



ELETTRONICA

CdS Ingegneria Biomedica

LEZIONE A.01

Diodi: funzionamento, parametri, caratteristiche

Funzionamento del diodo

Proprietà dei diodi reali

Modelli di diodi reali

Analisi di circuiti a diodi reali

Diodi di tipo particolare

Potenza nei diodi 16/3



Parte 1

Funzionamento dei diodi a giunzione

Semiconduttori

Semiconduttori drogati di tipo n e p

Diodo a giunzione

Semiconduttori

- **Materiali del gruppo 4 o composti 3-5**
 - Silicio, germanio, arseniuro di gallio
 - Stato monocristallino
 - Legame covalente con 4 elettroni coinvolti
- **Scarsa conducibilità nel materiale puro (intrinseco)**
 - A T_{amb} ci sono pochi portatori di carica
 - Elettroni e lacune (assenza di uno dei 4 legami)
 - **Possibilità di includere altri atomi nel reticolo cristallino**
 - Accettori: elementi del gruppo 3 (boro, gallio, indio)
 - Donatori: elementi del gruppo 5 (fosforo, arsenico, antimonio)

Semiconduttori drogati (1)

➤ Semiconduttore di tipo *n* e *p*

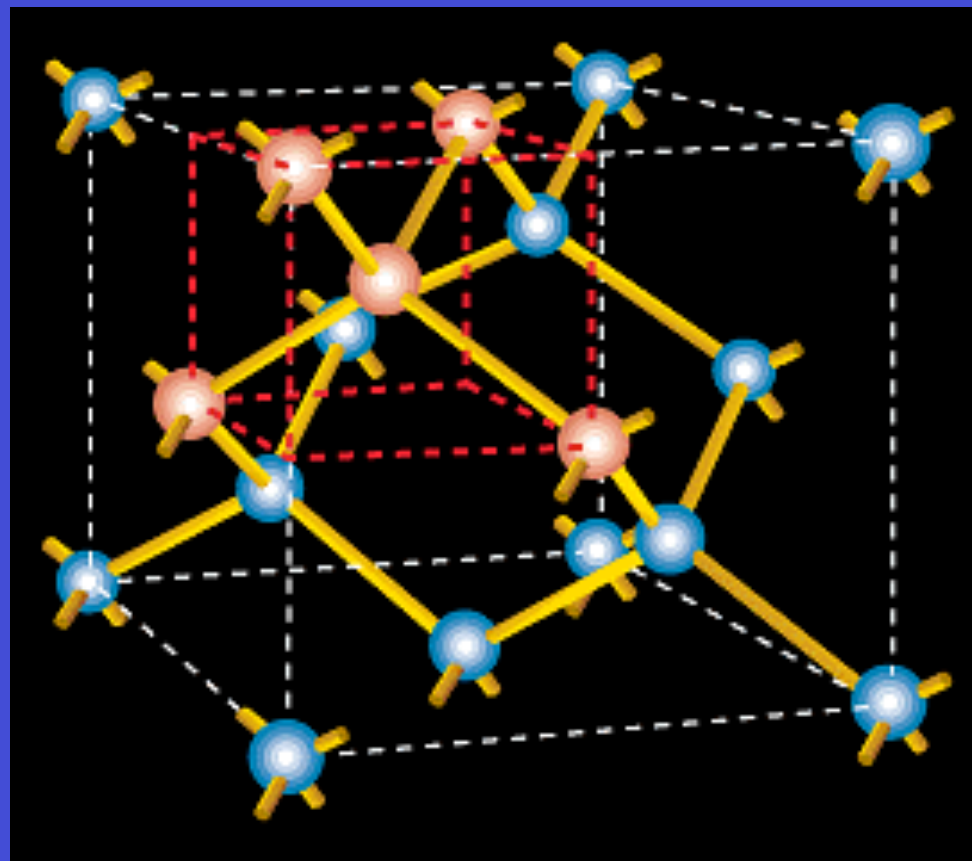
➤ Droganti donatori: hanno 5 elettroni disponibili

- 4 si impegnano nel legame con il cristallo semiconduttore
- 1 resta libero e può condurre corrente
- Lo ione donatore imprigionato nel cristallo ha carica positiva

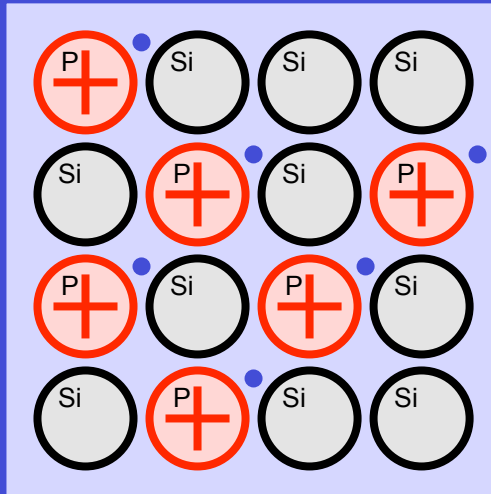
➤ Droganti accettori: hanno solo 3 elettroni

- Resta un legame scoperto che si definisce lacuna
- Permette il movimento di cariche, come un buco in una fila
- La lacuna si comporta come una carica positiva
- Lo ione accettore imprigionato nel cristallo ha carica negativa

Semiconduttori drogati (2)

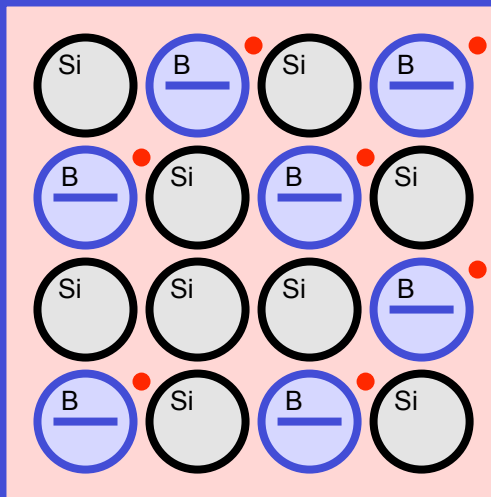


Semiconduttori drogati (2)



➤ Tipo *n*

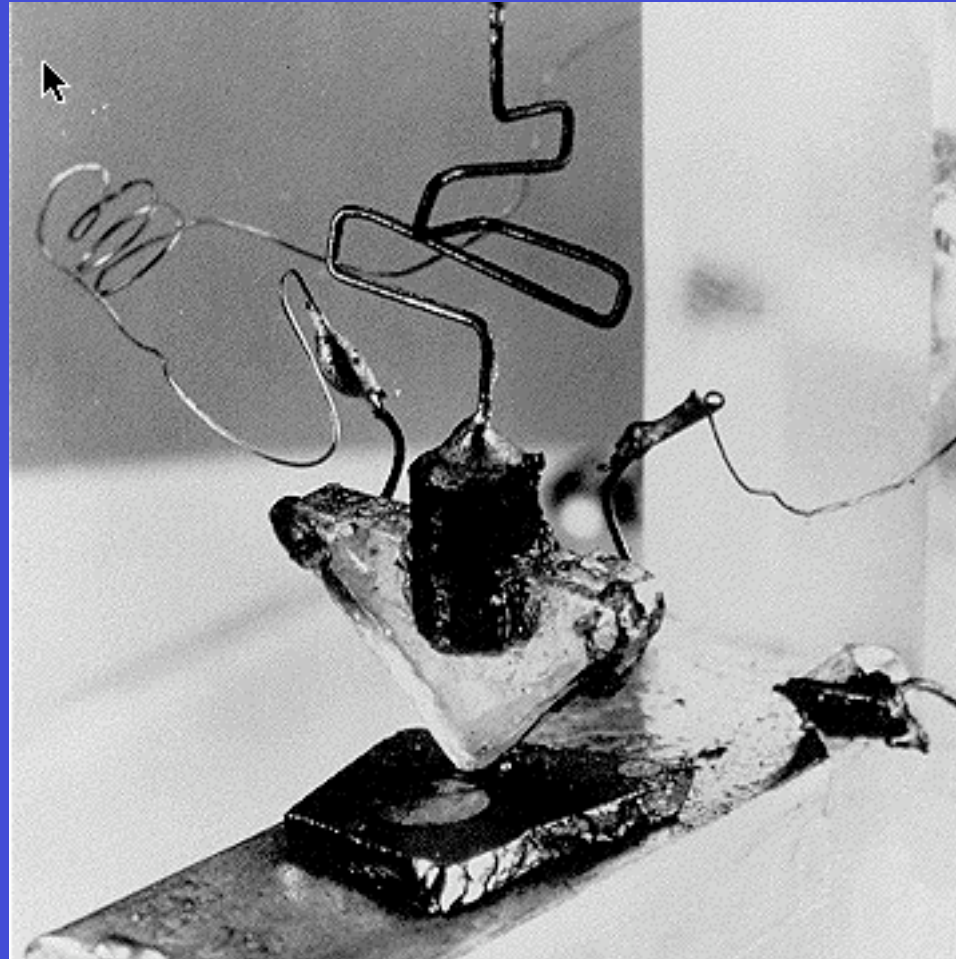
- Silicio (Si)
- Drogato con atomi di fosforo (P)
- Portatori di corrente: elettroni



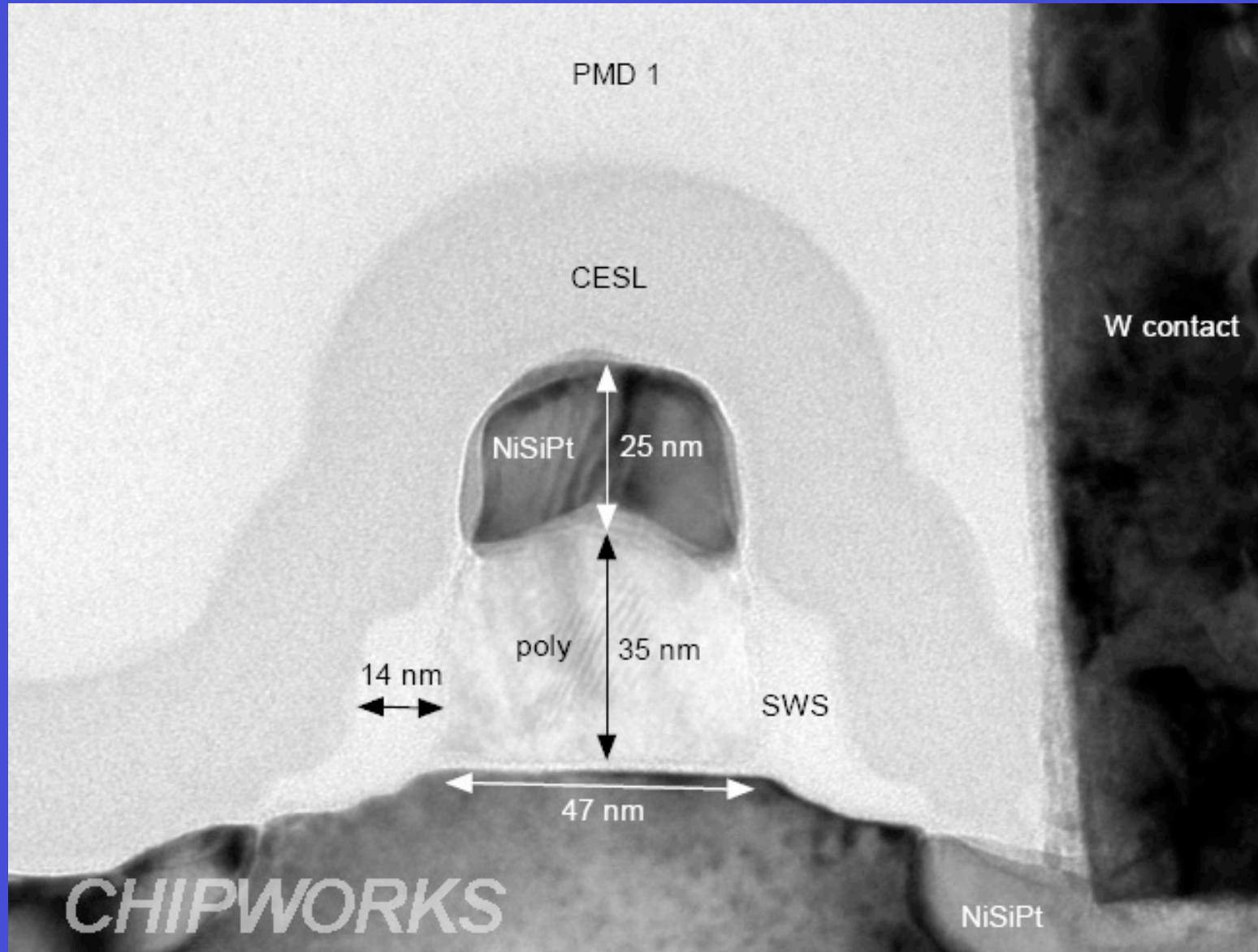
➤ Tipo *p*

- Silicio (Si)
- Drogato con atomi di boro (B)
- Portatori di corrente: lacune

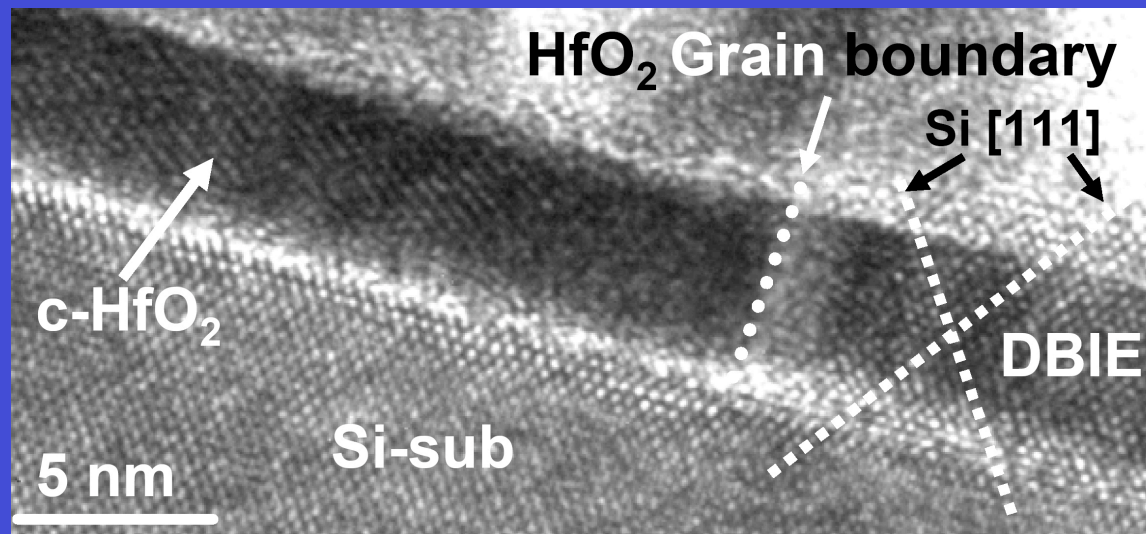
Primo Transistor (1947)



Into the small



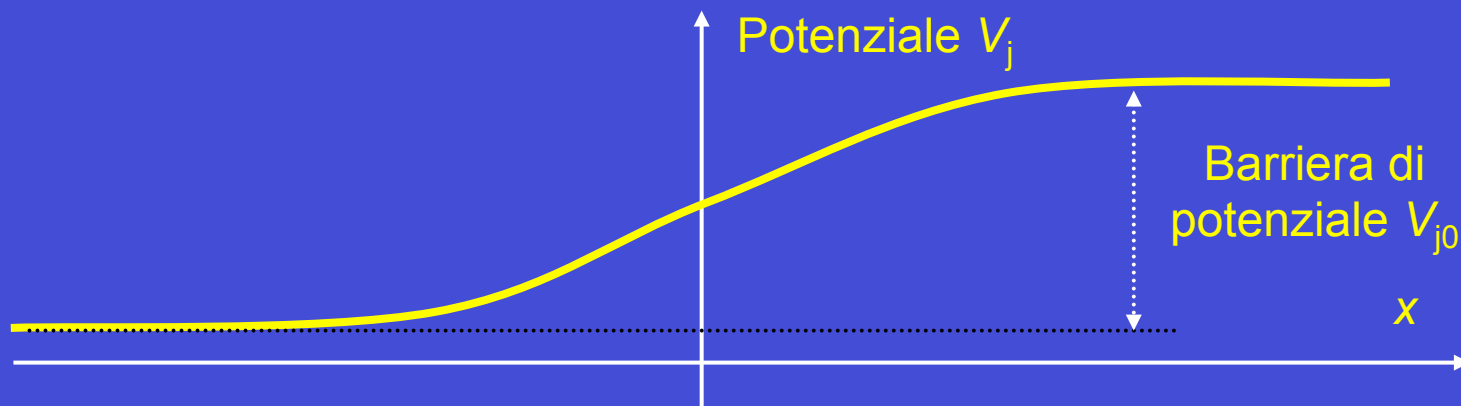
Semiconduttori drogati (2)



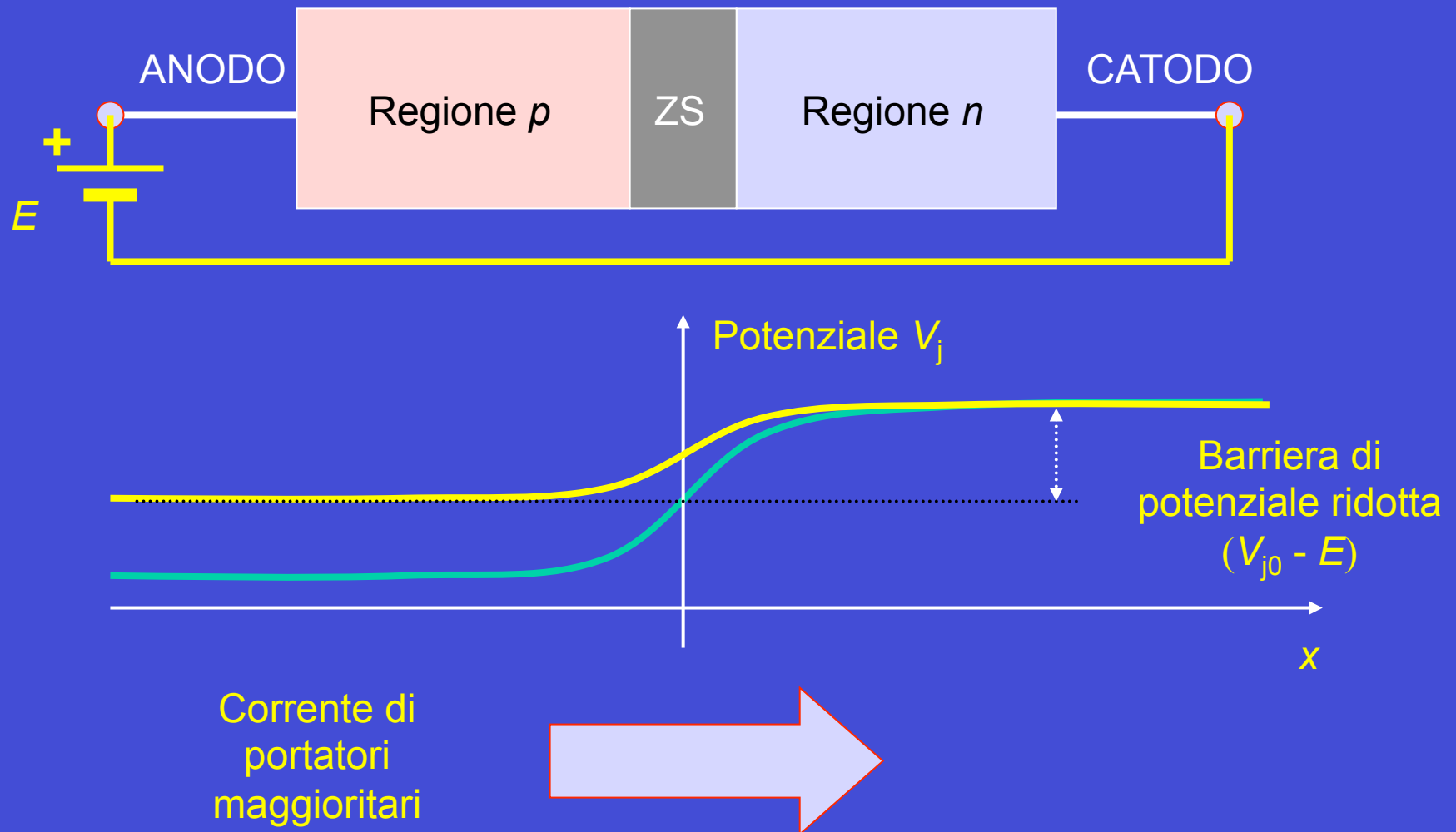


1861 > 2011 >>
150° anniversario Unità d'Italia

Giunzione *pn*



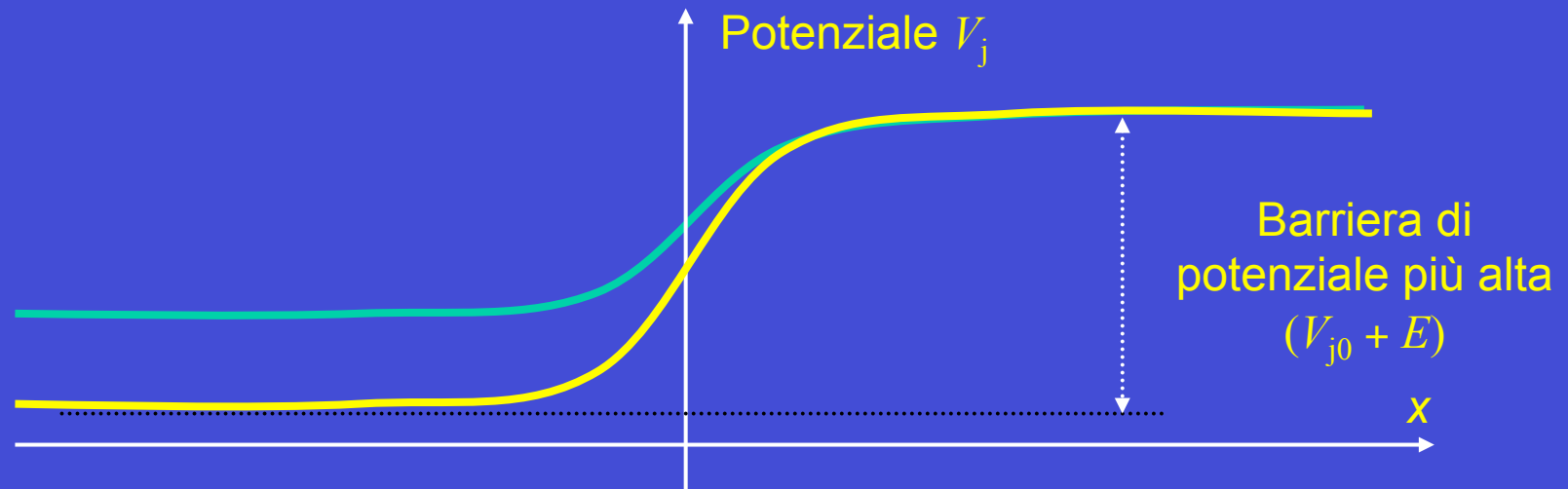
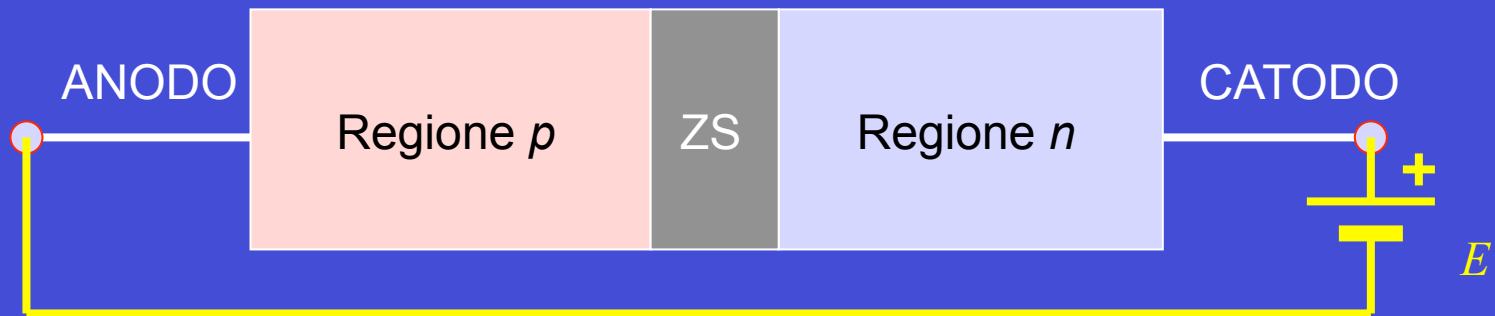
Polarizzazione diretta





1861 > 2011 >>
150° anniversario Unità d'Italia

Polarizzazione inversa



Corrente di portatori minoritari (molto piccola)





Parte 2

Proprietà dei diodi a giunzione

Caratteristica $i-v$

Tensione di accensione V_γ

Stima dei parametri

Effetto della temperatura

Il fenomeno del breakdown

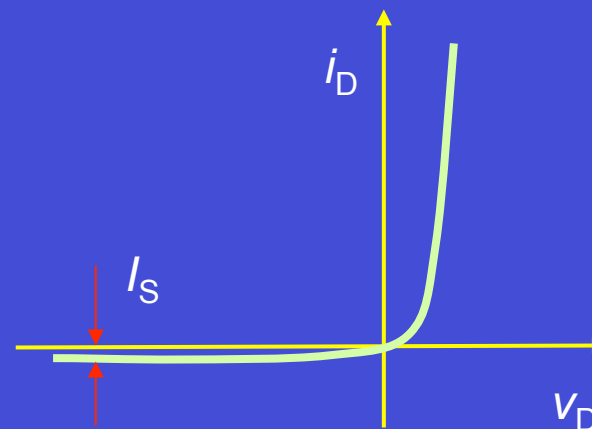
Caratteristica i - v dei diodi

➤ Espressione analitica

➤ Equazione di Shockley

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

V_D, i_D	tensione e corrente del diodo
η	fattore di idealità (1÷2)
I_S	corrente inversa di saturazione
$V_T = kT/q$	tensione termica (25.69 mV a 25°C)
k	costante di Boltzmann ($1.3806 \cdot 10^{-23}$ J/°K)
T	temperatura assoluta della giunzione
q	carica dell' elettrone ($1.6022 \cdot 10^{-19}$ C)



Tensione di accensione V_γ

- Per applicazioni pratiche si può individuare una tensione di “accensione” del diodo
 - Valore della v_D per correnti di interesse pratico
 - La v_D dipende da i_D con legge logaritmica (cioè poco)
 - Se la corrente aumenta di 10 volte, v_D aumenta di $(\eta \cdot 59)$ mV circa
- Definizione convenzionale (@ $I_D = I_0$)
 - V_γ può definirsi come “tensione per $I_D = 10$ mA”
- Dipende principalmente dal materiale
 - Per il silicio $V_\gamma \cong 0.7$ V
 - Per il germanio $V_\gamma \cong 0.2$ V
 - Per l'arseniuro di gallio $V_\gamma \cong 1.5$ V

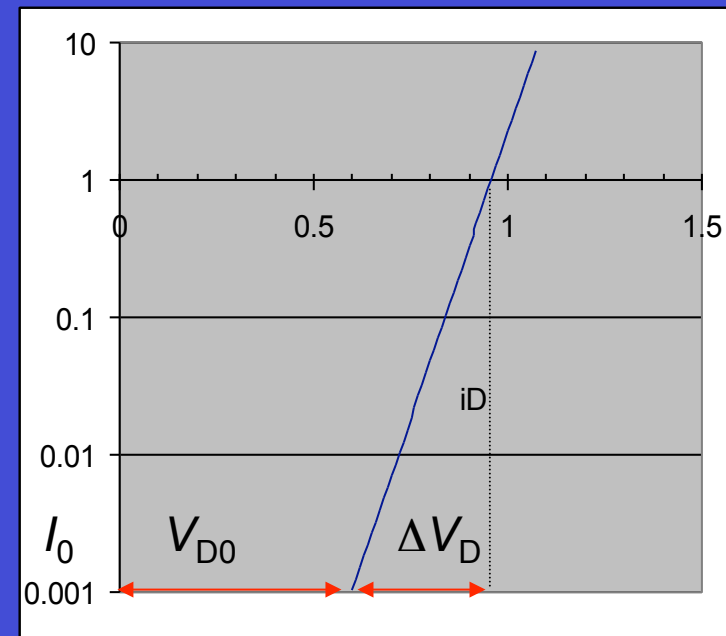
Determinazione dei parametri

- **Grafico semilogaritmico della caratteristica $i-v$**
 - **Andamento lineare (stima dell'equazione della retta)**
 - **Dalla pendenza si ricava il fattore di idealità**
 - **Dall'intercetta su x , la corrente inversa di saturazione**

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \cong I_S e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}$$

$$\log\left(\frac{i_D}{I_0}\right) = \frac{V_D}{2.3 \cdot \eta V_T} + \log\left(\frac{I_S}{I_0}\right)$$

$$\eta = \frac{\Delta V_D}{3 \cdot 2.3 \cdot V_T}; \quad I_S = I_0 \cdot 10^{-\frac{V_{D0}}{2.3 \cdot \eta V_T}}$$



Effetti della temperatura (1)

- **Effetto sulla corrente di saturazione inversa**
 - **Variazione percentuale costante**
 - **Raddoppia circa ogni 10°C**

$$\frac{dI_S(T)}{dT} \cong I_S(T) \cdot \frac{0.072}{^\circ\text{K}}$$

$$I_S(T) = I_S(T_0) \cdot e^{0.072(T-T_0)}$$

$$I_S(T_1) = 2I_S(T_0) = I_S(T_0) \cdot e^{0.072(T_1-T_0)}$$

$$T_1 = T_0 + \frac{\ln(2)}{0.072} = T_0 + 9.627^\circ\text{K}$$



Effetti della temperatura (2)

$$I_D = I_S \left(\exp \frac{V_D}{\eta V_T} - 1 \right)$$



Effetti della temperatura (2)

$$I_D = I_S \left(\exp^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad I_0 = I_S \left(\exp^{\frac{V_\gamma}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{KT}{q}$$



Effetti della temperatura (2)

$$I_D = I_S \exp \frac{V_D}{V_T} - 1 \quad I_0 = I_S \left(\exp \frac{V_\gamma}{\eta V_T} - 1 \right)$$

$$V_\gamma = \eta V_T \ln \left(\frac{I_0 + I_S}{I_S} \right) \quad V_T = \frac{KT}{q}$$

Effetti della temperatura (2)

$$I_D = I_S \left(\exp \frac{V_D}{\eta V_T} - 1 \right) \quad I_0 = I_S \left(\exp \frac{V_\gamma}{\eta V_T} - 1 \right)$$

$$V_\gamma = \eta V_T \ln \left(\frac{I_0 + I_S}{I_S} \right) \quad V_T = \frac{KT}{q}$$

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{V_\gamma}{T} + \eta V_T \frac{I_S}{I_S + I_0} \left(-\frac{I_0}{I_S^2} \right) I_S 0.072$$

Effetti della temperatura (2)

$$I_D = I_S \left(\exp^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad I_0 = I_S \left(\exp^{\frac{V_\gamma}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

$$V_\gamma = \eta V_T \ln \left(\frac{I_0 + I_S}{I_S} \right) \quad V_T = \frac{KT}{q}$$

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{V_\gamma}{T} + \eta V_T \frac{I_S}{I_S + I_0} \left(-\frac{I_0}{I_S^2} \right) I_S 0.072$$

$$I_S \ll I_0$$

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{V_\gamma}{T} - 0.072 \eta V_T$$

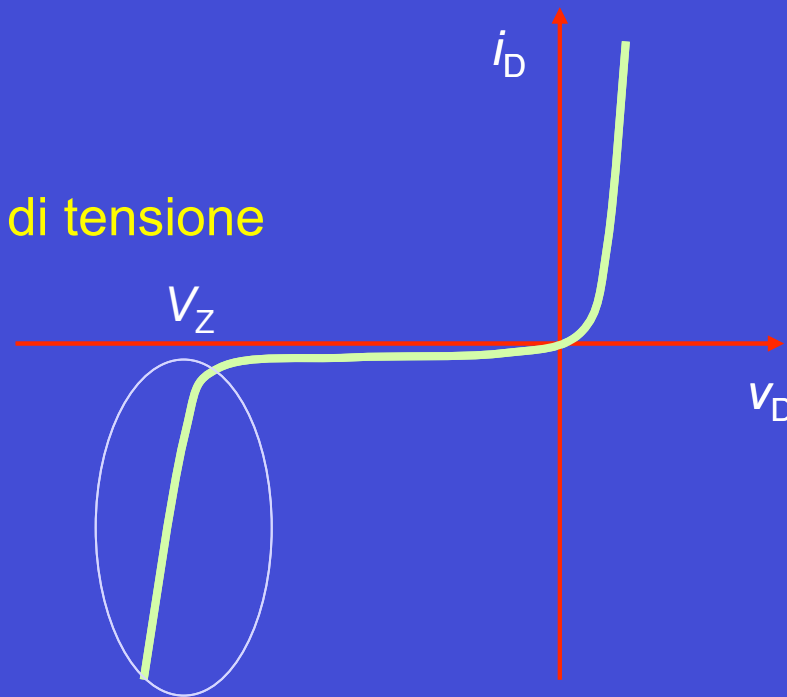
Effetti della temperatura (2)

- **Effetto sulla tensione V_γ**
 - **Decresce in modo quasi lineare**
 - **Per il silicio, diminuisce di circa 2 mV per 1°C**

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{V_\gamma}{T} - 0.072\eta V_T$$

Il fenomeno del breakdown

- **Campo elettrico sufficiente alla rottura dei legami**
 - **Produzione di molte coppie elettrone-lacuna**
 - Effetto tunnel o zener: Elettroni strappati dal campo elettrico
 - Effetto valanga: Rottura dei legami per urto
 - **Potenziale costante V_Z**
 - Indipendente dalla corrente
 - Utile per realizzare riferimenti di tensione



Parte 3

Ricerca del punto di riposo in circuiti con diodi reali

Metodo grafico

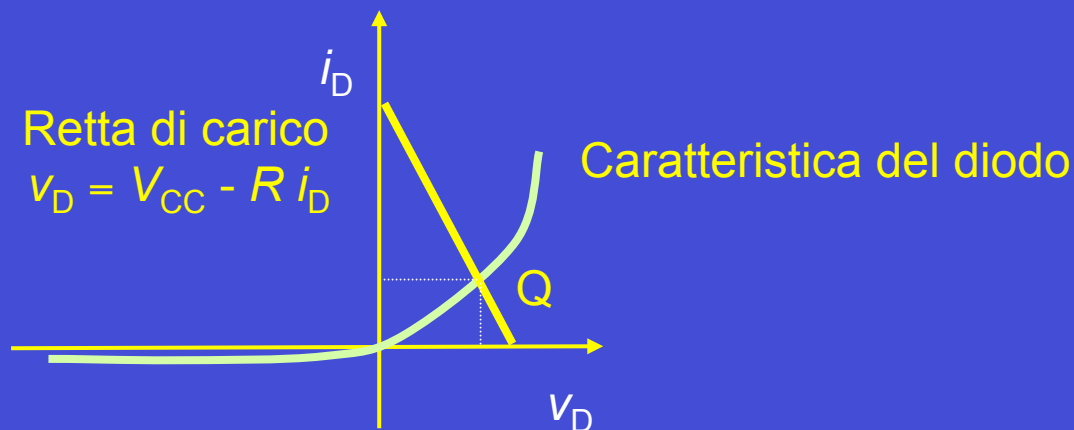
Metodo iterativo

Modello approssimato per grandi segnali

Modello statico per piccoli segnali

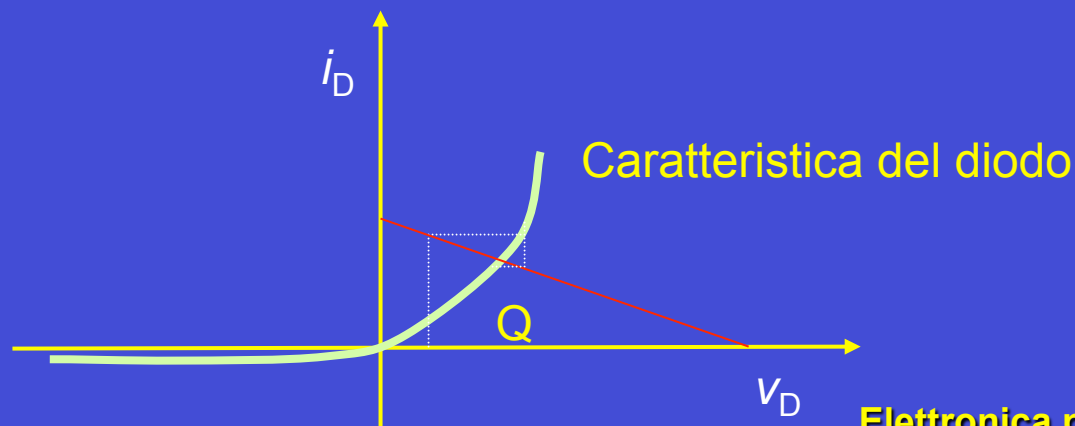
Metodo grafico

- Si esprime il funzionamento della parte lineare del circuito in funzione dei generatori, di v_D e i_D
- Si riporta l'equazione della retta ricavata (retta di carico) sul grafico delle caratteristiche $i-v$
- Il punto di lavoro è dato dall'intersezione



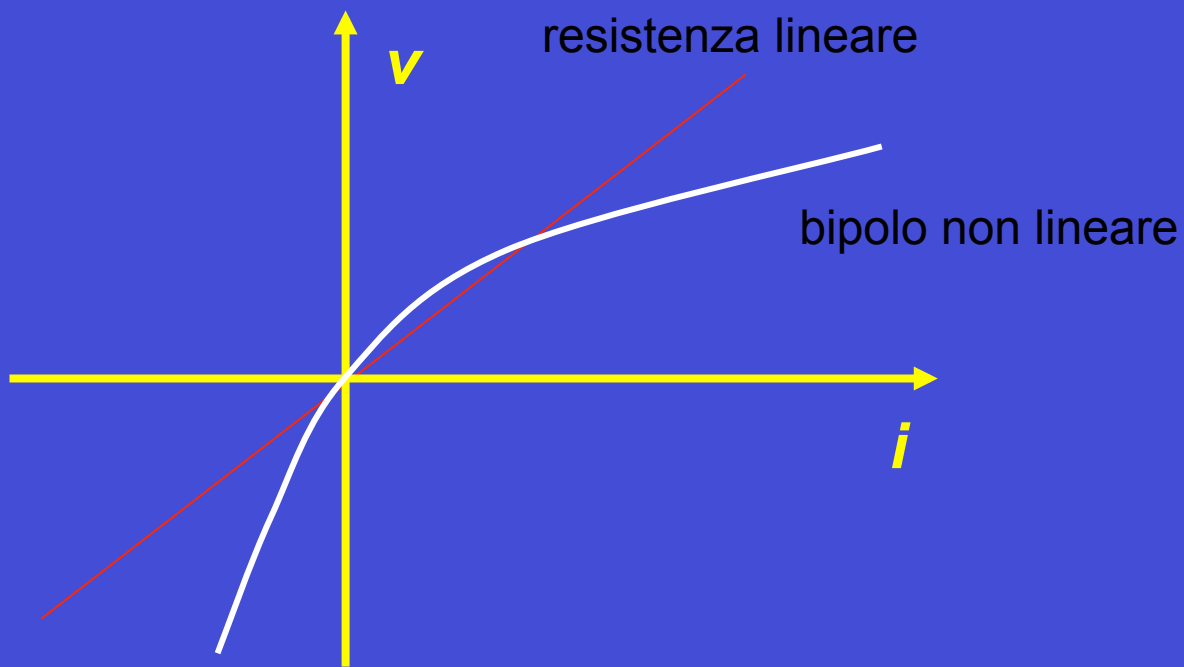
Metodo iterativo 18/3

- Si parte da una soluzione approssimata per v_D
 - Si assume, per esempio, v_D pari a 0.7 V
- Si risolve tutto il circuito, trovando i_D
- Dalla curva i - v si ricava un nuovo valore di v_D
 - Compatibile con la corrente trovata
- Si ripete finché la differenza tra due iterazione è inferiore a una soglia prefissata





1861 > 2011 >>
150° anniversario Unità d'Italia





Parte 2

Tipi di analisi

Analisi per grandi segnali in transitorio

Analisi statica, punto di lavoro

Analisi per piccoli segnali

Linearizzazione



Analisi transitoria per grandi segnali

- **Indispensabile per l'analisi di grandi transitori**
 - **Tipica dei circuiti digitali**
- **Non esiste un punto di riposo**
 - **Le variazioni dei generatori sono tali da non permettere una soluzione approssimata al primo ordine**
- **Il circuito è descritto da equazioni non lineari con relazioni integrali e differenziali**
 - **Soluzioni numeriche con metodi a passi**
 - **Complesse, con lunghi tempi di elaborazione**
- **È richiesto l'uso del simulatore**

Analisi statica

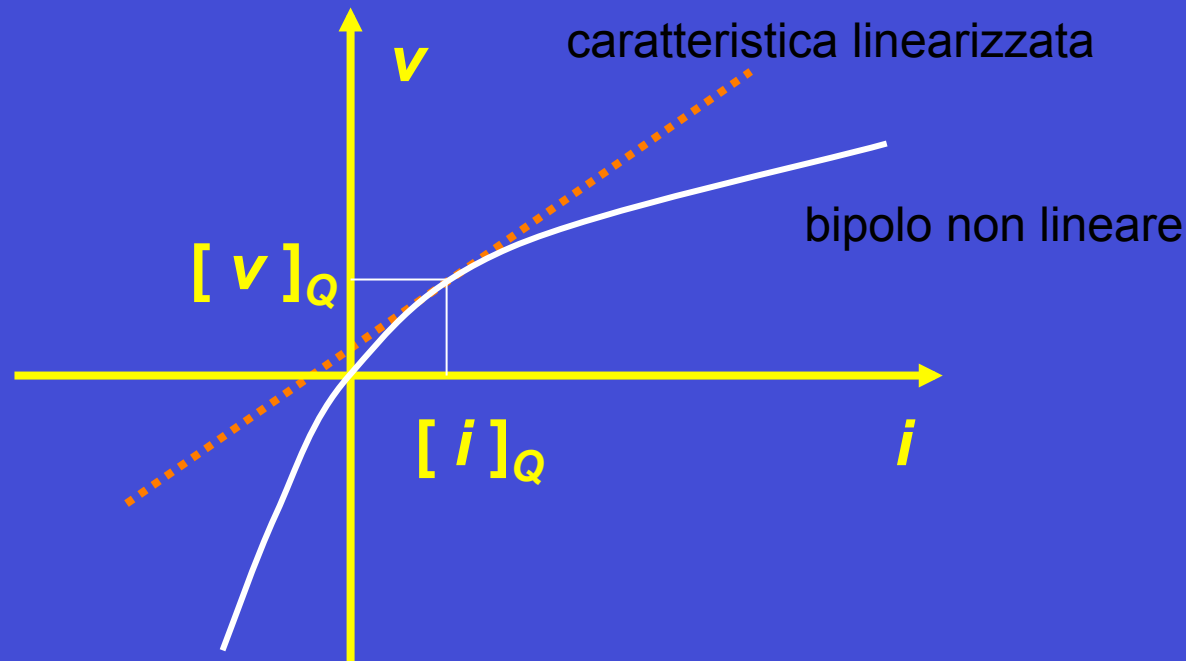
- **Gli elementi con memoria non hanno effetto**
 - I condensatori sono circuiti aperti
 - Le induttanze sono cortocircuiti
- **Soluzione di un sistema non lineare con generatori ed elementi resistivi**
 - Si ricavano i valori di tutte le tensioni e le correnti
 - Si trova cioè un punto Q (o più punti) in uno spazio a molte dimensioni (pari alle variabili indipendenti), in cui valgono tutte le relazioni statiche
 - In casi particolari sono garantite condizioni di **esistenza** e **unicità**, per esempio quando il circuito è composto da generatori indipendenti e resistenze

Analisi statica per piccoli segnali

- **Si trova il punto di lavoro Q**
- **Si considerano piccole variazioni dei segnali di ingresso rispetto ai valori medi**
 - **Lo spostamento del punto Q potrà essere approssimato al primo ordine**
 - **La variazione delle coordinate di Q si può ottenere come combinazione lineare dei piccoli segnali in ingresso**
 - I coefficienti della combinazione si ottengono derivando le espressioni di ciascuna coordinata in funzione del relativo piccolo segnale

Linearizzazione

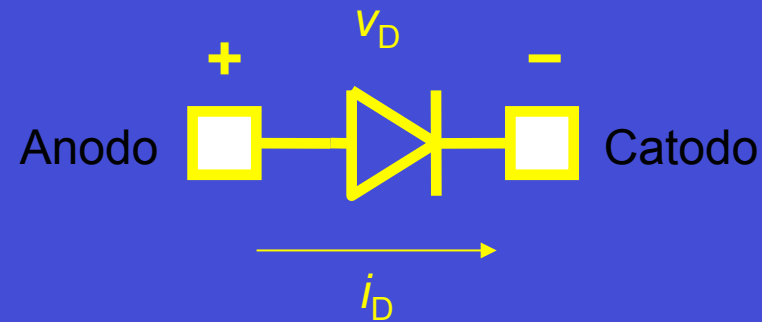
- **Esiste un modo più semplice per trovare i coefficienti**
- **È sufficiente linearizzare la relazione $v-i$ di ogni bipolo nell'intorno del punto di lavoro**



Resistenza differenziale

- La caratteristica linearizzata si trova come
$$v - [v]_Q = [dv/di]_Q (i - [i]_Q)$$
- La pendenza della caratteristica $v-i$ nel punto di lavoro Q viene definita resistenza differenziale
- A questo punto la soluzione per piccoli segnali può essere ottenuta così:
 - Si risolve il sistema lineare ottenuto a partire dal circuito elettrico composto
 - ① dai generatori indipendenti dei piccoli segnali (privi del valore medio)
 - ② dalle resistenze differenziali r_o di tutti i bipoli

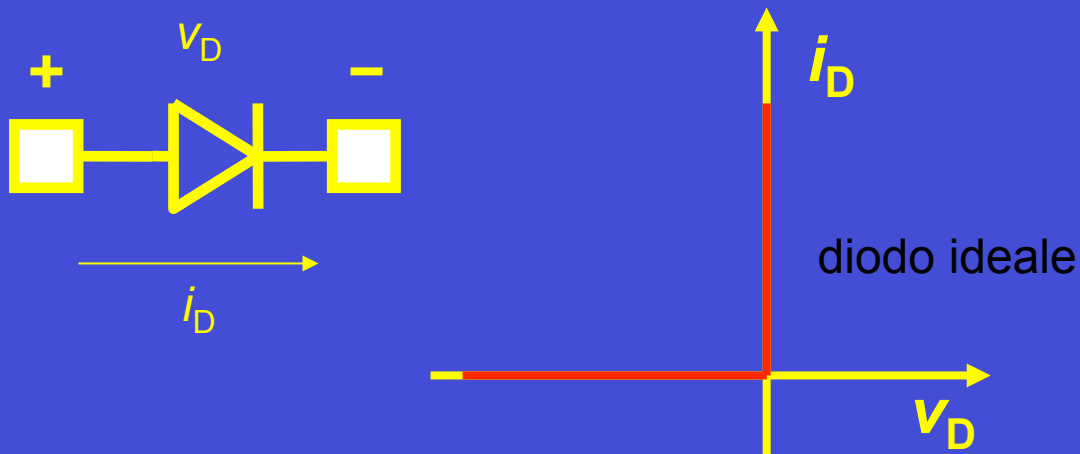
Simbolo e funzionamento



➤ Componente non lineare

- Permette il passaggio di corrente in una sola direzione, da anodo a catodo
- Quando conduce, la caduta di tensione ai suoi capi è trascurabile

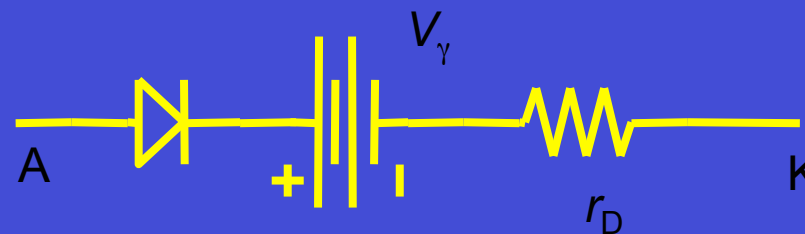
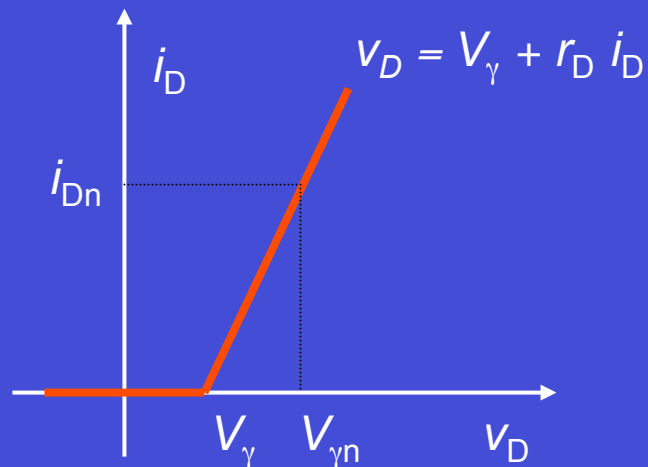
Caratteristica $i-v$



- Per correnti positive è un cortocircuito
- Per tensioni negative è un circuito aperto
- Può essere assimilato a un interruttore controllato
 - In chiusura dal segno della caduta di tensione
 - In apertura dal verso della corrente

Modello per grandi segnali

- Comportamento in inversa praticamente ideale
- In polarizzazione diretta si tiene conto della tensione di accensione e della resistenza differenziale della giunzione
- Modello con diodo ideale, generatore di tensione V_γ e resistenza r_D





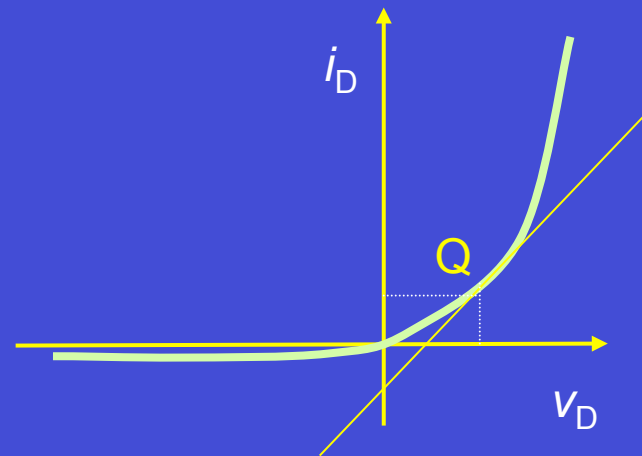
1861 > 2011 >
150° anniversario Unità d'Italia

Modello statico per piccoli segnali

- **Nell'analisi linearizzata il diodo resta sempre nella stessa regione**
 - In inversa può essere sostituito con un circuito aperto
 - Resistenza dell'ordine dei gigaohm
 - In diretta si modella con una resistenza differenziale
 - Inverso della pendenza della caratteristica i - v nel punto di lavoro
 - Analiticamente

$$v_D \cong \eta V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$$

$$r_D = \frac{dv_D}{di_D} \cong \frac{\eta V_T}{i_D}$$





Parte 4

Diodi particolari

Diodi schottky

Diodi zener

LED

Diodi schottky

- **Diodi a giunzione metallo-semiconduttore**
 - **Si forma quando il metallo viene a contatto con un semiconduttore drogato leggermente**
 - **Tensione di accensione minore (0.3 V)**
 - **La corrente è trasportata dai portatori maggioritari**
 - Diffondono verso il metallo e non verso un semiconduttore di tipo opposto (dove sarebbero minoritari)
 - Manca il tempo di immagazzinamento
 - Dispositivi molto più veloci

Simbolo



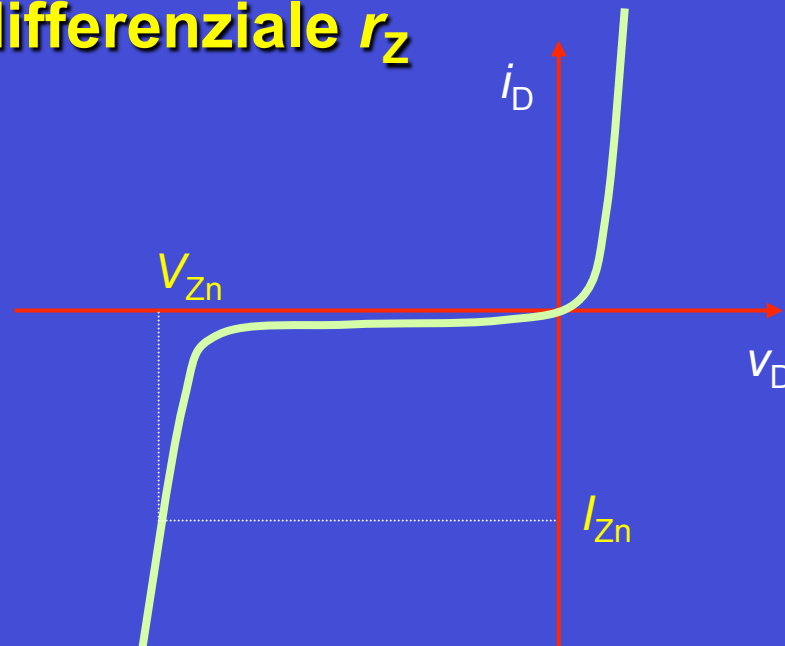


1861 > 2011 >>
150° anniversario Unità d'Italia

Diodi zener

- **Funzionano nella regione di breakdown**
 - In diretta sono diodi normali
 - In inversa conducono se la tensione inversa supera V_Z
 - Nelle condizioni nominali (V_{Zn} @ I_{Zn}) presentano una bassa resistenza differenziale r_z

Simbolo



Modello del diodo zener

➤ Modello per grandi segnali

➤ Resistenze del modello

➤ Resistenza differenziale in diretta r_D e in breakdown r_Z

➤ Tensioni delle batterie del modello

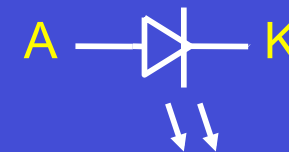
➤ Tensione di accensione in diretta $V_{\gamma 0} = V_{\gamma} - I_D r_D$

➤ In inversa $V_Z = V_{Zn} - I_{Zn} r_Z$

LED

- **Light emitting diode**
 - Vari colori: rosso, verde, giallo, blu
 - Emissione spettrale a righe
- **Particolari tipi di materiali**
 - Arseniuro di gallio, silicio poroso
- **Caratteristiche elettriche**
 - V_{γ} elevata (1.5 V)
 - Tensione di breakdown bassa

Simbolo





Parte 5

Aspetti energetici

Potenza dissipata in un diodo

Trasmissione del calore

Riduzione della massima potenza dissipabile

Potenza dissipata nei diodi

➤ Potenza istantanea

$$P_D = v_D i_D$$

➤ Modello linearizzato per grandi segnali

$$v_D = V_\gamma + r_d i_D$$

$$P_D = v_D i_D = V_\gamma i_D + r_d i_D^2$$

➤ Potenza media dissipata

$$P_{Dm} = V_\gamma i_{Dm} + r_d i_{Deff}^2$$

Trasmissione del calore

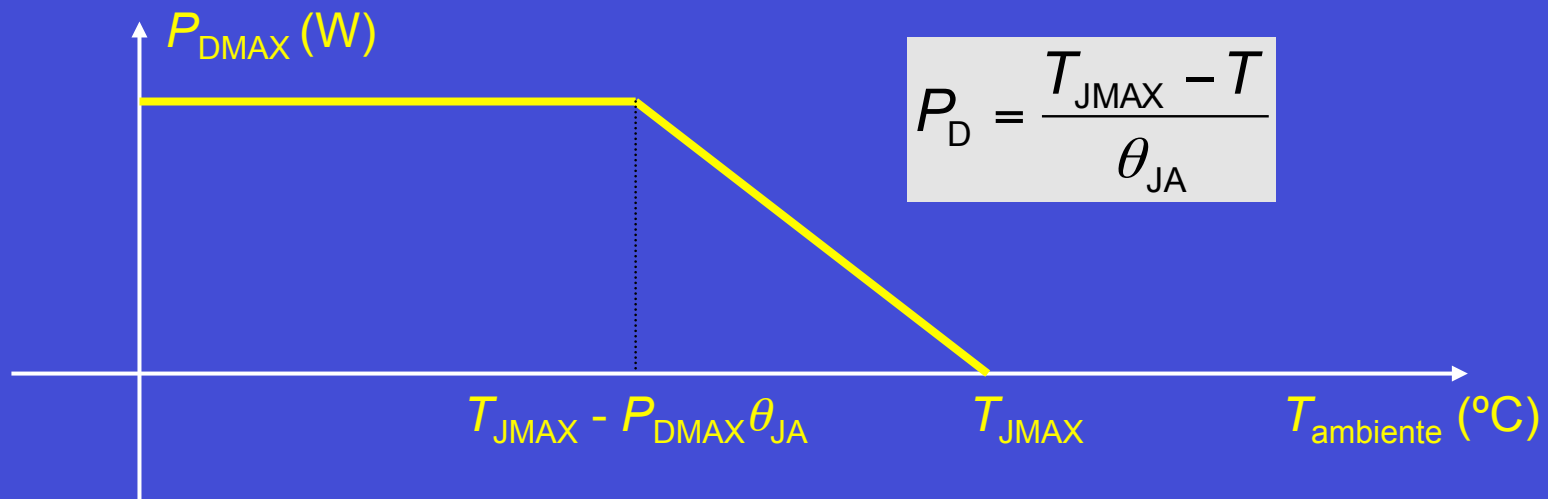
- Dipende dalla differenza di temperatura tra due superfici isoterme e dalla resistenza termica
 - Da giunzione a contenitore θ_{JC}
 - Da contenitore ad ambiente θ_{CA}
 - La resistenza termica dipende dal dissipatore e dal tipo di ventilazione
- Segue approssimativamente una legge lineare

$$P_D = \frac{T_J - T_C}{\theta_{JC}} = \frac{T_C - T_A}{\theta_{CA}}$$

$$P_D = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JC} + \theta_{CA}}$$

Potenza massima dissipabile

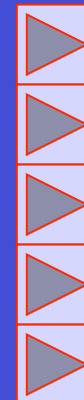
- **Potenza massima dissipabile**
 - La massima corrente è limitata
 - La massima temperatura di giunzione è limitata
 - Solitamente da 150°C a 200°C
 - Occorre ridurre la potenza quando aumenta T_{ambiente}



Parte 6

Caratteristiche di diodi

Il diodo da segnali 1N4148
I diodi raddrizzatori 1N400X
Diodi zener 1N47XX
Diodo schottky
LED rosso ad alta efficienza



Fatto & Da fare

- Diodi ideali e reali
- Funzionamento dei diodi a giunzione
- Caratteristica $i-v$
- Schottky, LED, zener
- Manuali (*data sheets*) dei diodi
- Applicazioni dei diodi
- Progettazione di circuiti a diodi