



# 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 $p$

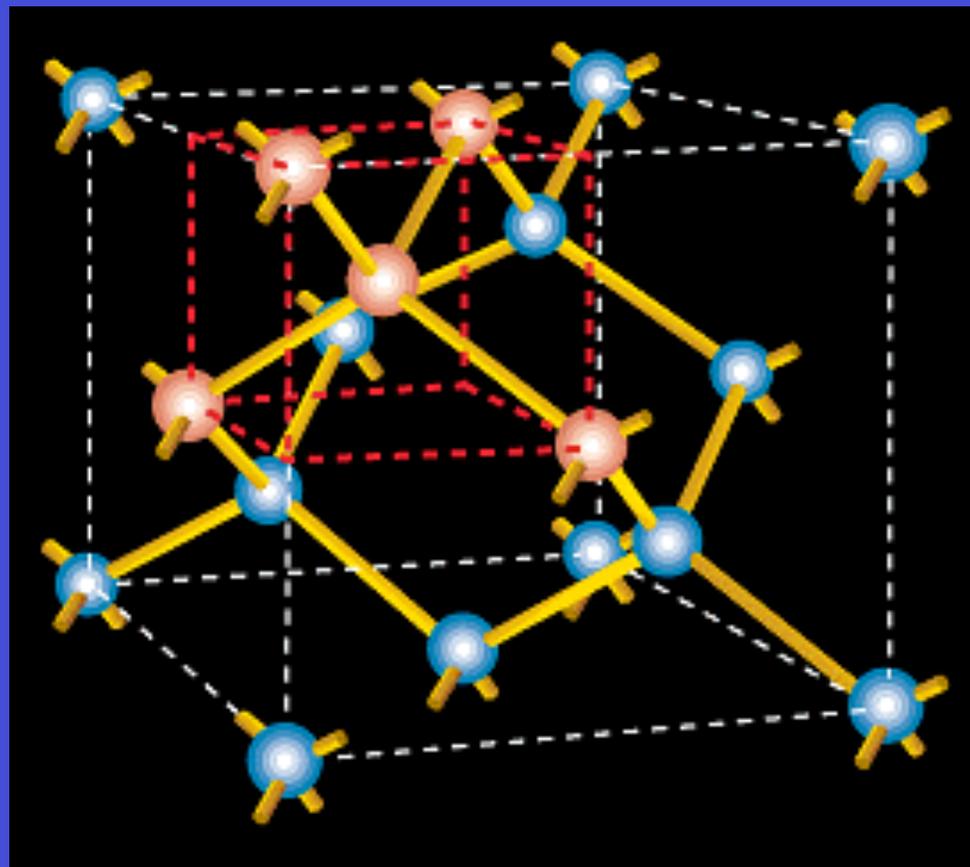
### ➤ Droganti donatori: hanno 5 elettroni disponibili

- 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

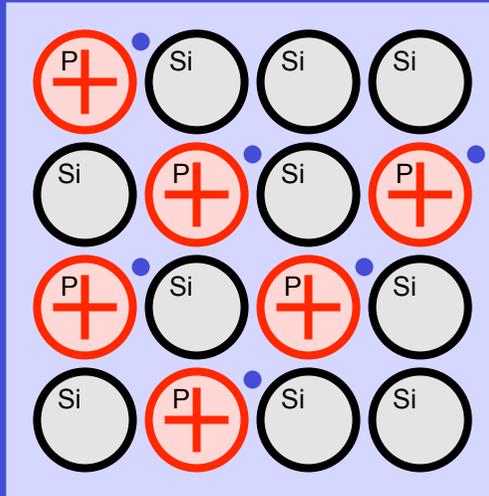
### ➤ Droganti accettori: hanno solo 3 elettroni

- 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)

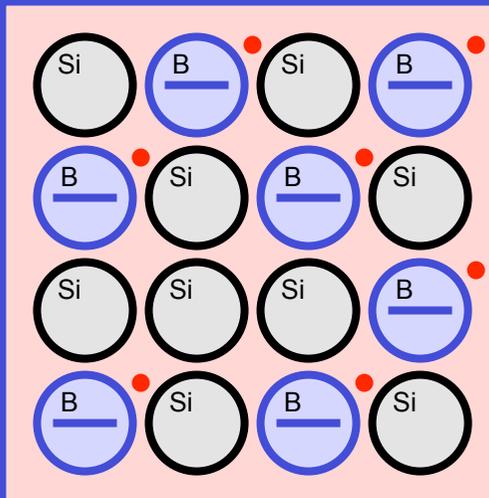


# Semiconduttori drogati (2)



## ➤ Tipo *n*

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



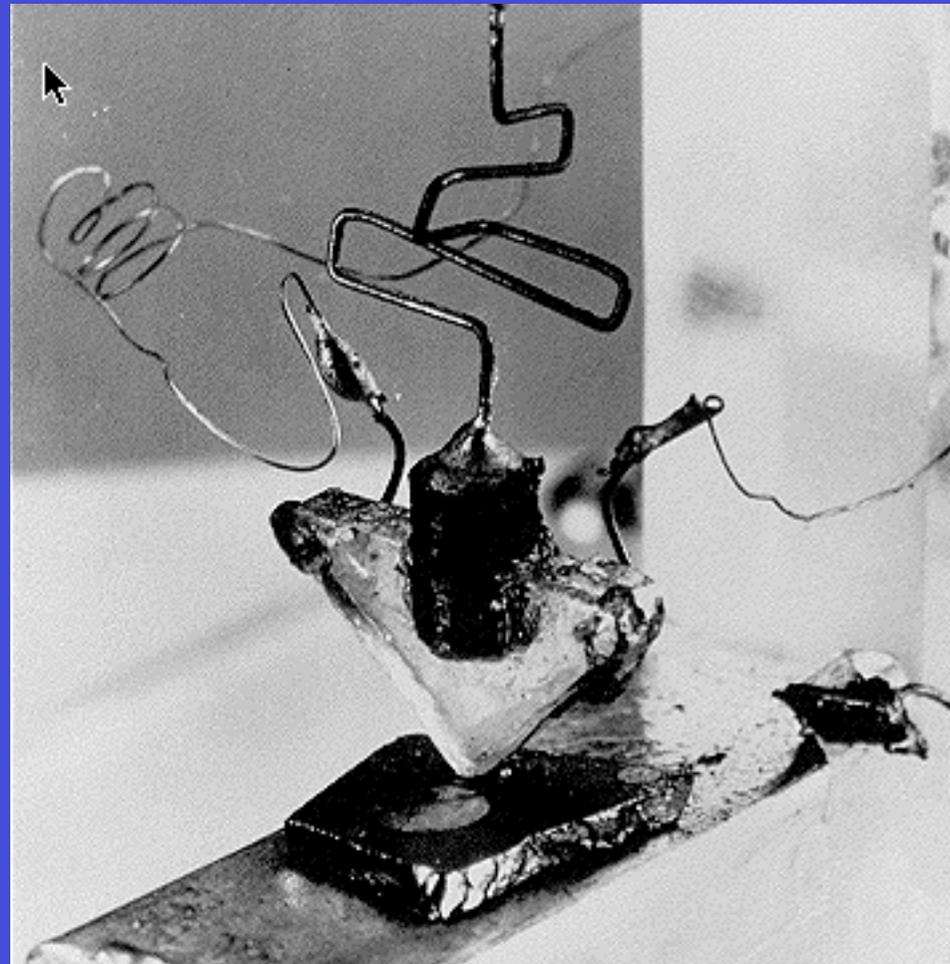
## ➤ Tipo *p*

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

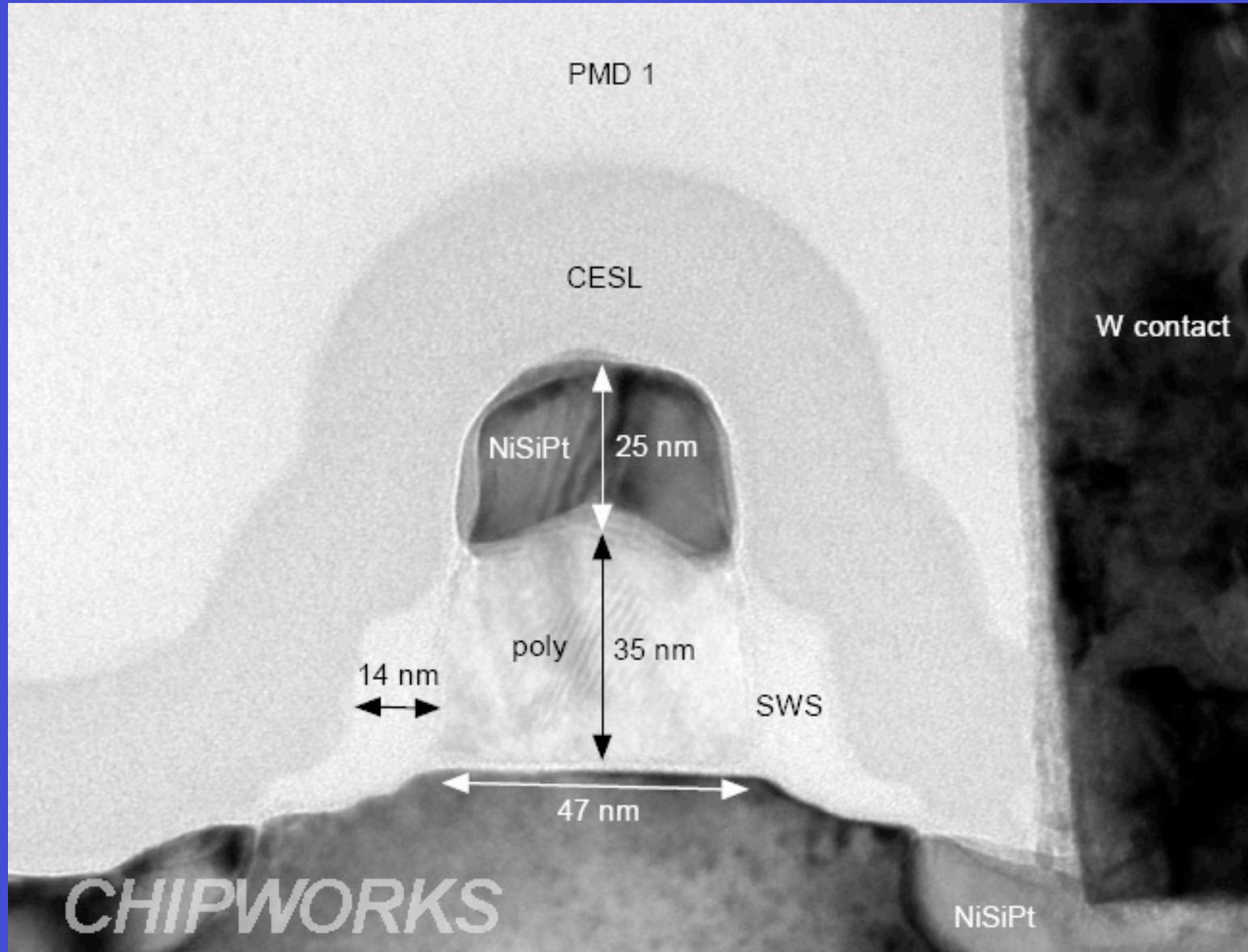


1861 > 2011 >>  
150° anniversario Unità d'Italia

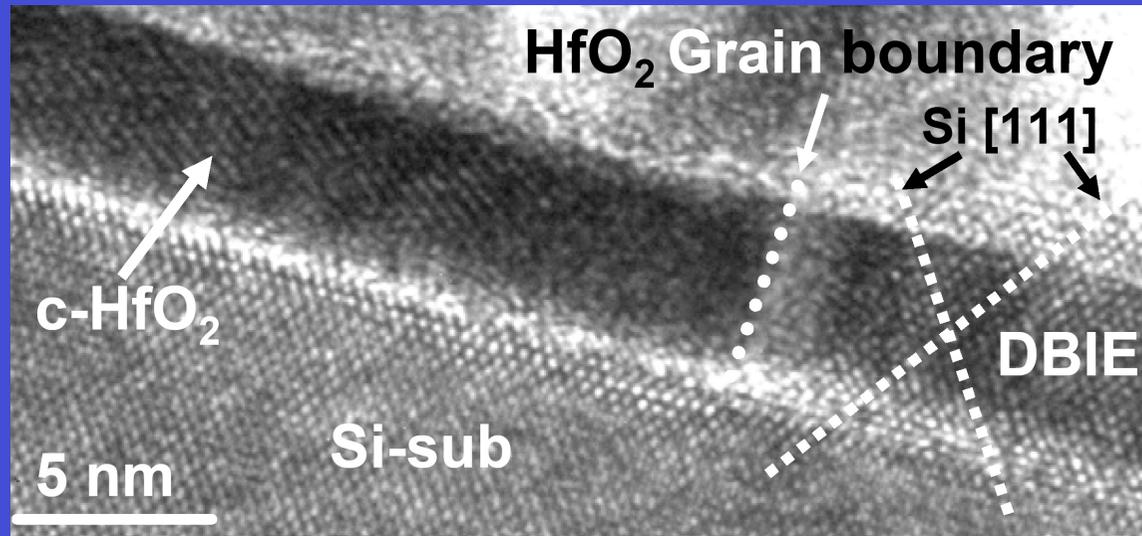
# Primo Transistor (1947)



# Into the small



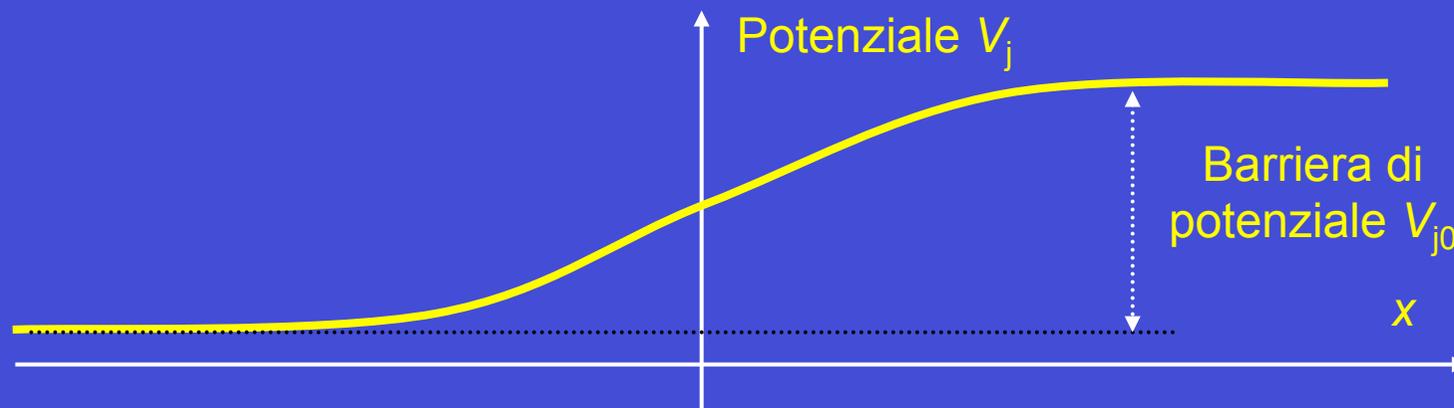
# Semiconduttori drogati (2)



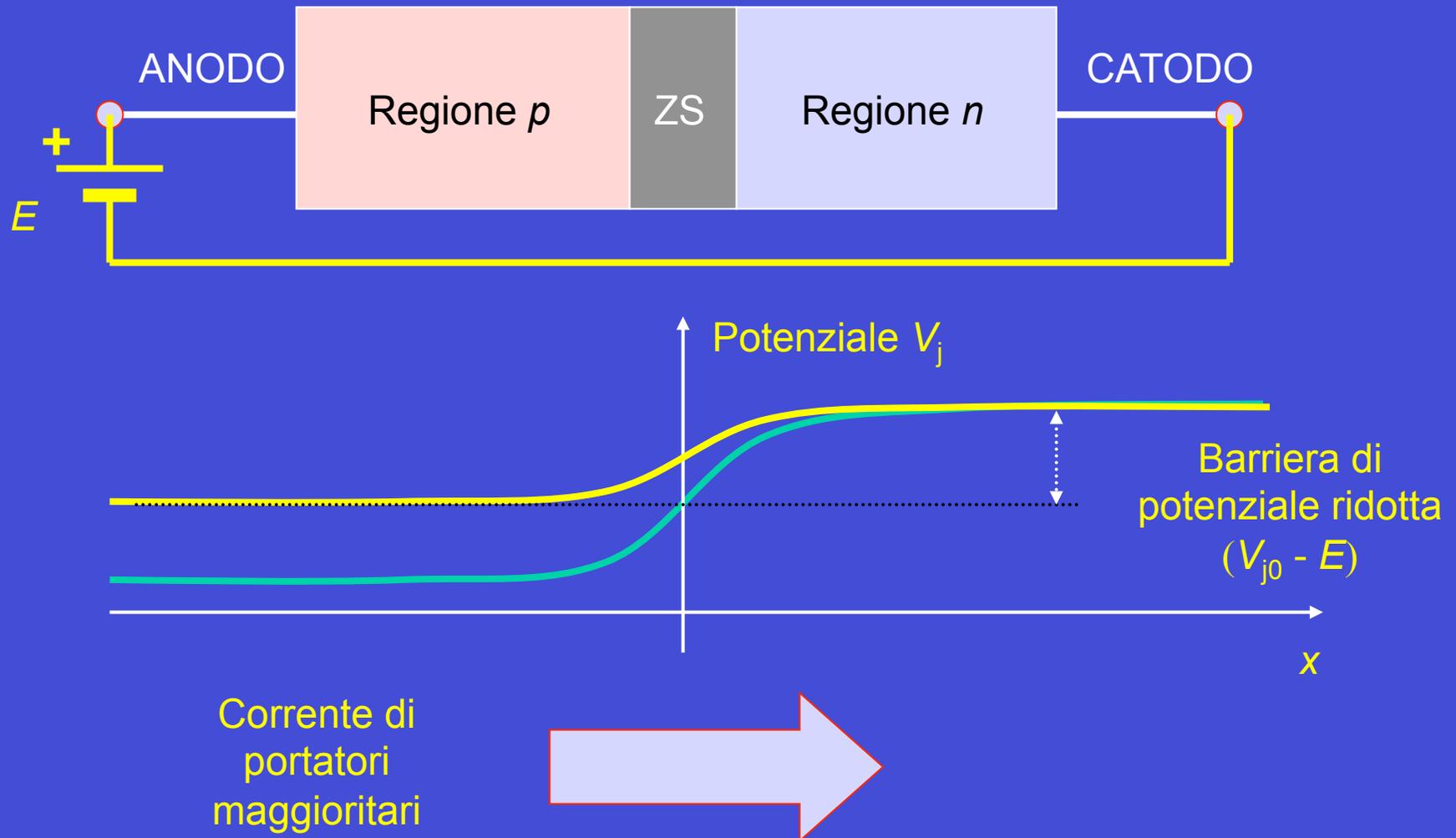


1861 > 2011 >>  
150° anniversario Unità d'Italia

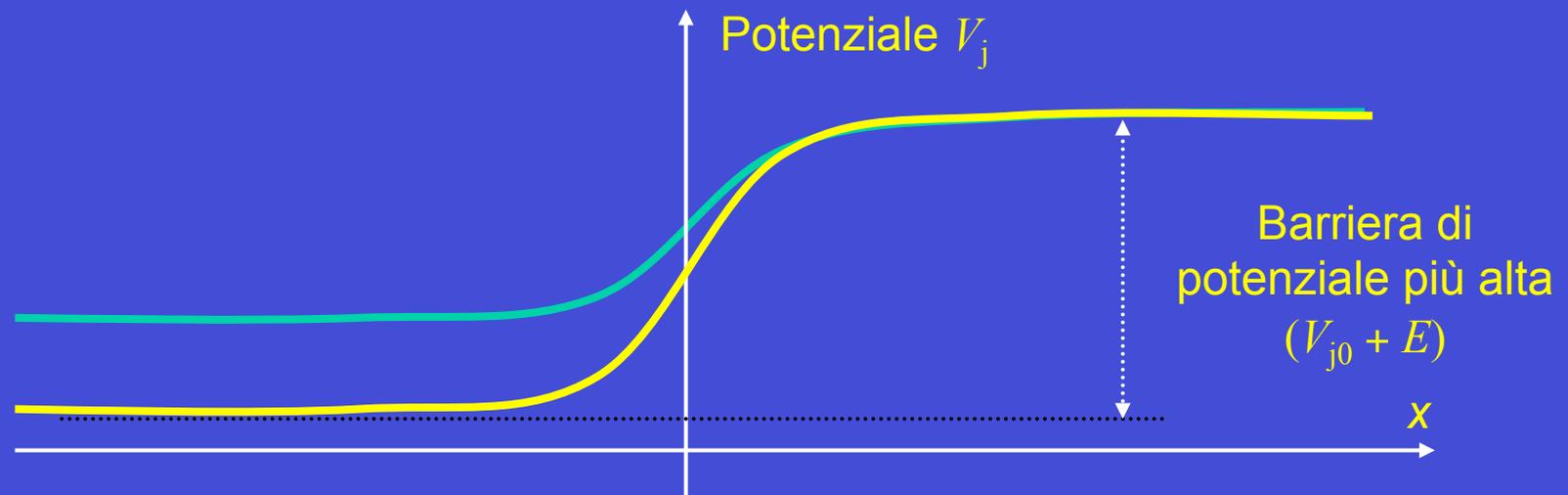
# Giunzione pn



# Polarizzazione diretta



# Polarizzazione inversa



Corrente di portatori minoritari  
(molto piccola)





## Parte 2

# Proprietà dei diodi a giunzione

Caratteristica  $i-v$

Tensione di accensione  $V_\gamma$

Stima dei parametri

Effetto della temperatura

Il fenomeno del breakdown

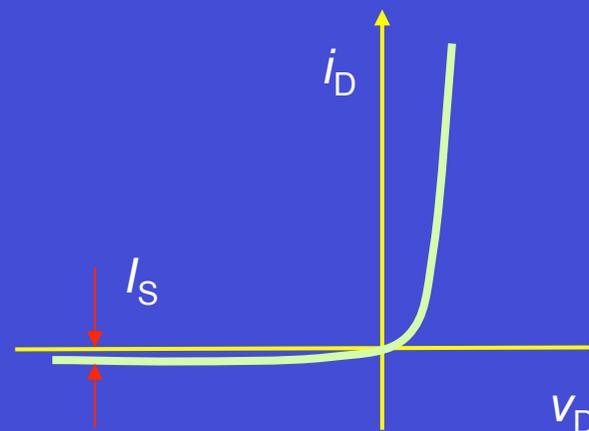
# Caratteristica $i$ - $v$ dei diodi

## ➤ 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
$\eta$	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 $V_\gamma$

- 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 (@ $I_D = I_0$ )
  - $V_\gamma$  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

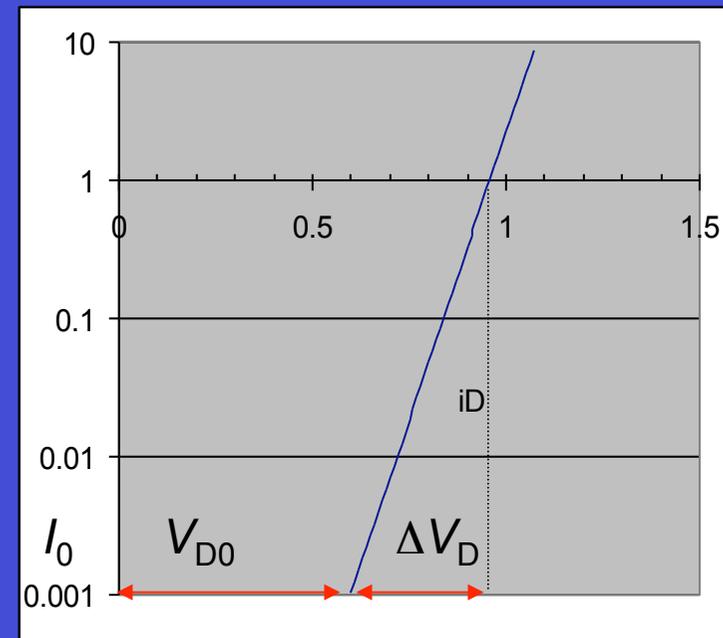
# Determinazione dei parametri

- **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)

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

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

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

$$I_S \ll I_0$$

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

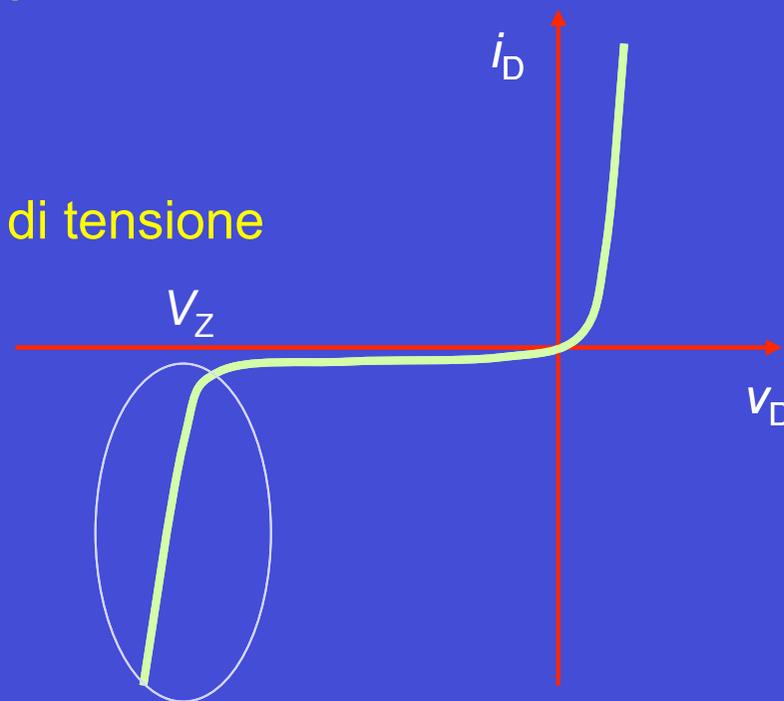
## Effetti della temperatura (2)

- **Effetto sulla tensione  $V_\gamma$** 
  - **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

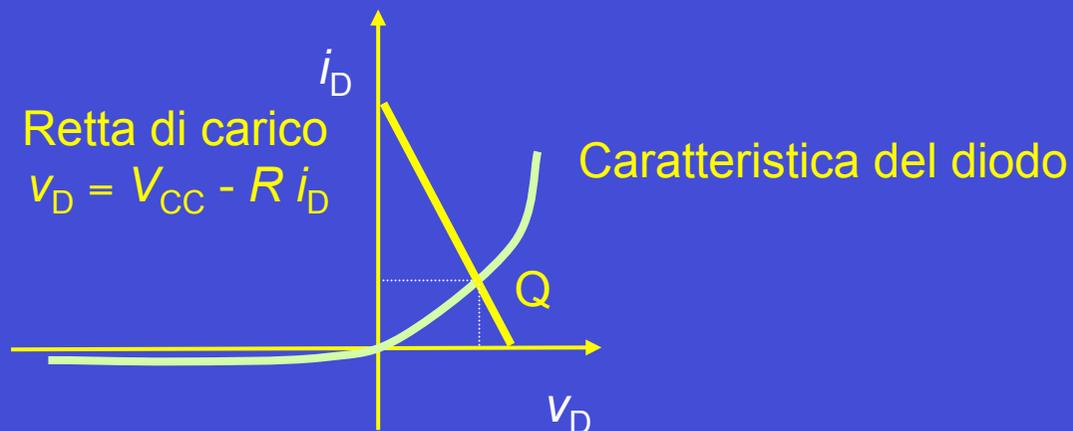
Metodo iterativo

Modello approssimato per grandi segnali

Modello statico per piccoli segnali

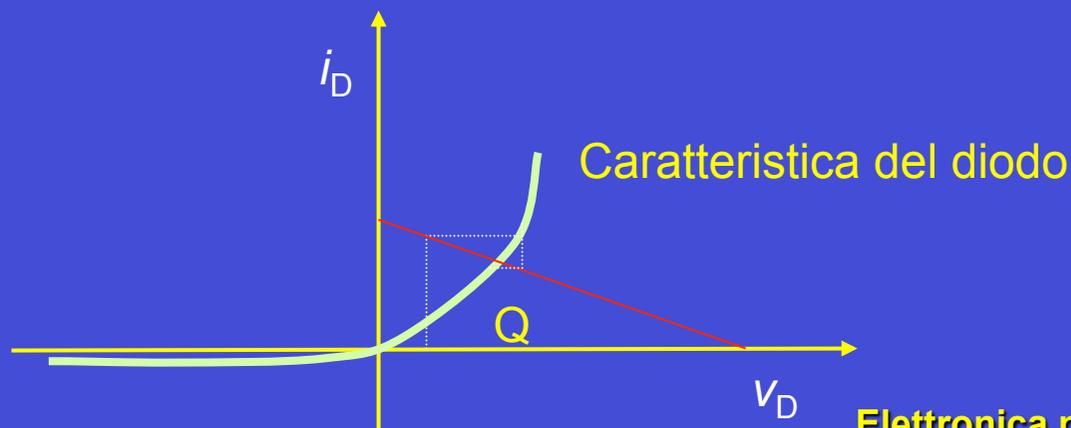
# Metodo grafico

- 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



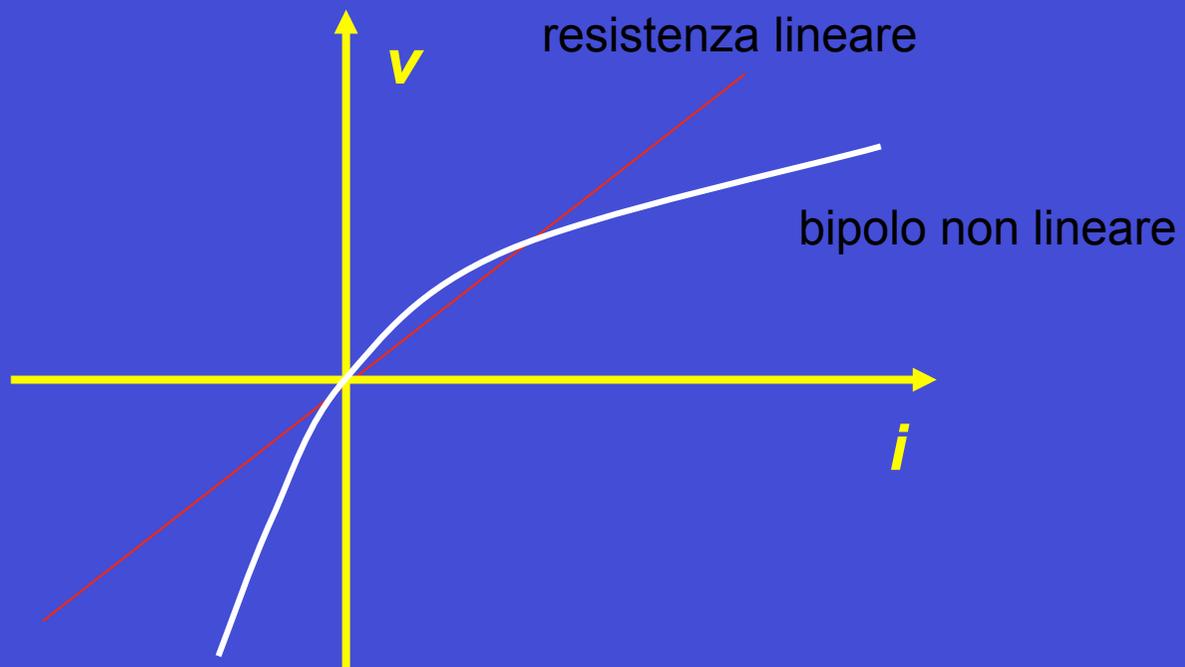
## Metodo iterativo 18/3

- 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

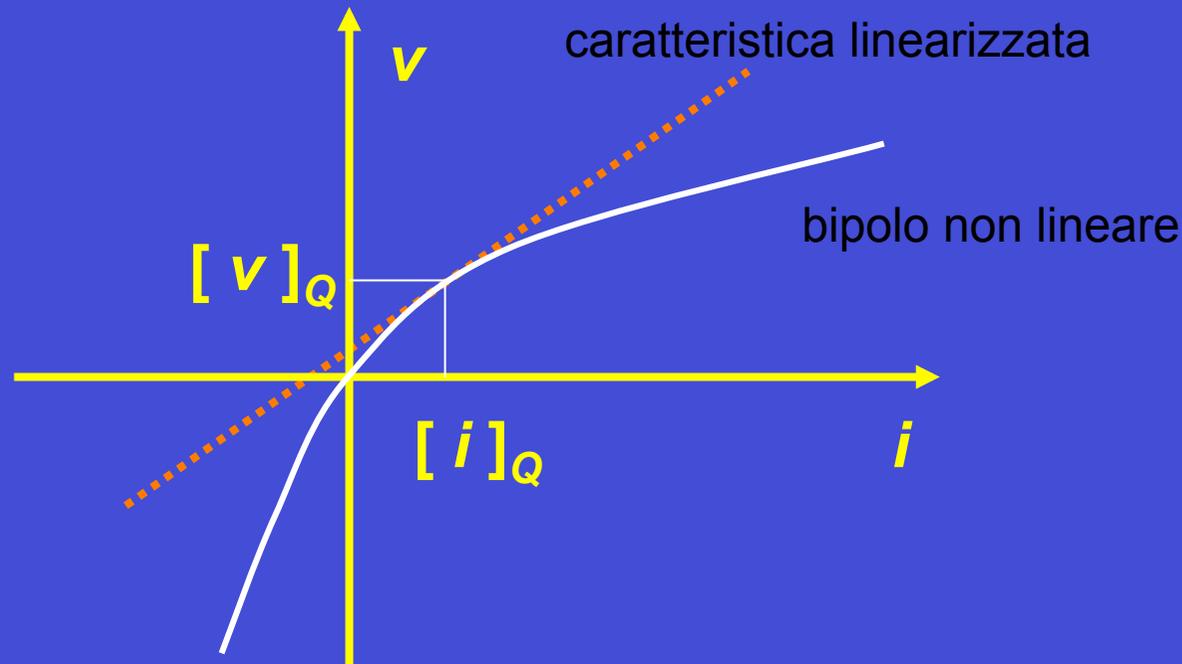
- **Gli elementi con memoria non hanno effetto**
  - I condensatori sono circuiti aperti
  - Le induttanze sono cortocircuiti
- **Soluzione di un sistema non lineare con generatori ed elementi resistivi**
  - Si ricavano i valori di tutte le tensioni e le correnti
  - Si trova cioè un punto Q (o più 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

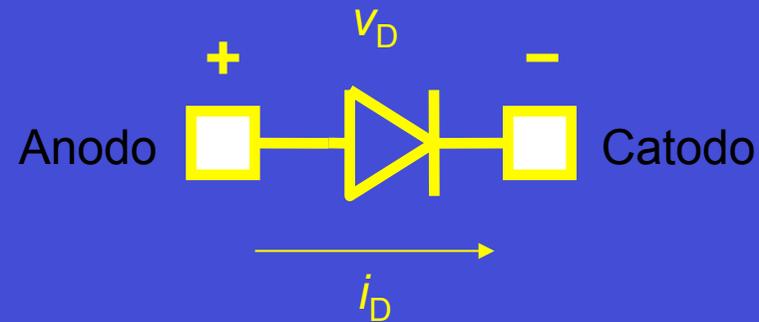
- Esiste un modo più semplice per trovare i coefficienti
- È sufficiente linearizzare la relazione  $v-i$  di ogni bipolo nell'intorno del punto di lavoro



# 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

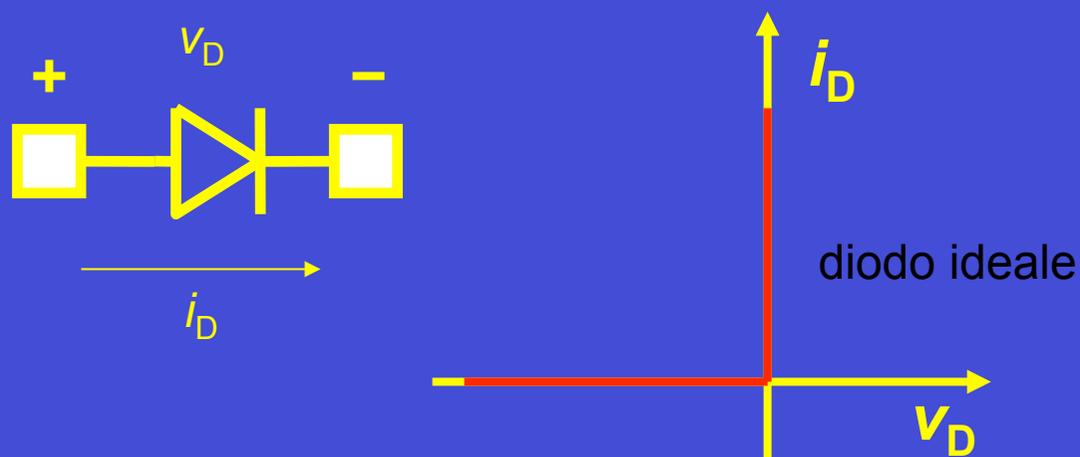
# Simbolo e funzionamento



## ➤ 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

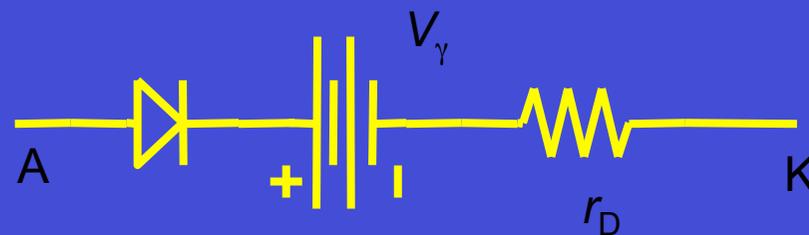
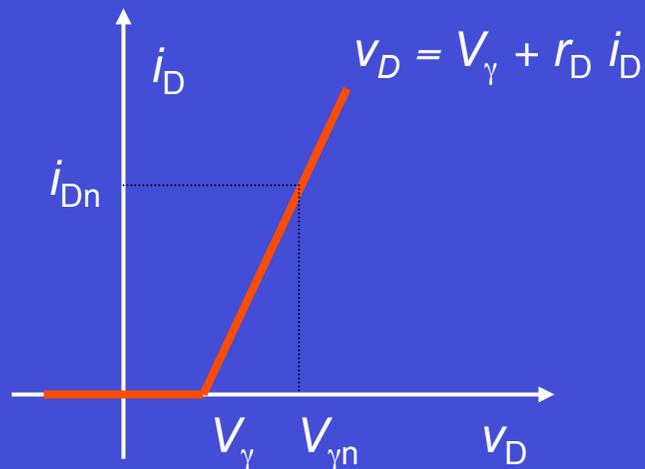
# Caratteristica $i-v$



- 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  $V_\gamma$  e resistenza  $r_D$





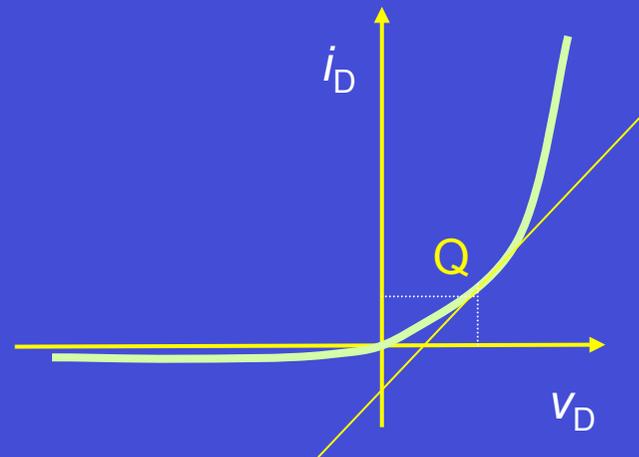
1861 > 2011 >  
150° anniversario Unità d'Italia

# 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

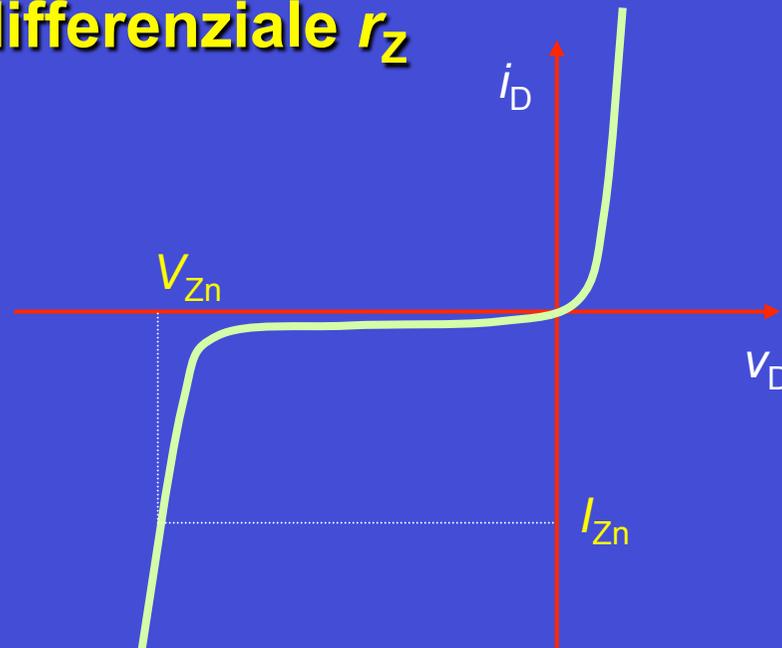
Simbolo



# 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

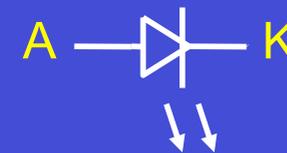
➤ Tensione di accensione in diretta  $V_{\gamma 0} = V_{\gamma} - I_D r_D$

➤ 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**
  - $V_{\gamma}$  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

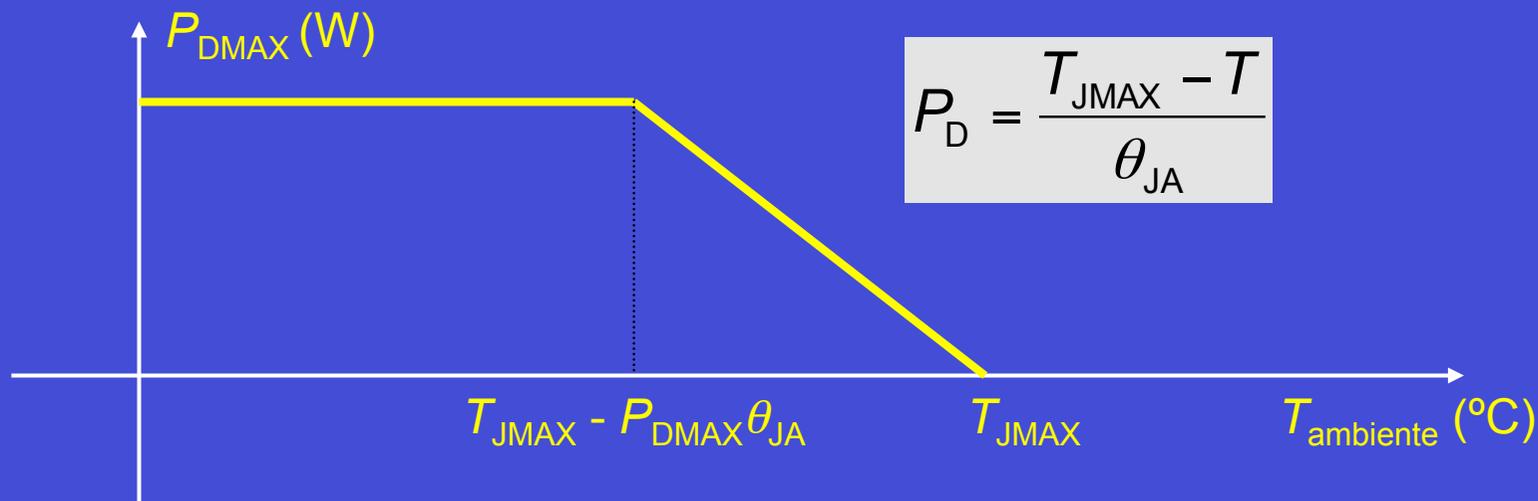
- Dipende dalla differenza di temperatura tra due superfici isoterme e dalla resistenza termica
  - Da giunzione a contenitore  $\theta_{JC}$
  - Da contenitore ad ambiente  $\theta_{CA}$ 
    - La resistenza termica dipende dal dissipatore e dal tipo di ventilazione
- Segue approssimativamente una legge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

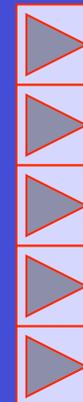
- **Potenza massima dissipabile**
  - La massima corrente è limitata
  - La massima temperatura di giunzione è limitata
    - Solitamente da 150°C a 200°C
  - Occorre ridurre la potenza quando aumenta  $T_{\text{ambiente}}$



## 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**