

# Elettronica digitale

## Componenti per circuiti logici

(Cap. 3, App. A)

Dispositivi elettronici per circuiti logici

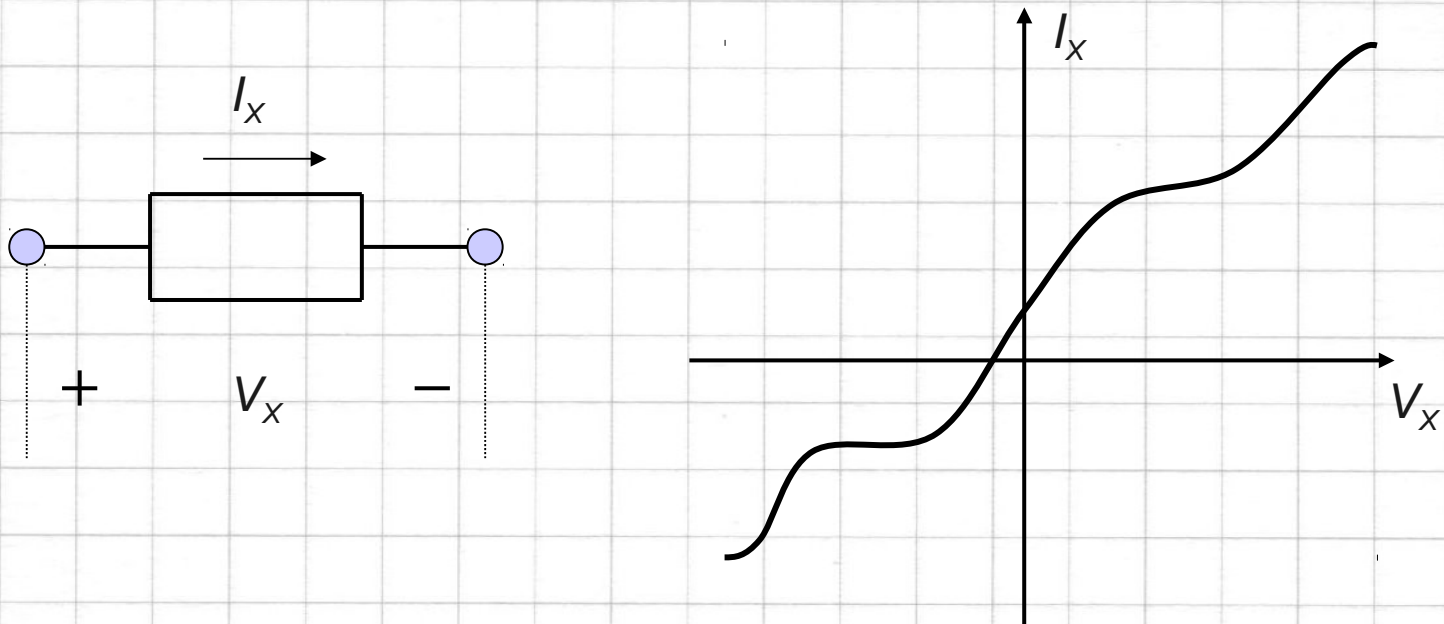
Diodo

Transistore bipolare

Transistore a effetto di campo

# Bipoli

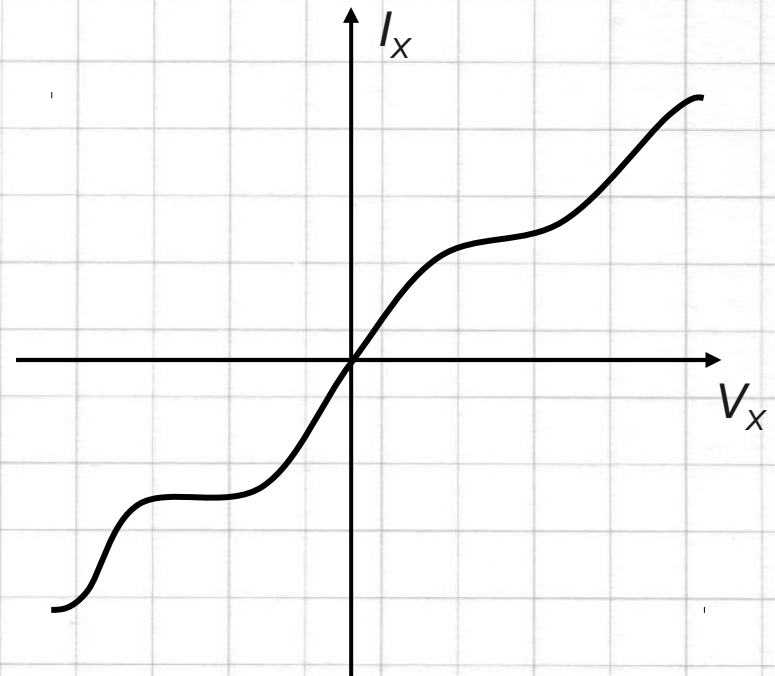
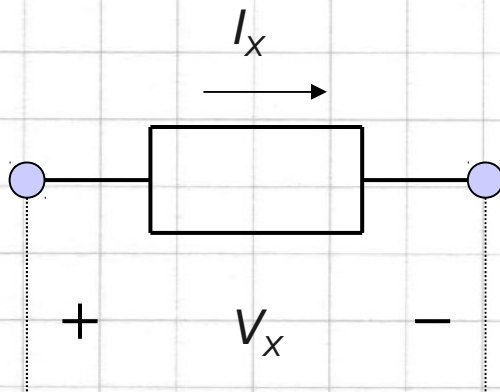
- Componenti a 2 terminali
  - Caratterizzati dalla relazione tra tensione applicata e corrente che scorre
  - Se ci si limita all'analisi statica, la relazione è costituita da una funzione (senza memoria)
  - Si definisce curva corrente-tensione



# Definizioni sui bipoli (1)

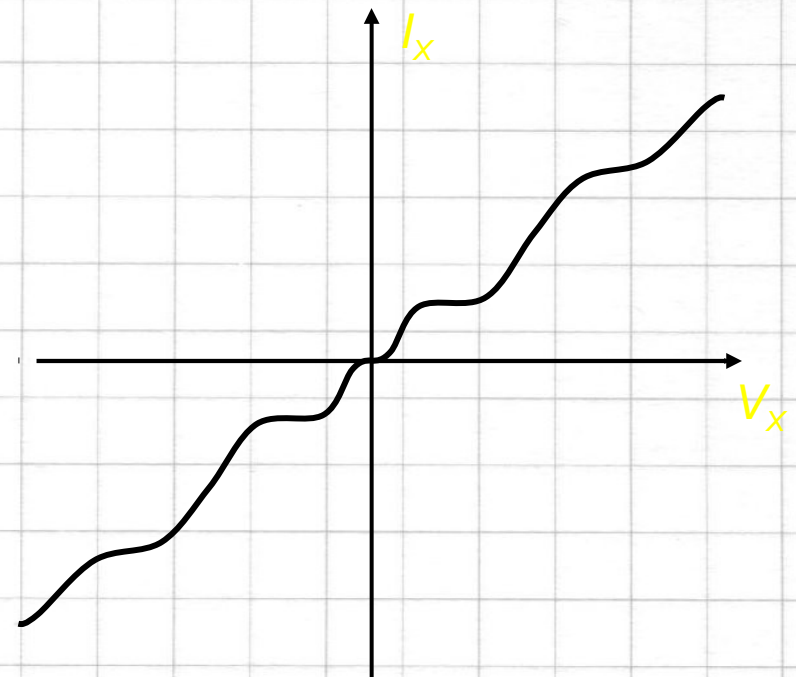
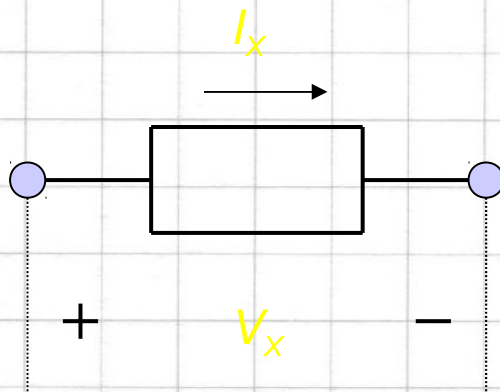
## ➤ Passivi

- La curva  $I$ - $V$  passa dall'origine ed è contenuta nei quadranti 1 e 3
- Il prodotto  $I$  $V$  è sempre positivo



# Definizioni sui bipoli (2)

- Simmetrici o non polarizzati
  - La curva  $I$ - $V$  è dispari
  - I due terminali del bipolo sono indistinguibili



# Definizioni sui bipoli (3)

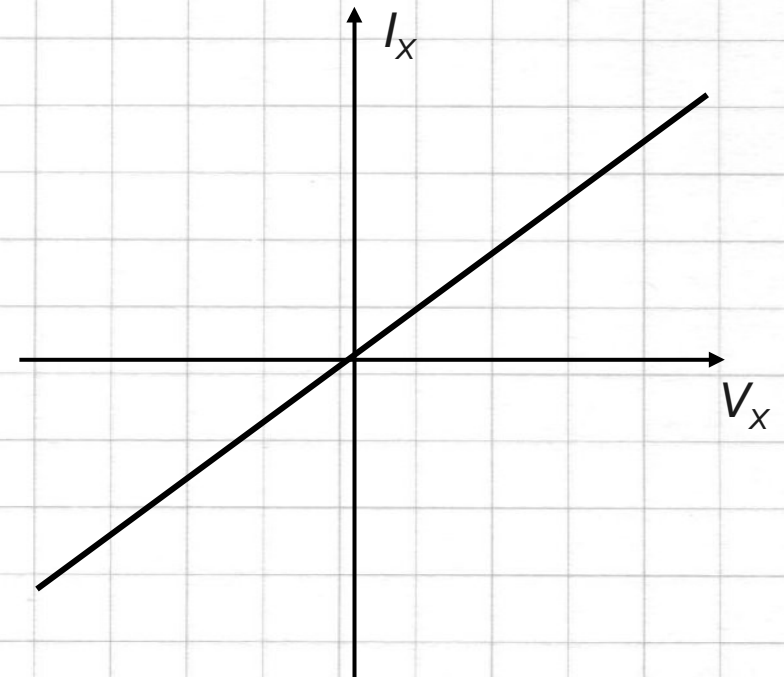
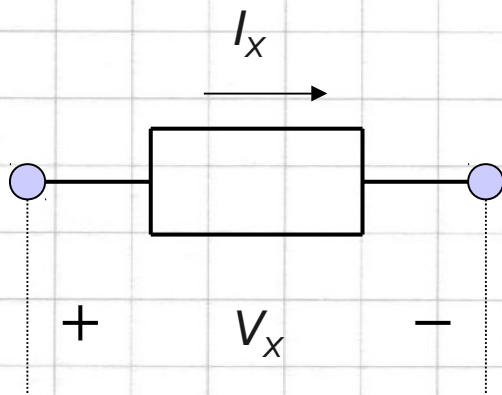
## ➤ Lineari

➤ La curva  $I$ - $V$  è una retta:  $I_x = V_x / R$

➤ Si può applicare la sovrapposizione degli effetti

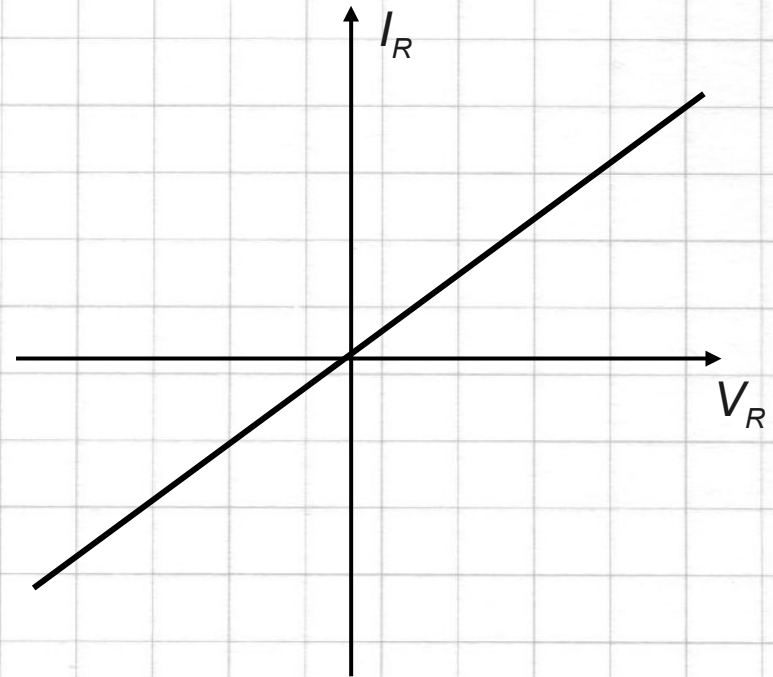
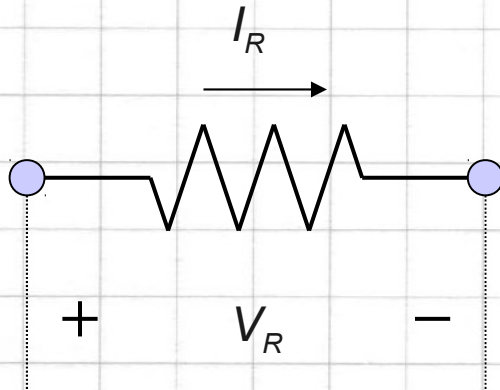
$$➤ I_x = V_x / R = V_{x1} / R + V_{x2} / R = I_{x1} + I_{x2}$$

➤ C'è proporzionalità tra corrente e tensione (legge di Ohm)



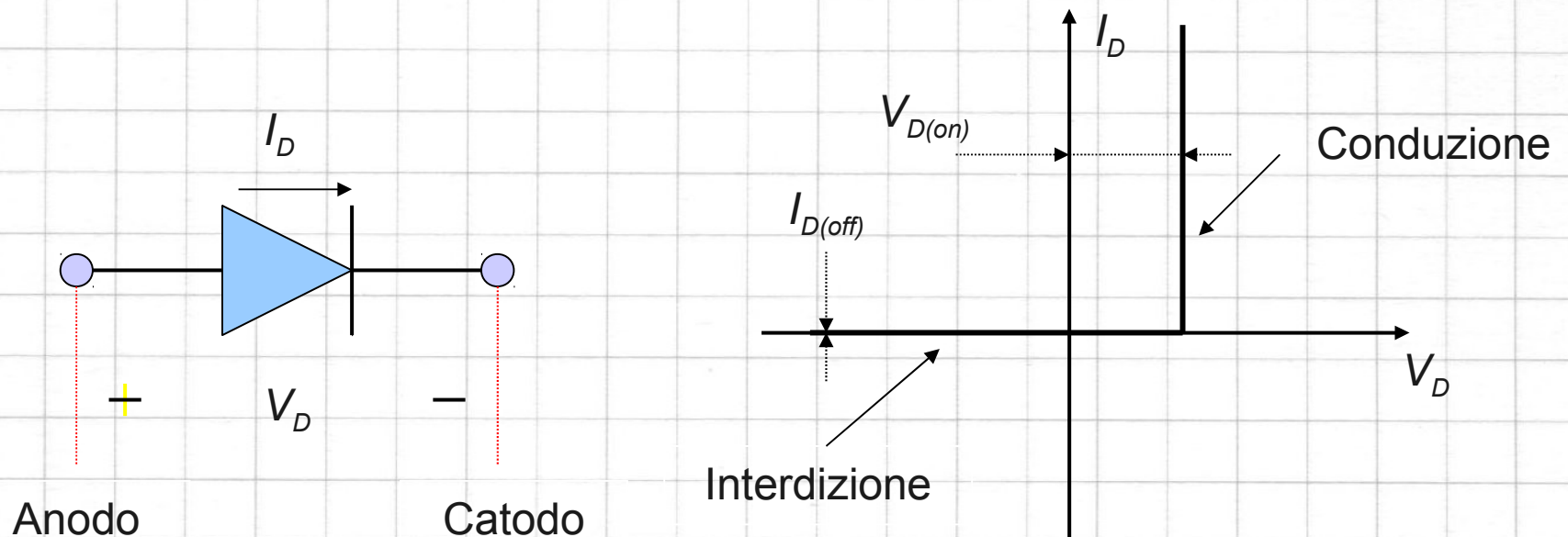
# Resistore

- Bipolo passivo, simmetrico, lineare
  - $V = RI$ ;  $I = GV$
  - La costante  $R$  si chiama resistenza
  - Il suo inverso  $G$  si chiama conduttanza



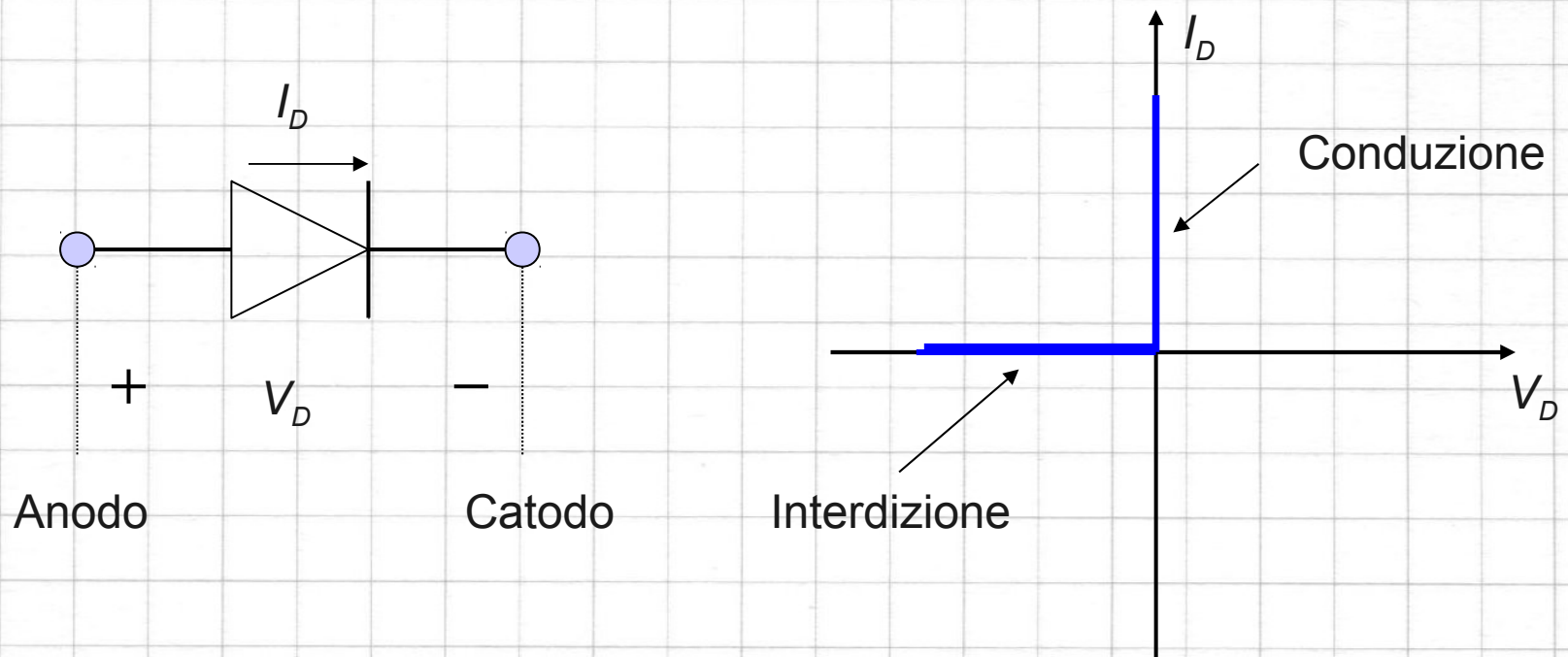
# Diode

- Bipolo passivo, non lineare, unidirezionale
  - Permette il passaggio di corrente in una sola direzione
    - Da anodo a catodo
    - **Interdizione**: la corrente che lo attraversa  $I_{D(off)}$  è  $\approx$  nulla
    - **Conduzione**: la tensione  $V_{D(on)}$  è piccola ( $\approx 0.7$  V)



# Diode ideale

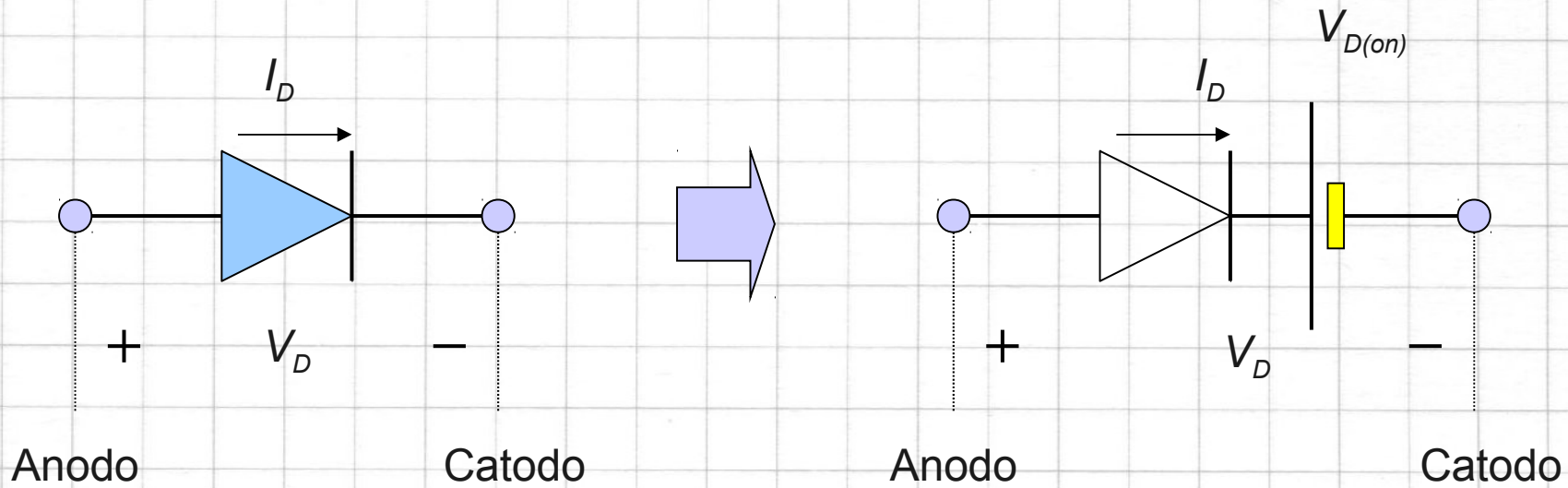
- La tensione del diodo in conduzione è nulla
  - $V_{D(\text{on})} = 0$  e  $I_D > 0$
- Nel diodo interdetto non scorre corrente
  - $I_{D(\text{off})} = 0$  e  $V_D < 0$





# Modello del diodo

- Per modellare un diodo (quasi) reale, si può usare un circuito con un diodo ideale e un generatore ideale di valore  $V_{D(on)}$
- La parte positiva del generatore è collegata al catodo del diodo ideale



# Analisi di circuiti con diodi (1)

- Osservazione preliminare
  - Nelle due regioni, prese singolarmente, il diodo (quasi) ideale ha un comportamento lineare
    - Cortocircuito (in conduzione) e circuito aperto (in interdizione)
- Conseguenza
  - Se si conosce (o si assume per ipotesi) lo stato del diodo, il circuito si può risolvere con le metodologie solite (leggi di Kirchhoff e di Ohm)
  - La soluzione deve essere congruente con lo stato del diodo assunto inizialmente
    - In conduzione si deve avere  $I_D > 0$
    - In interdizione si deve avere  $V_D < 0$

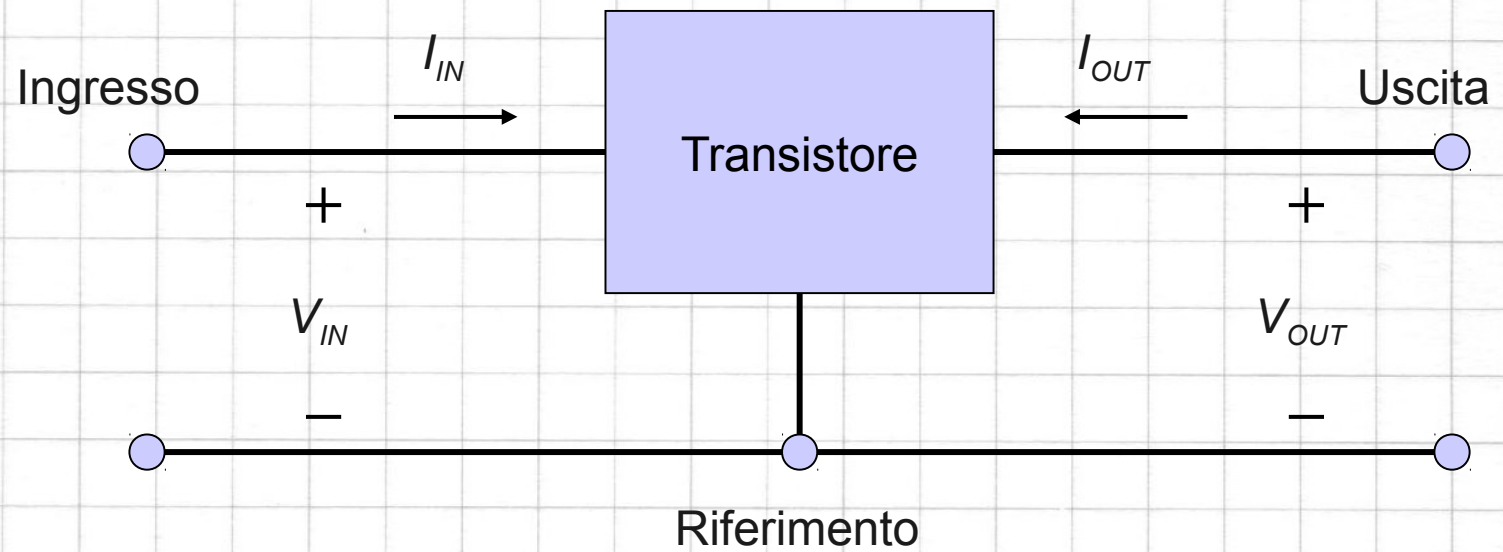
# Analisi di circuiti con diodi (2)

- Se la condizione di congruenza non è verificata?
  - Vuol dire che l'ipotesi di partenza non è vera
  - Un diodo ha solo due stati (conduzione o interdizione), quindi se una non funziona è vera l'ipotesi opposta
- Limite di conduzione (o di interdizione)
  - La situazione con  $I_D = 0$  e  $V_D = 0$
  - Compatibile con entrambi gli stati

# Transistori (1)

- Componenti a 3 terminali
  - Un terminale ha il ruolo di riferimento
  - Nella zona di funzionamento “lineare”, la corrente del terminale di uscita è controllata dalla grandezza al terminale di ingresso
    - Nei transistori bipolari la grandezza di controllo è una corrente
    - In quelli a effetto di campo la grandezza di controllo è una tensione
  - Hanno anche altre zone di funzionamento in cui non vi è relazione tra ingresso e uscita

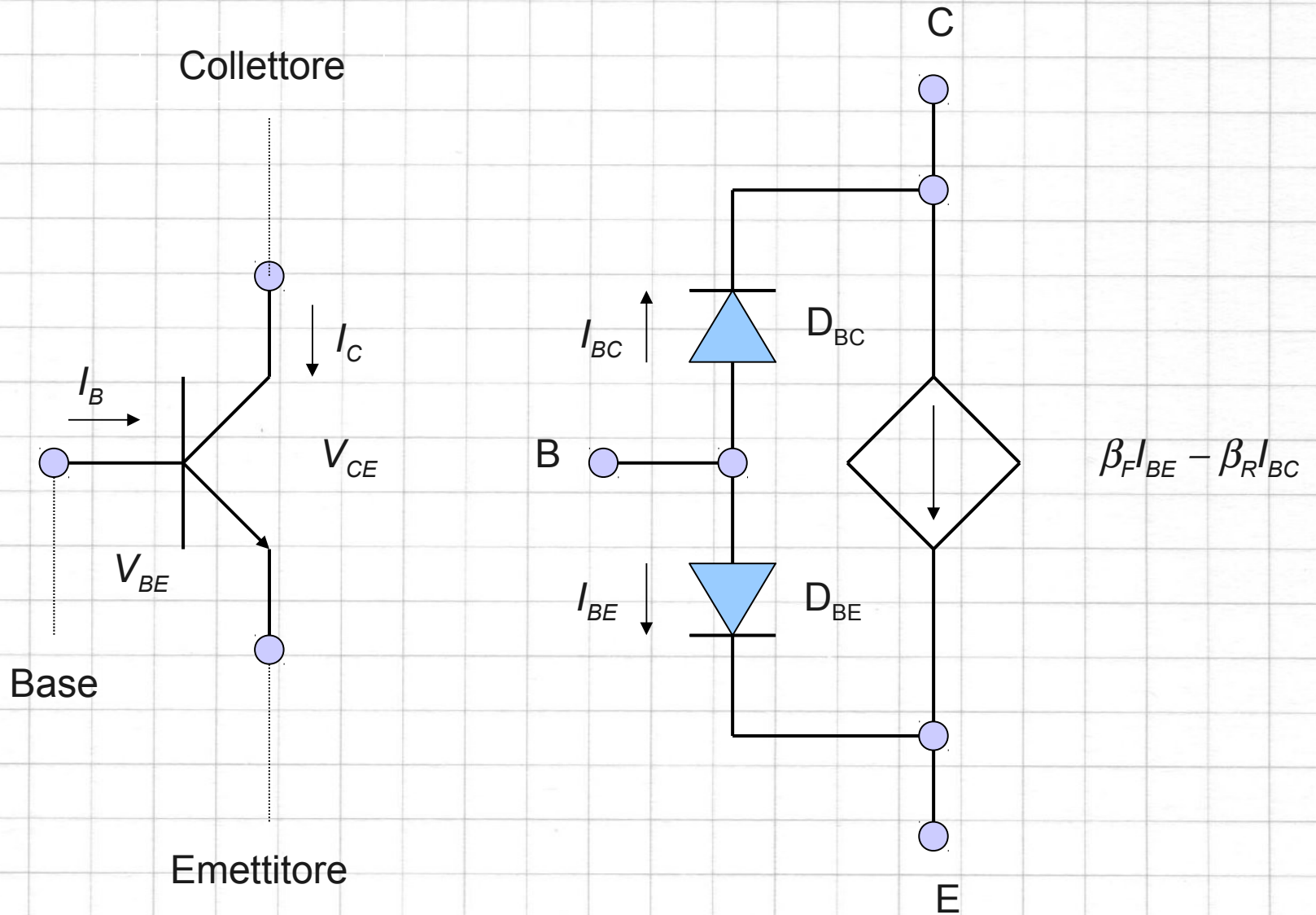
# Transistori (2)



# Transistore bipolare (BJT)

- Amplificatore di corrente controllato da corrente
- Terminali
  - Riferimento: emettitore (E)
  - Ingresso: base (B)
  - Uscita: collettore (C)
- Tipi di BJT
  - Esistono due tipi di transistori bipolari: npn e pnp
  - Il comportamento dei due tipi è complementare
    - Correnti e tensioni (rispetto al riferimento) hanno segno opposto nella stessa zona di funzionamento

# BJT *npn*: simbolo e modello



# BJT: zone di funzionamento (1)

- Il BJT *npn* ha 2 diodi, quindi 4 zone di lavoro
  - $D_{BE}$  interdetto,  $D_{BC}$  interdetto
    - **INTERDIZIONE**
  - $D_{BE}$  conduce,  $D_{BC}$  interdetto
    - **ZONA ATTIVA DIRETTA**
  - $D_{BE}$  interdetto,  $D_{BC}$  conduce
    - **ZONA ATTIVA INVERSA**
  - $D_{BE}$  conduce,  $D_{BC}$  conduce
    - **SATURAZIONE**
- L'analisi si esegue secondo la metodologia proposta per i circuiti con diodi



# Interdizione (off)

- Ipotesi e verifica

- Ipotesi di partenza

- $I_{BE} = 0$

- $I_{BC} = 0$

- Si traducono nelle ipotesi sulle grandezze esterne

- $I_B = 0$

- $I_C = 0$

- Dopo la soluzione occorre verificare

- $V_{BE} < V_{BE(on)}$

- $V_{BC} < V_{BC(on)}$

- Queste grandezze sono già rilevabili esternamente

- Si usano i valori tipici  $V_{BE(on)} = V_{BC(on)} = 0.7 \text{ V}$

# Zona attiva diretta (zad)

- Ipotesi:  $V_{BE} = V_{BE(on)}$ ;  $I_{BC} = 0$ 
  - Grandezze esterne:  $V_{BE} = V_{BE(on)}$ ,  $I_C = h_{FE} I_B$
- Da verificare:  $I_{BE} > 0$ ,  $V_{BC} < V_{BC(on)}$ 
  - Esternamente:  $I_B > 0$ ,  $V_{BC} < V_{BC(on)}$
  - Si preferisce verificare la condizione:  $V_{CE} > V_{BE(on)} - V_{BC(on)} = 0.1 \text{ V}$
  - In questo caso si usa il valore limite  $V_{BE(on)} = 0.8 \text{ V}$ , detto  $V_{BE(sat)}$

# Zona attiva inversa (zai)

- Zona attiva inversa (zai)
  - Ipotesi:  $V_{BC} = V_{BC(on)}$ ,  $I_{BE} = 0$
  - Conseguenza sulle grandezze esterne:  $V_{BC} = V_{BC(on)}$ ,  $I_E = h_{RE} I_B$
  - Da verificare:  $I_{BC} > 0$ ,  $V_{BE} < V_{BE(on)}$
  - Esternamente:  $I_B > 0$ ,  $V_{BE} < V_{BE(on)}$

# Saturazione

## ➤ Saturazione (sat)

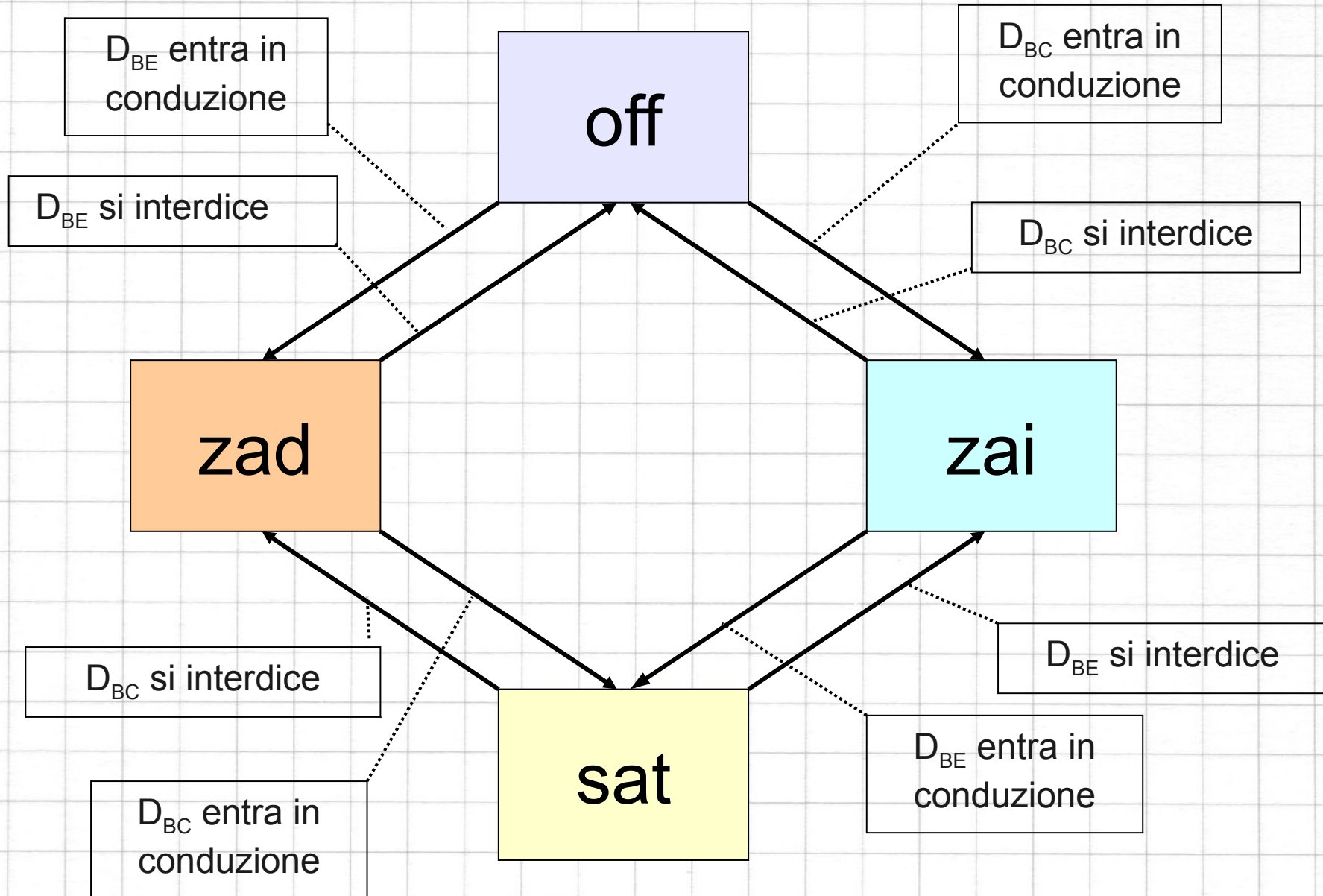
➤ Ipotesi:  $V_{BE} = V_{BE(sat)}$ ,  $V_{BC} = V_{BC(on)}$

➤ Tipicamente:  $V_{BE(sat)} = 0.8 \text{ V}$ ,  $V_{BC(on)} = 0.7 \text{ V}$ ,  $V_{CE(sat)} = 0.1 \text{ V}$

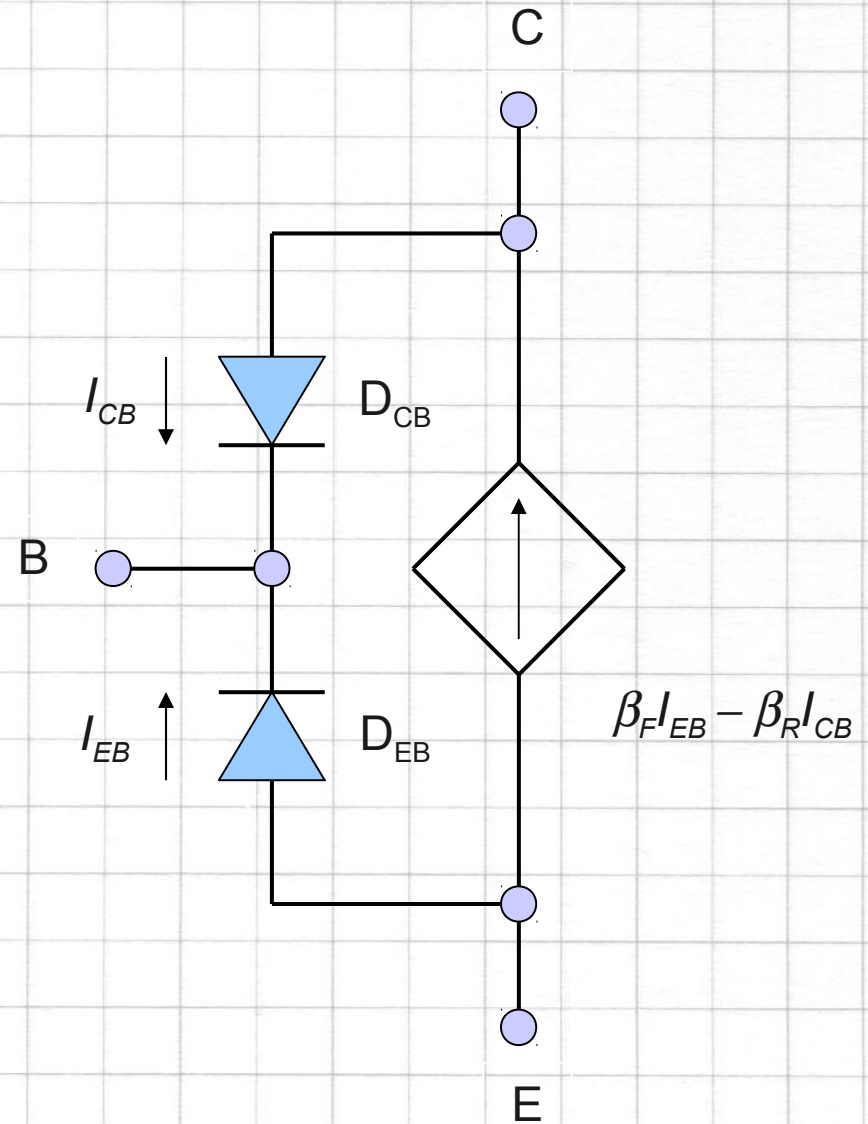
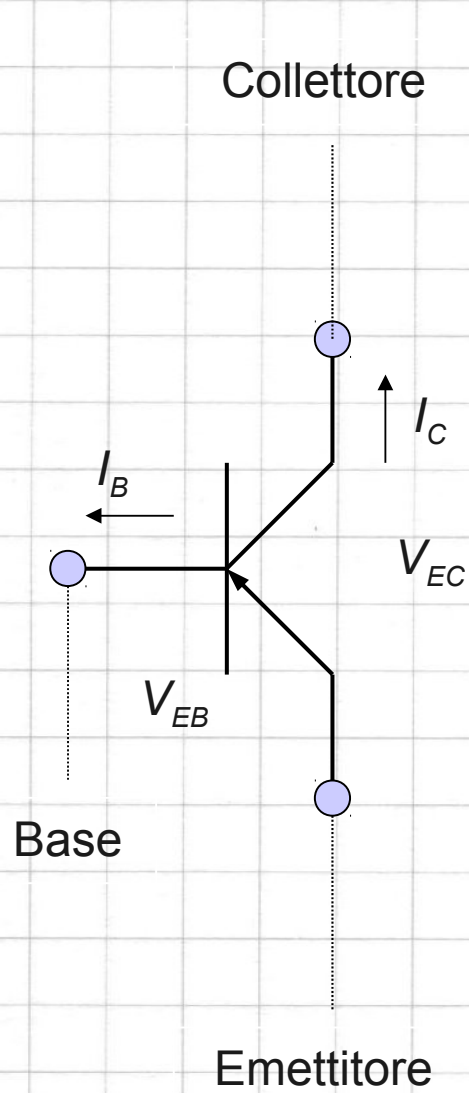
➤ Da verificare:  $I_{BE} > 0$ ;  $I_{BC} > 0$

➤ Esternamente:  $I_B > 0$ ;  $(h_{RE} + 1)I_B < I_C < h_{FE}I_B$

# BJT *npn*: transizione tra zone



# BJT *pnp*: simbolo e modello



# BJT *pnp*: analisi

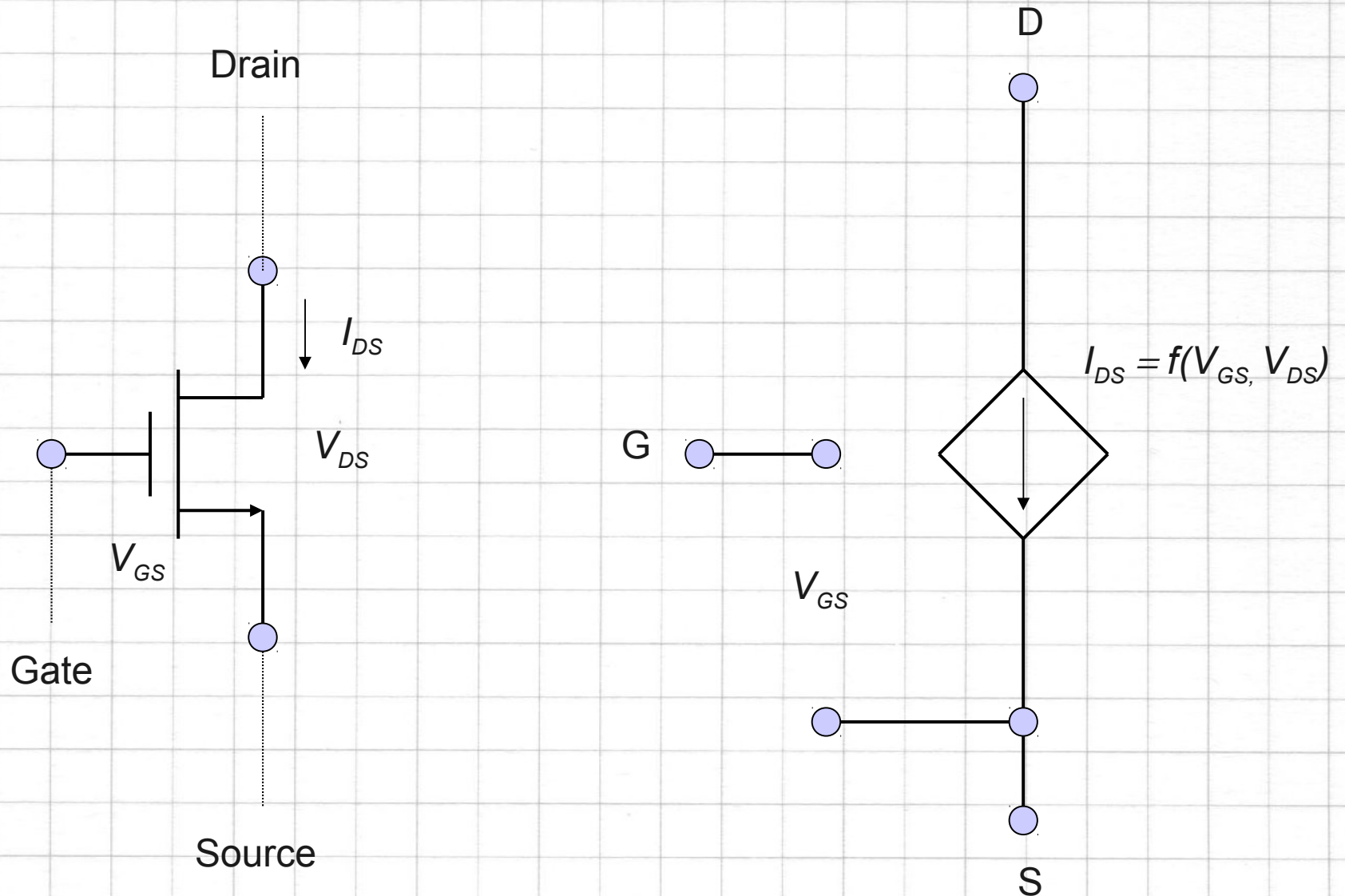
- Si usa la stessa metodologia dei BJT *npn*
  - Occorre porre attenzione al fatto che i diodi, le correnti di controllo e il generatore controllato hanno segno opposto
- I risultati sono simili e complementari

# Effetto di campo (FET)

- Amplificatore di corrente controllato in tensione
- Terminali
  - Riferimento: source (S)
  - Ingresso: gate (G)
  - Uscita: drain (D)
- Tipi di FET
  - Esistono diverse specie: JFET e MOSFET
    - I MOSFET sono ad arricchimento o svuotamento
    - Di ogni specie esistono due polarità:  $n$  e  $p$
- In elettronica digitale si usano principalmente MOSFET ad arricchimento di tipo  $n$  e  $p$



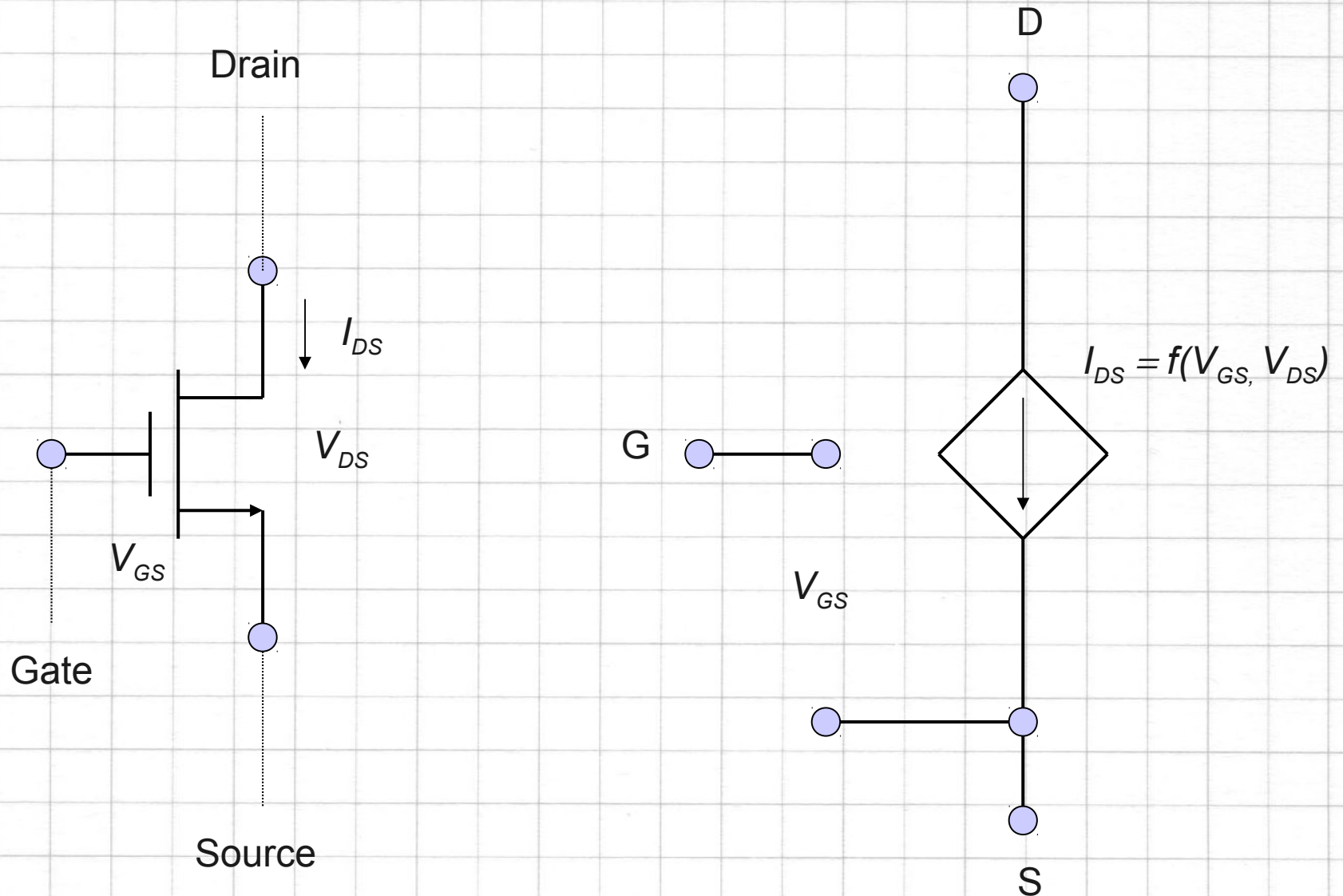
# MOSFET *n*: simbolo e modello



# MOSFET $n$ : equazioni

- Nei MOSFET  $n$  digitali, S e D indistinguibili
  - Per definizione, si deve avere  $V_D > V_S$
- Si hanno 3 zone di funzionamento
  - Interdizione:  $V_{GS} < V_{Tn}$ 
    - $I_{DS} = 0$
  - Zona triodo:  $V_{GS} > V_{Tn}$  e  $V_{GD} > V_{Tn}$ 
    - $I_{DS} = K_n V_{DS} (V_{GS} + V_{GD} - 2V_{Tn})/2$
  - Saturazione:  $V_{GS} > V_{Tn}$  e  $V_{GD} < V_{Tn}$ 
    - $I_{DS} = K_n (V_{GS} - V_{Tn})^2/2$
- $V_{Tn}$  è la tensione di soglia
- $K_n$  è una costante ( $\text{mA}/\text{V}^2$ )

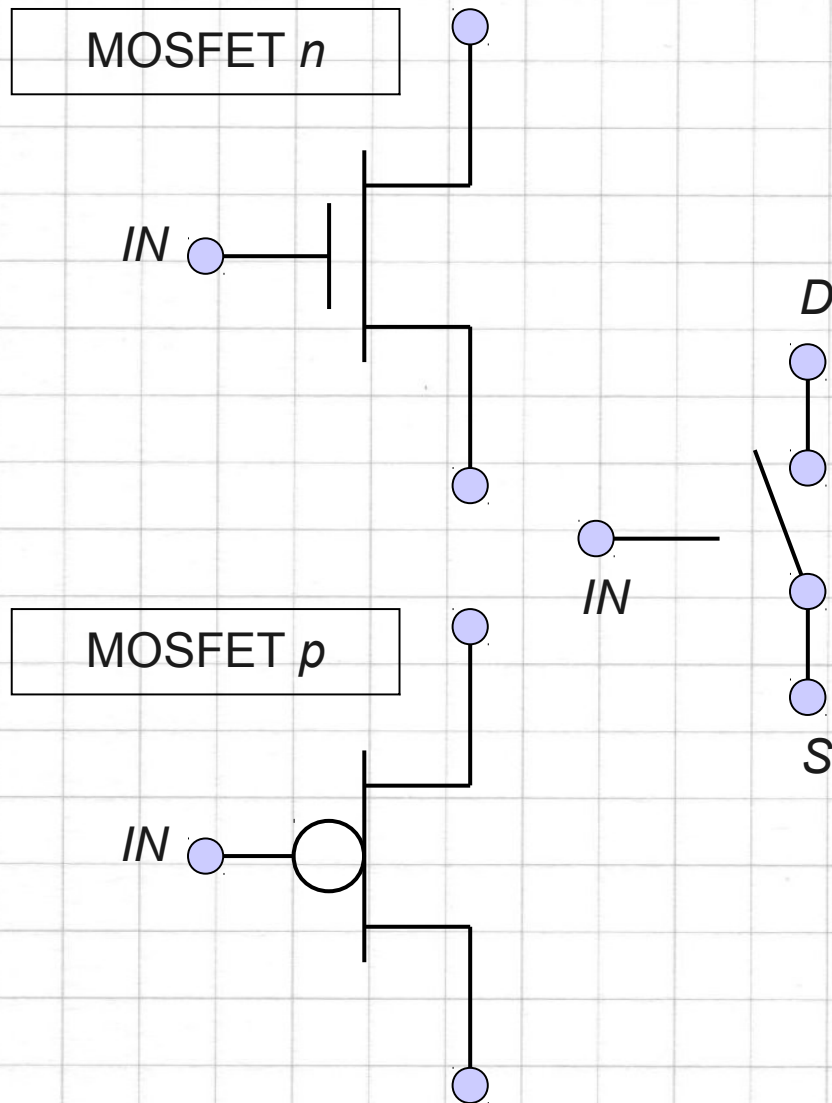
# MOSFET $p$ : simbolo e modello



# MOSFET $p$ : equazioni

- MOSFET  $p$  digitali sono complementari degli  $n$ 
  - Per definizione,  $S$  e  $D$  sono tali che  $V_D > V_S$
- Si hanno 3 zone di funzionamento
  - Interdizione:  $V_{GS} < V_{Tp}$ 
    - $I_{DS} = 0$
  - Zona triodo:  $V_{GS} > V_{Tp}$  e  $V_{GD} > V_{Tp}$ 
    - $I_{DS} = K_p V_{DS} (V_{GS} + V_{GD} - 2V_{Tn})/2$
  - Saturazione:  $V_{GS} > V_{Tp}$  e  $V_{GD} < V_{Tp}$ 
    - $I_{DS} = K_p (V_{GS} - V_{Tn})^2/2$
- $V_{Tp}$  è la tensione di soglia (negativa)
- $K_p$  è una costante negativa ( $\text{mA/V}^2$ )

# MOSFET $n$ e $p$ : simboli e funzione logica



MOSFET $n$	
IN	Contatto S-D
0	Aperto
1	Chiuso

MOSFET $p$	
IN	Contatto S-D
0	Chiuso
1	Aperto