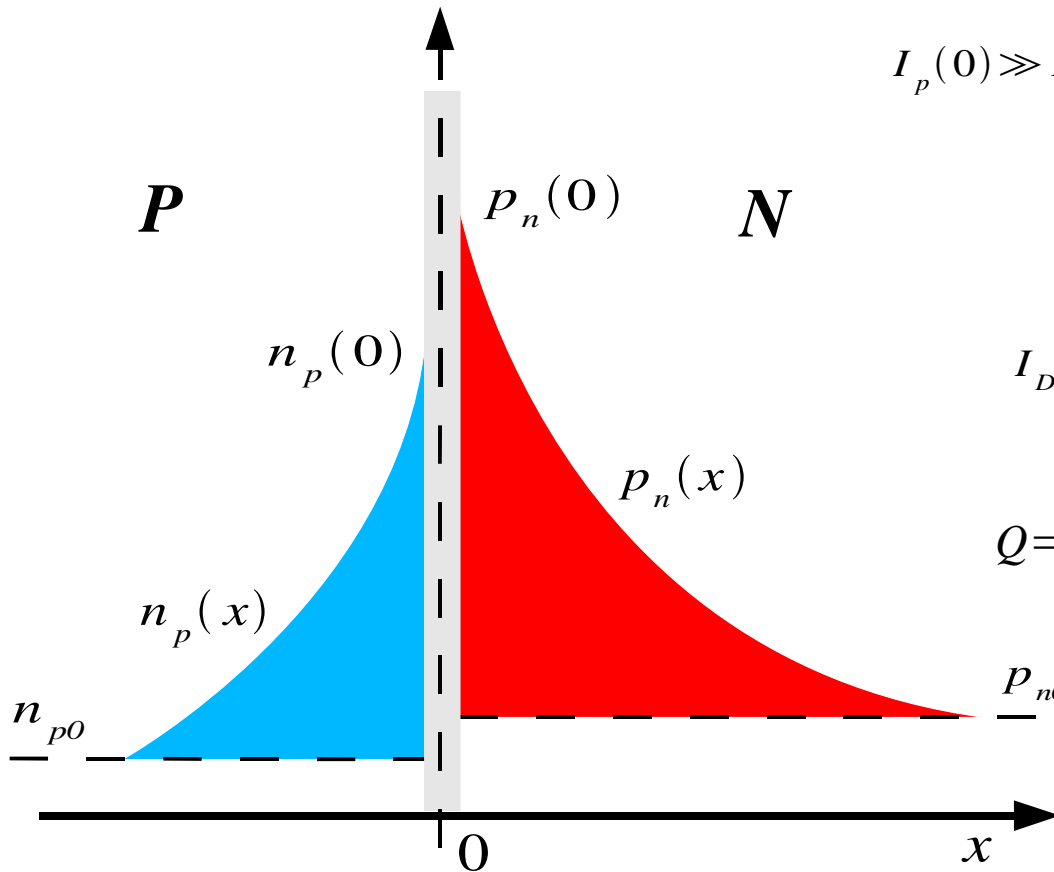
$$I_p(0) \gg I_n(0) \rightarrow I_D \simeq I_p(0)$$

Con una giunzione a drogaggio asimmetrico solo una delle due componenti e' significativa.

$$I_D = A q D_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{A q D_p [p_n(0) - p_{n0}]}{L_p}$$

$$Q = \int_0^\infty A q [p_n(x) - p_{n0}] dx = A q L_p [p_n(0) - p_{n0}] = \tau_p I_D$$

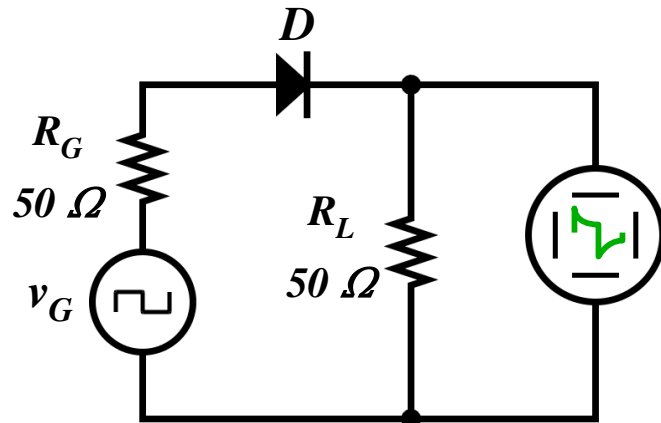
L'eccesso di portatori nella *regione di diffusione* e' proporzionale alla corrente I_D del diodo.



$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \tau_p \frac{dI_D}{dV_D} = \tau_p g_D$$

L'eccesso di portatori varia con la tensione applicata e da origine alla *capacita' di diffusione* C_D .

Tempi di commutazione di un diodo



diodo:

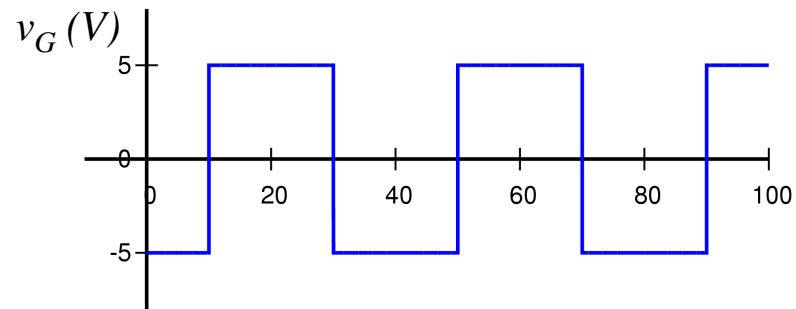
$$I_S = 1 \text{ nA}$$

$$C_j = 20 \text{ pF}$$

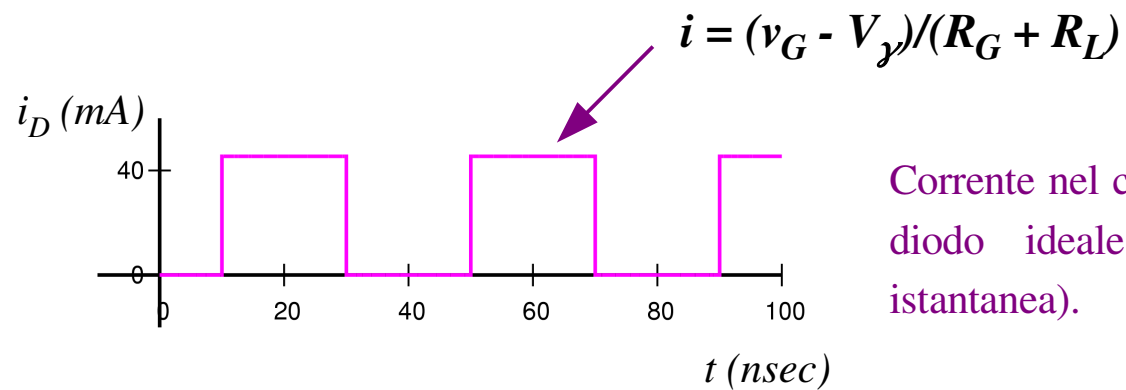
$$V_j = 1 \text{ V}$$

$$\tau = 10 \text{ ns}$$

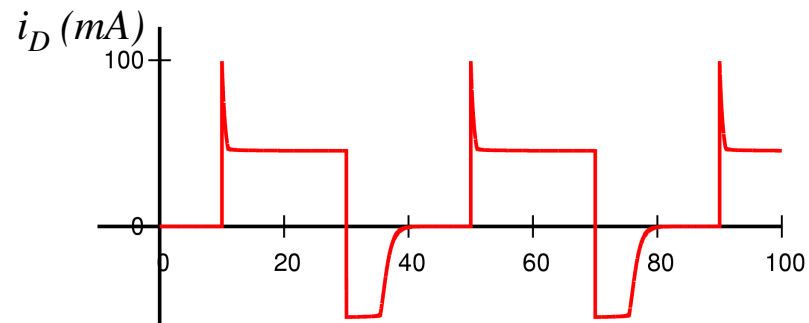
$$v_G = \pm 5 \text{ V}$$



Segnale ad onda quadra
prodotto dal generatore.

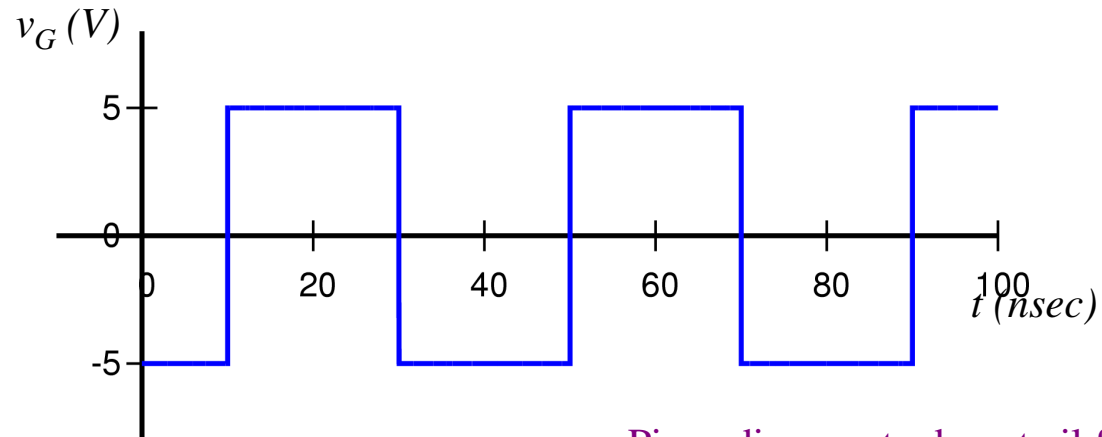
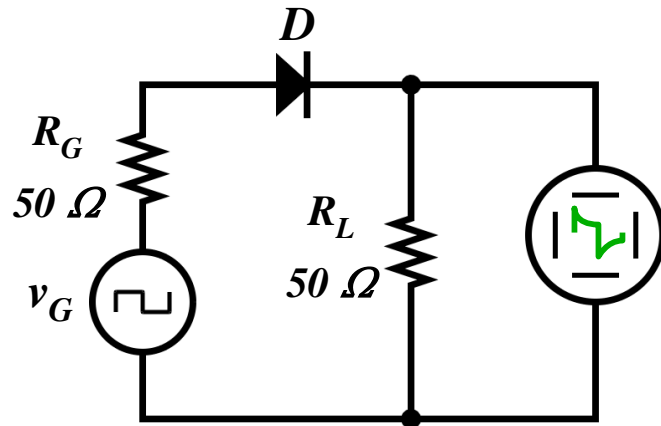


Corrente nel circuito con un
diodo ideale (a risposta
istantanea).

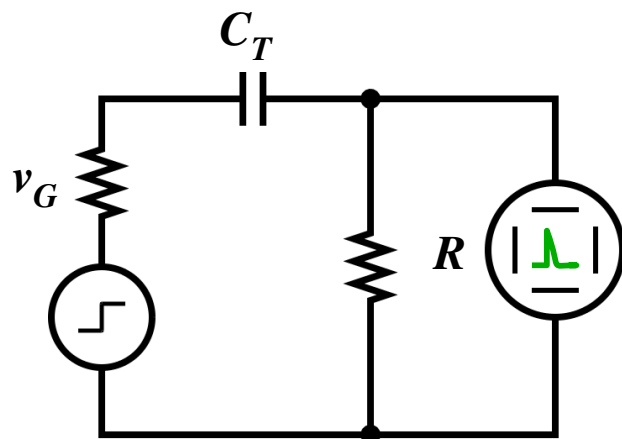


Corrente nel circuito per
effetto delle capacità di
transizione e diffusione di
un diodo reale.

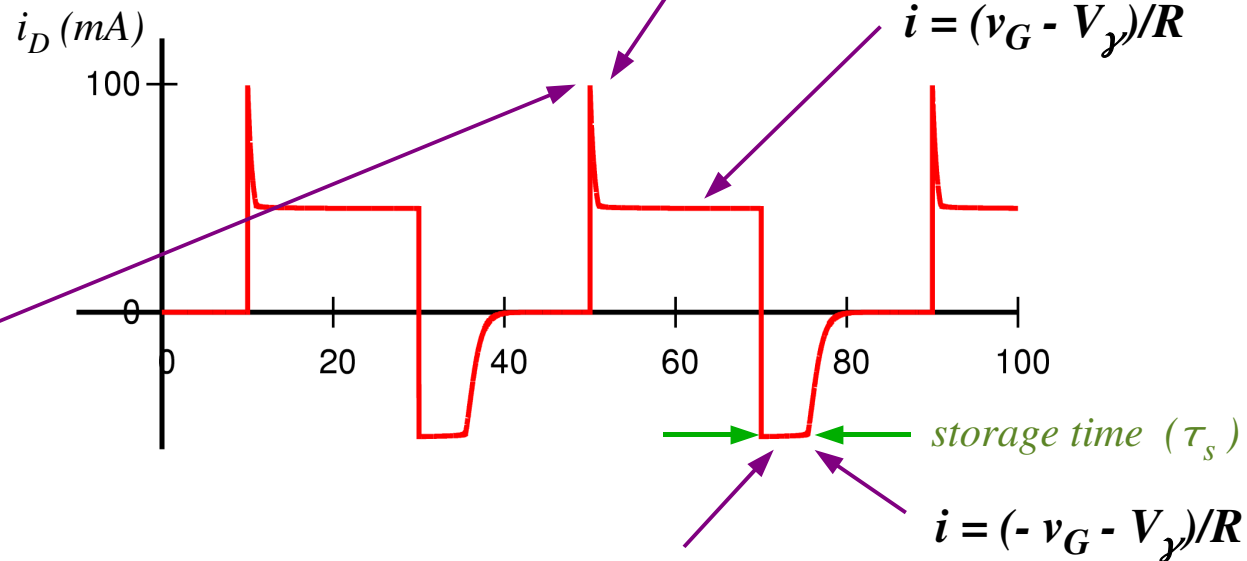
Tempi di commutazione di un diodo



Picco di corrente durante il fronte di salita: carica della capacita' di transizione alla commutazione spento \rightarrow acceso.

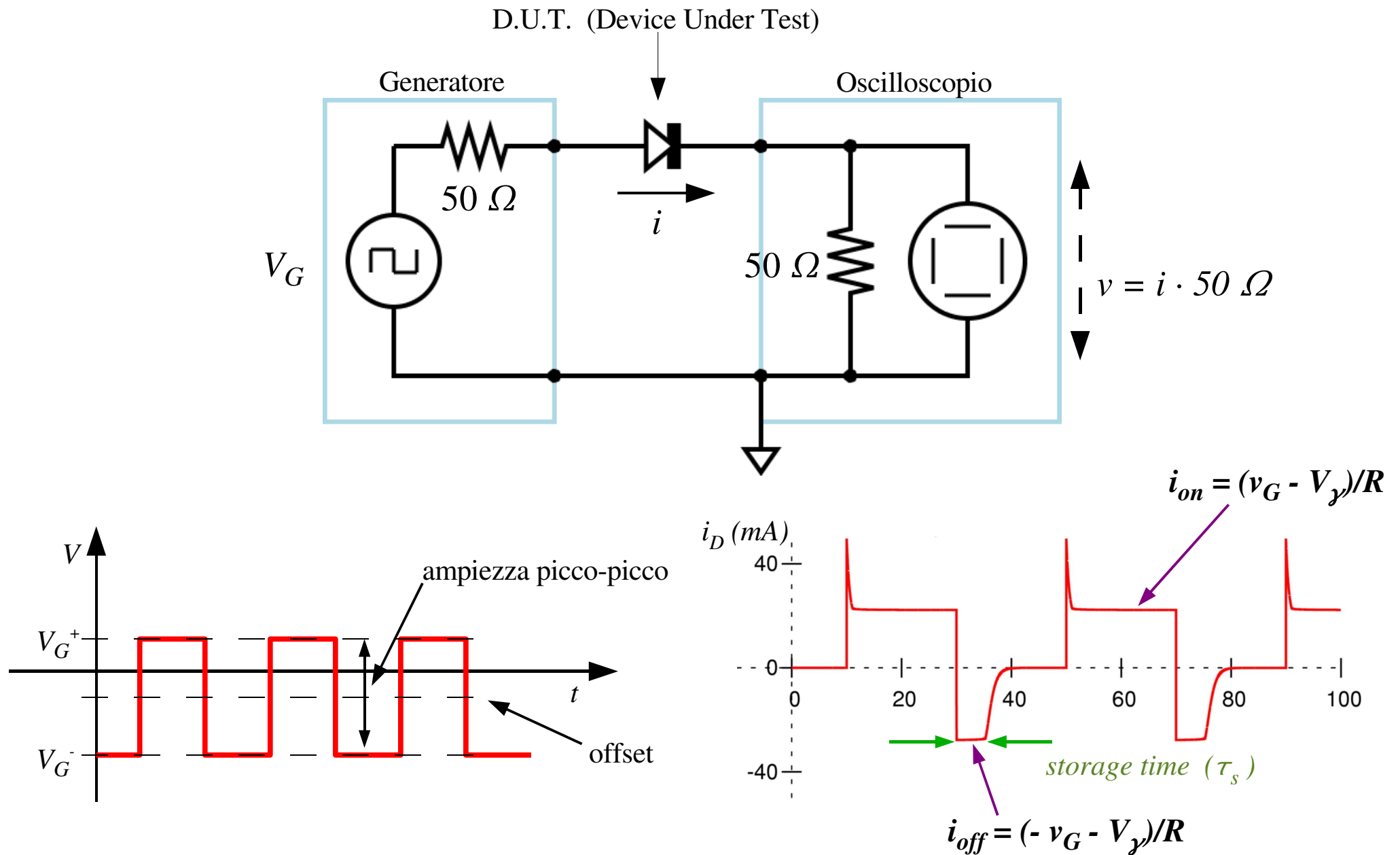


Circuito equivalente durante la commutazione spento \rightarrow acceso.



Ritardo nel passaggio del diodo da acceso a spento: la corrente non puo' annullarsi fino a che non sono scomparsi i portatori minoritari dalla regione di diffusione.

Misura dei tempi di commutazione di un diodo



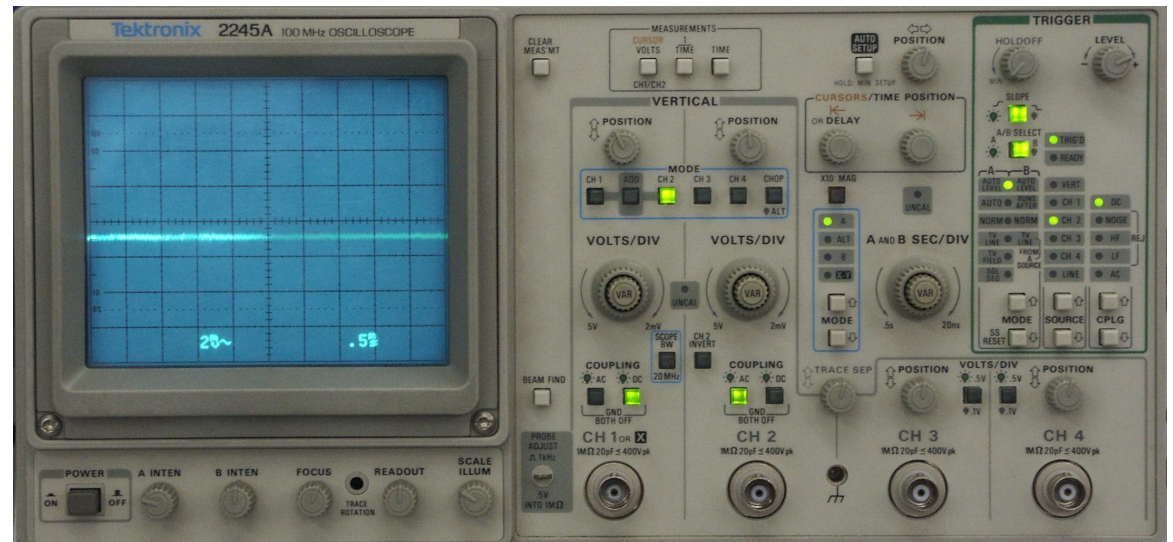
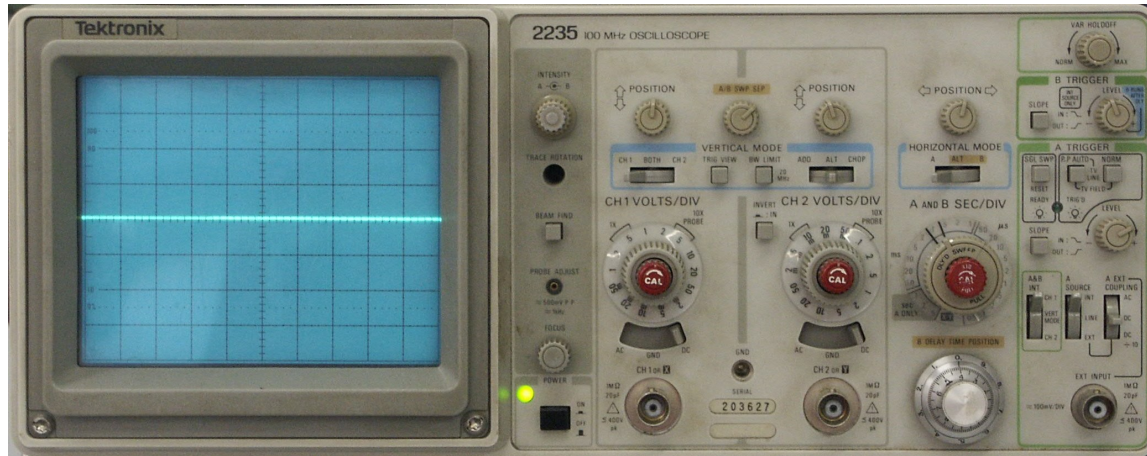
Misura dei tempi di commutazione di un diodo

Generatore di Funzioni HP8111A

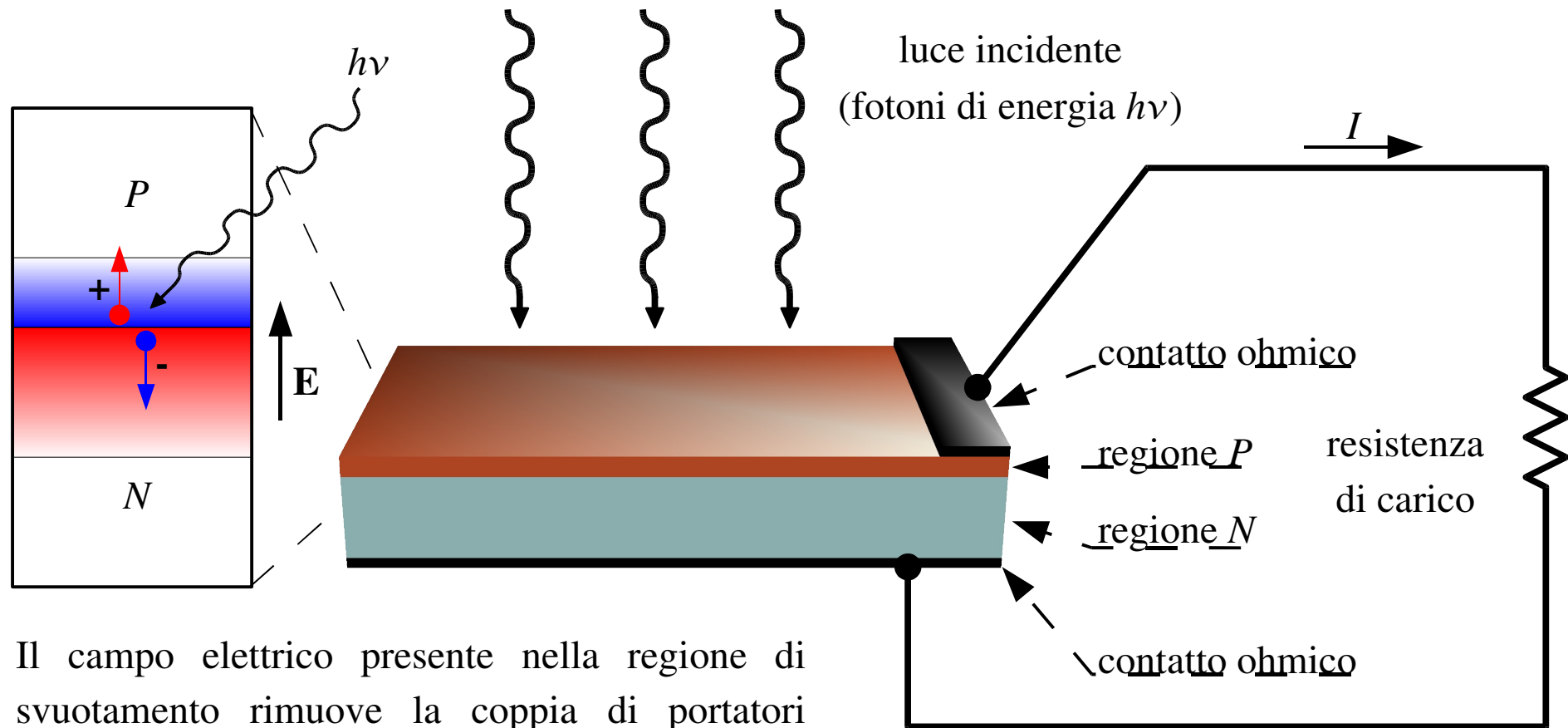


Misura dei tempi di commutazione di un diodo

Oscilloscopio Tektronix 2235 e 2245A

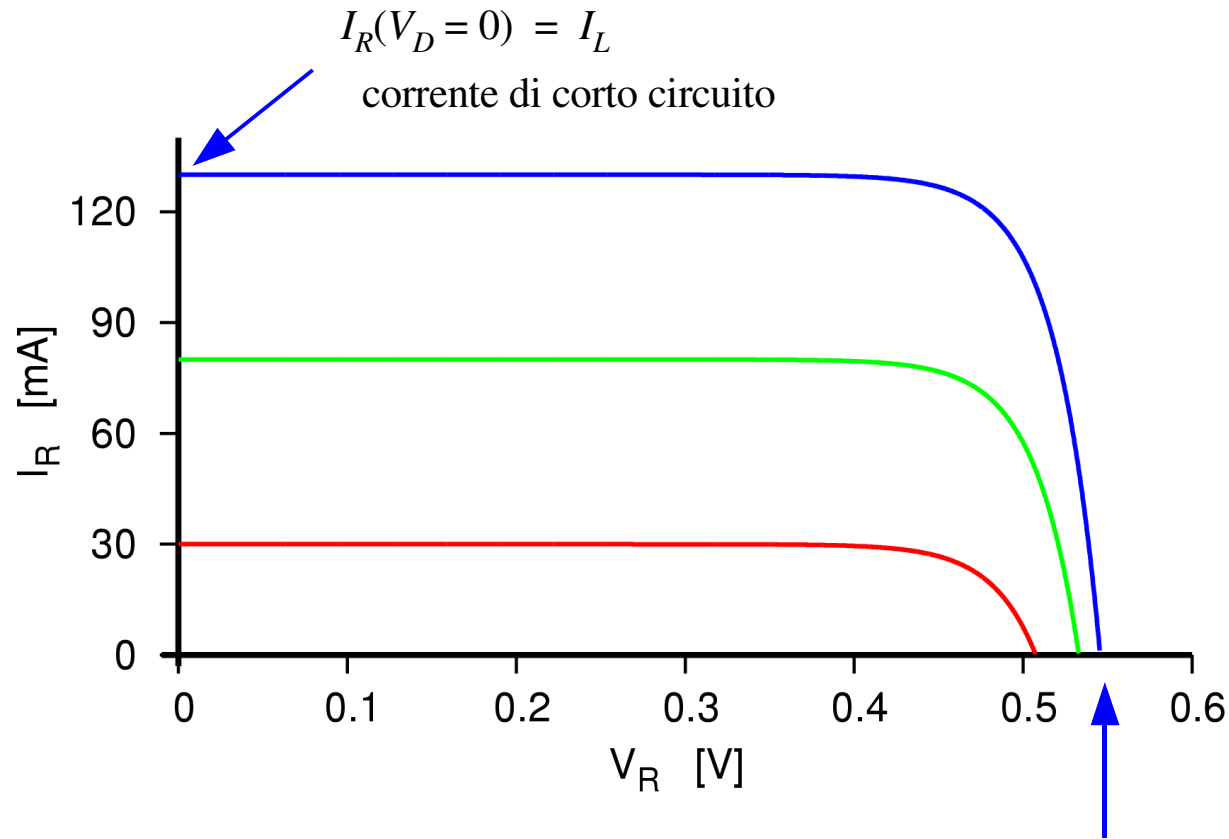


Fotodiodo



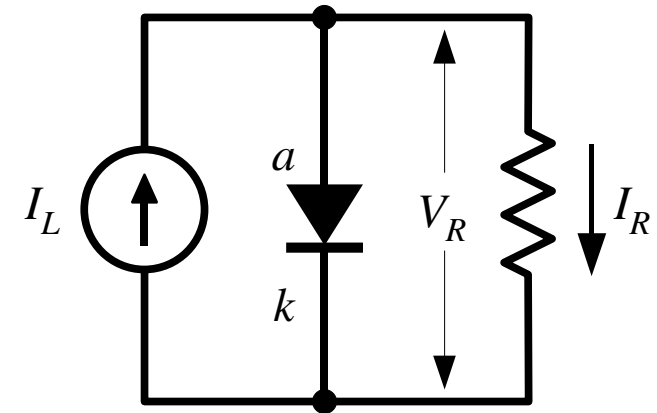
Il campo elettrico presente nella regione di svuotamento rimuove la coppia di portatori lacuna – elettrone prodotta dal fotone: la lacuna verso la regione P , l'elettrone verso la regione N . L'eccesso di cariche che si genera da origine ad una f.e.m. ai capi del diodo.

Relazione tensione-corrente per un fotodiodo ed una cella solare

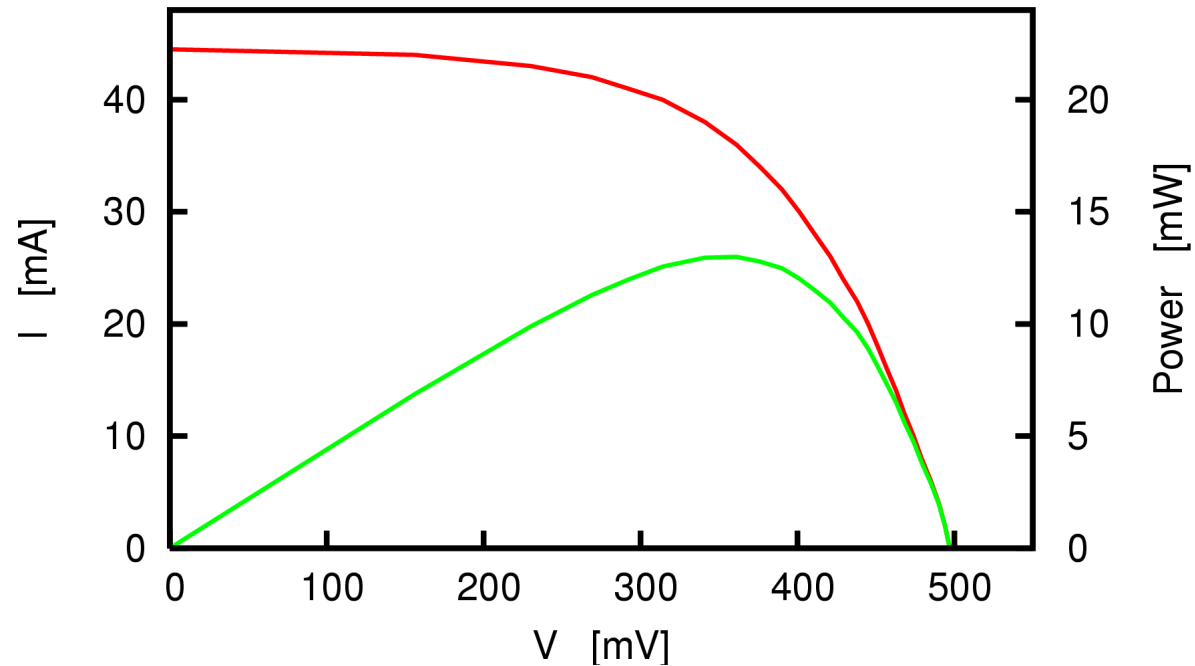


$$I_R = I_L - I_S \cdot \left(e^{-V_D/V_T} - 1 \right)$$

$V_D(I_R = 0) = V_T \log (I_L / I_S)$
tensione a circuito aperto



Relazione tensione-corrente per una cella solare di 1 cm² con illuminazione artificiale(linea rossa) e potenza erogata al carico (linea verde).



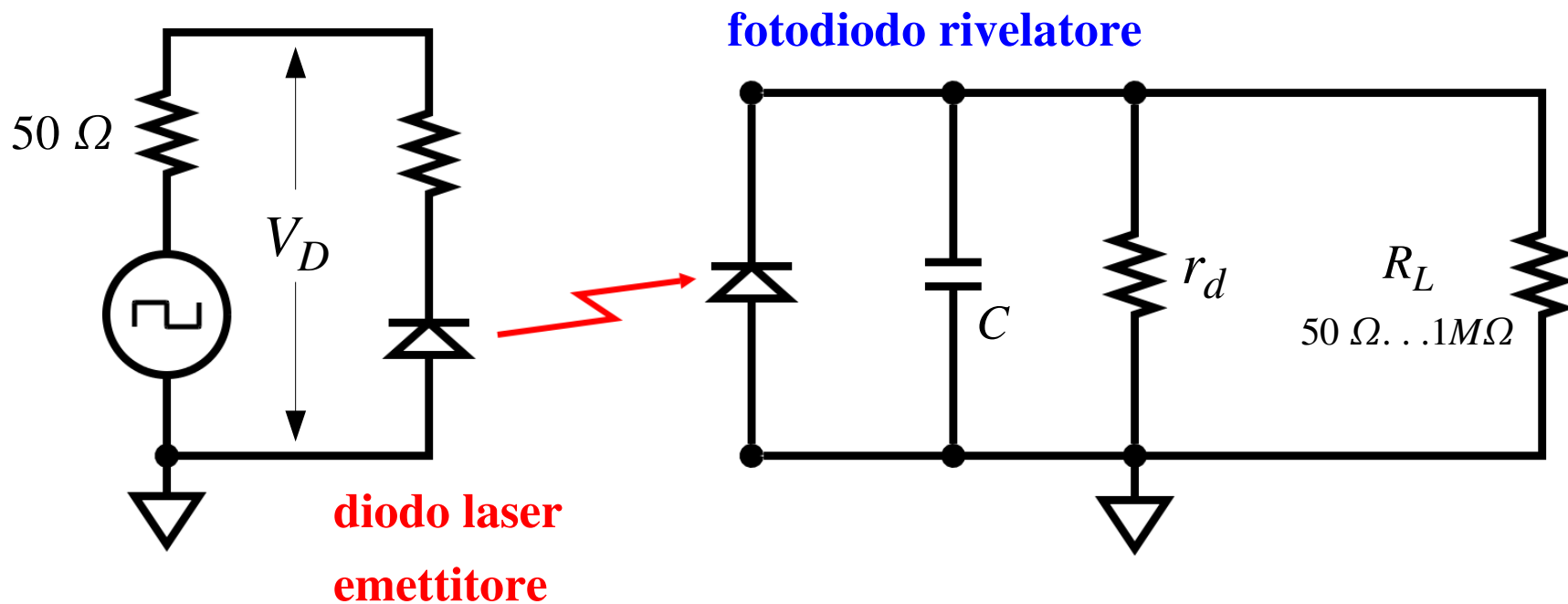
Condizione di massima potenza erogata:

$$P = I \cdot V$$

$$dP / dI = V + I \cdot dV / dI = 0$$

$$V / I = R_L = - dV / dI$$

Trasmissione e ricezione di segnali mediante impulsi di luce

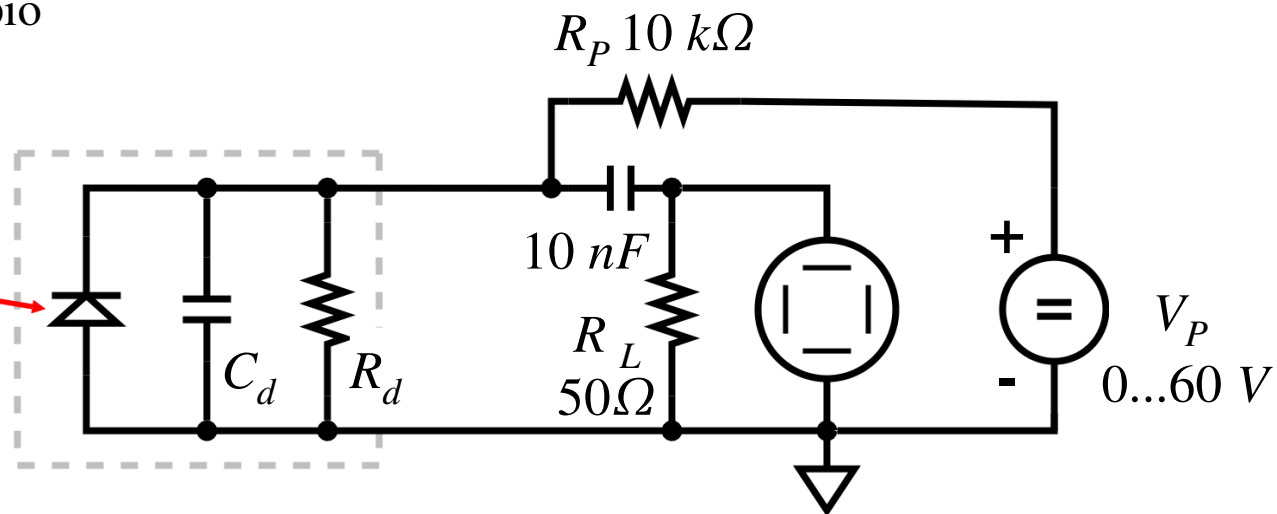
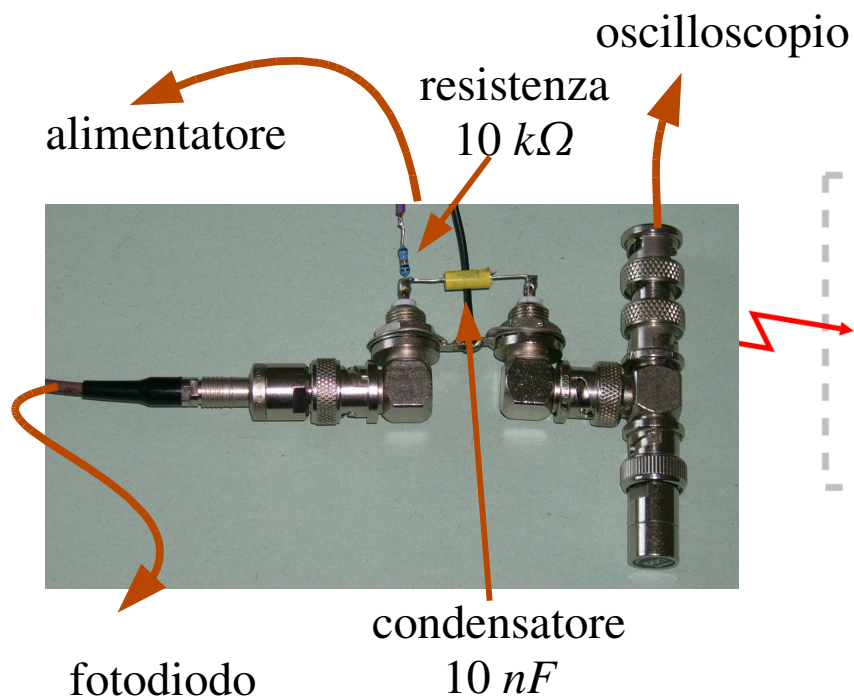
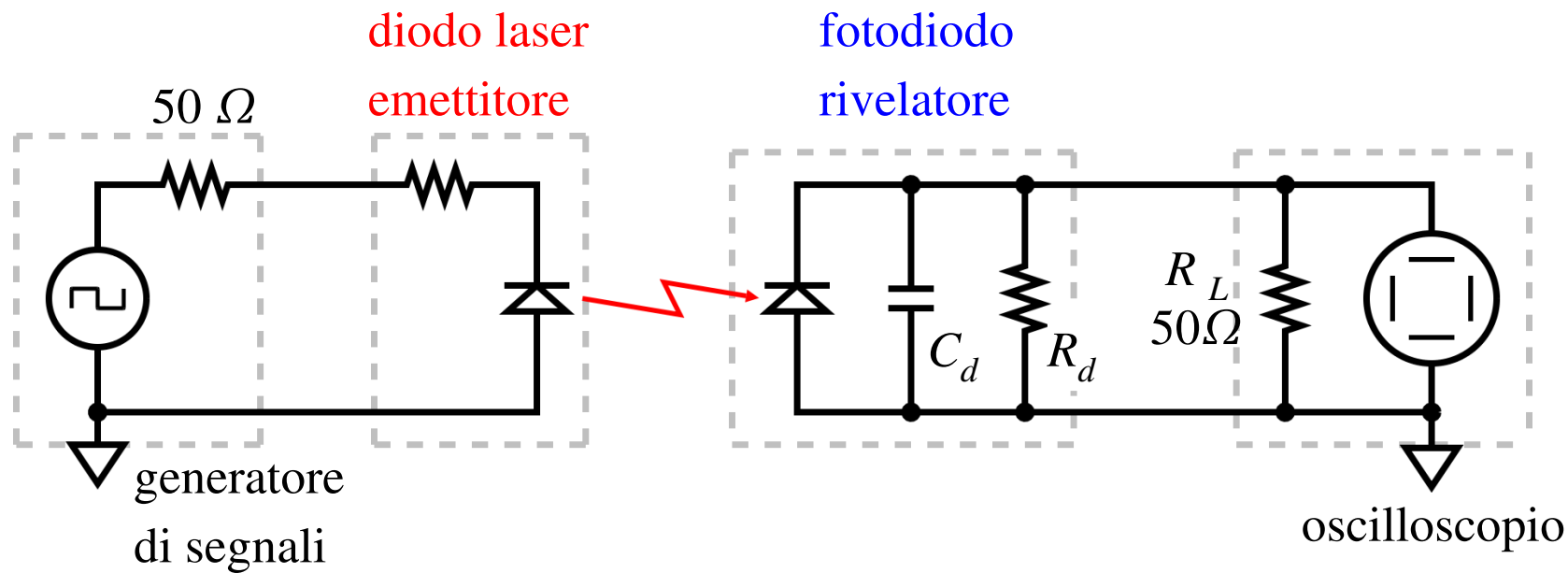


C capacita' del fotodiodo

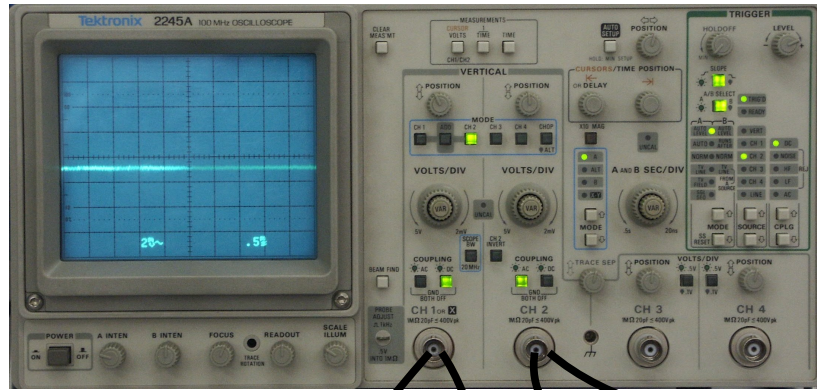
r_d resistenza dinamica del fotodiodo

R_L resistenza di ingresso dello strumento di misura

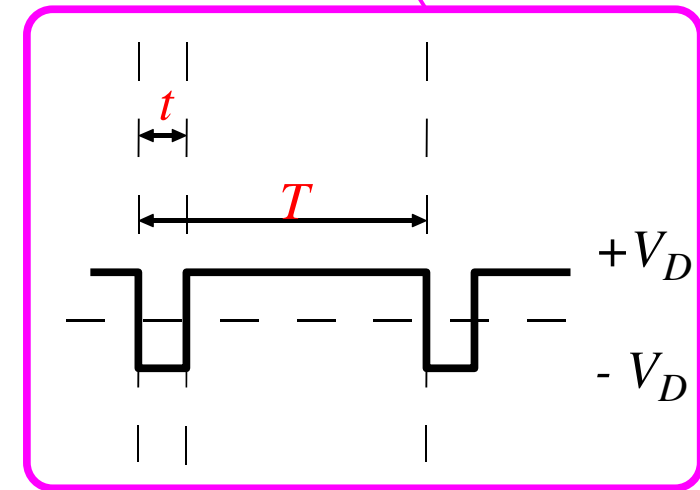
$\tau = (R_L \parallel r_d) \cdot C$ velocita' di risposta



Trasmissione e ricezione di segnali mediante impulsi di luce



resistenza



LIMITI MASSIMI ASSOLUTI

$$V_D: \leq 4.5 \text{ V}$$

$$\text{duty cycle: } t / T \leq 0.1$$

